



ВОСЬМАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

# БУДУЩЕЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ РОССИИ

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

23.09.2015 — 26.09.2015



СОЮЗ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ  
РОССИИ

Союз машиностроителей России



Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана



Москва  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МГТУ им. Н. Э. Баумана  
2 0 1 5

УДК 621  
ББК 34.4  
В61

**Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»** : сборник докладов / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 1154, [6] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4334-5

В сборник включены доклады, представленные на Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», которая состоялась в сентябре 2015 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Структура сборника отражает тематическую направленность конференции. Тексты докладов размещены в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

УДК 621  
ББК 34.4

ISBN 978-5-7038-4334-5

© МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015

УДК 621.914:621.833

## Расчет параметров станочного зацепления при формообразовании круговых зубьев шестерни цилиндрической передачи

© Бочкова Дина Евгеньевна, Бобков Михаил Николаевич

Россия, г. Тула, Тульский государственный университет

[bochkovade@rambler.ru](mailto:bochkovade@rambler.ru)

*Рассмотрен способ формообразования круговых зубьев цилиндрических колес, обеспечивающий не только продольную, но и профильную модификацию боковых поверхностей зубьев, что обуславливает устранение кромочного контакта в передаче и создает предпосылки для улучшения ее эксплуатационных характеристик. Даны зависимости для определения параметров станочного зацепления и координат точек боковых поверхностей зубьев, позволяющие рассчитать значение модификации.*

**Ключевые слова:** зубчатая передача, круговой зуб, производящее колесо, зуборезная головка, станочное зацепление, модификация зубьев.

В процессе эксплуатации цилиндрических зубчатых передач в ряде случаев имеет место кромочный контакт зубьев на их торцах и вершинах, который возникает под нагрузкой в результате сложения погрешностей изготовления колес и сборки передачи и может вызвать выкрашивание рабочих сторон зубьев.

Наиболее эффективным путем улучшения работы зубчатых передач является локализация зоны касания зубьев за счет модификации их боковых поверхностей, компенсирующая влияние погрешностей изготовления и упругих деформаций передачи под нагрузкой и повышающая ее эксплуатационные характеристики [1].

Сочетание продольной и профильной модификации зубьев шестерни (колеса) создает благоприятные условия для равномерного распределения нагрузки и напряжений по ширине венца, поскольку профильная модификация смещает контакт от вершины и ножки зуба к полюсу, а продольная — от торцов к среднему сечению [2].

Для получения локализованной зоны касания при изготовлении цилиндрических колес с круговыми зубьями заготовку шестерни  $1$  в станочном зацеплении обкатывают по воображаемому производящему колесу  $3$ , зубья которого в среднем торцовом сече-

нии имеют трапецеидальный, а не эвольвентный, профиль (рис. 1). В процессе обработки зуборезной головке 2, резцы которой материализуют зуб производящего колеса, сообщают главное движение резания  $D_r$  — вращение вокруг оси  $O_2$ , а заготовке — два вращательных движения  $D_{sw1}$  и  $D_{sw0}$  соответственно вокруг оси  $O_1$  заготовки и оси  $O_0$  производящего колеса, согласованных таким образом, что ее начальный цилиндр радиусом  $r_{w1}$  катится без скольжения по неподвижной центроиде — начальному цилиндру производящего колеса радиусом  $r_{w0}$ . Ось  $O_1$  заготовки при этом перемещается по дуге окружности с радиусом, равным межосевому расстоянию  $a_{w0}$  станочного зацепления. По окончании формообразования впадины заготовку отводят в исходное положение, осуществляют деление на зуб и цикл обработки повторяют.

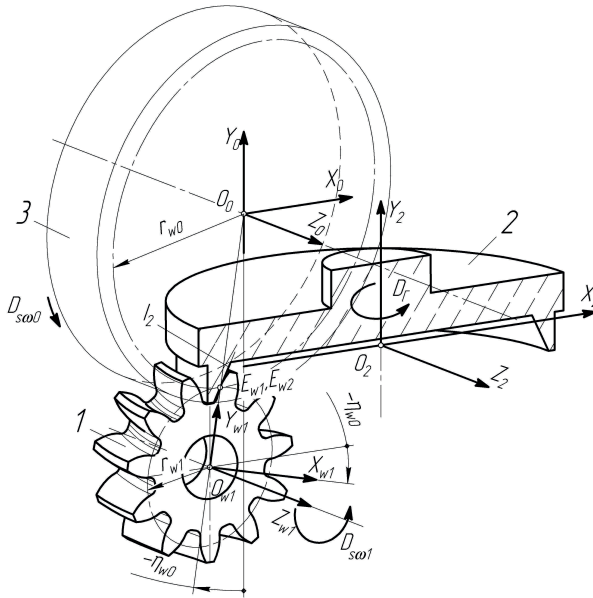


Рис. 1. Схема установки инструмента и заготовки шестерни в станочном зацеплении

Варьируя значения радиуса  $r_{w0}$  начальной окружности производящего колеса или же его числа зубьев  $z_0$ , можно добиться требуемой величины профильной модификации [3]. Зубья колеса передачи формируются за счет его обката по производящей рейке, а значит, имеют в среднем торцовом сечении немодифицированный эвольвентный профиль. Таким образом, локализация зоны касания по высоте зубьев осуществляется только путем модификации профиля зубьев шестерни.

Продольная модификация зубьев достигается за счет различия диаметров зуборезных головок, формирующих сопряженные стороны зубьев шестерни и колеса [4]. В результате сочетание продольной и профильной модификации позволяет получить зону касания требуемой длины и ширины.

Для определения величины профильной модификации зубьев необходимо знать координаты точек профиля модифицированного зуба, которые, в свою очередь, зави-

сят от параметров станочного зацепления. Для их расчета расположим систему координат инструмента  $S_2$  (см. рис. 1) таким образом, чтобы ось  $Y_2$  совместилась с осью вращения инструмента, а ось  $X_2$  прошла на расстоянии радиуса  $r_{a1}$  окружности вершин зубьев шестерни от оси вращения заготовки в момент пересечения ею оси симметрии профилирующей впадины производящего колеса. Ось  $Z_2$  будет параллельна оси вращения заготовки шестерни.

Начало системы координат  $S_0$ , связанной с производящим колесом, расположим в средней торцевой плоскости колеса на его оси. При этом оси координат  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  параллельны осям  $X_2$ ,  $Y_2$ ,  $Z_2$ .

Режущая кромка  $I_2$  инструмента в среднем торцовом сечении является образующей конической производящей поверхности, которая в процессе обработки формирует боковую поверхность  $U_1$  зуба шестерни (рис. 1, 2). Угловая координата точки  $E_{w2}$  пересечения прямой  $I_2$  и начальной окружности производящего колеса

$$\eta_{w0} = \frac{90^\circ \widehat{S}_{w0}}{\pi r_{w0}},$$

где  $\widehat{S}_{w0}$  — ширина впадины производящего колеса на окружности радиусом  $r_{w0}$ .

Исходное положение подвижной системы координат заготовки  $S_{w1}$  ( $X_{w1}Y_{w1}Z_{w1}$ ) показано на рис. 1, 2. Ее начало, точка  $O_{w1}$ , расположено в средней плоскости заготовки, ось  $Y_{w1}$  проходит через точку  $E_{w1}$  начальной окружности шестерни в момент формообразования боковой поверхности зуба в окрестности этой точки.

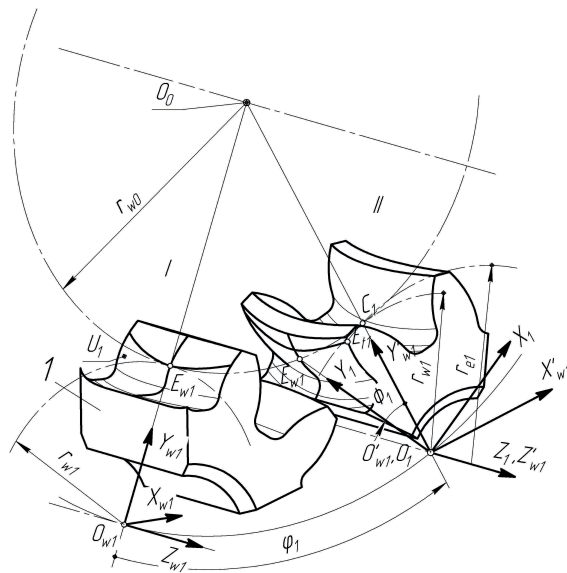


Рис. 2. Схема к определению углов поворота шестерни при обработке выпуклой стороны зуба

В процессе обработки после поворота шестерни на угол  $\phi_1$  вокруг оси производящего колеса и на угол  $\Phi_1$  вокруг своей оси она займет положение  $II$  (см. рис. 2). Система координат  $S_{w1}$  при этом преобразуется в систему  $S_1 (X_1 Y_1 Z_1)$ , а обработка зуба шестерни будет происходить в окрестности точки  $E_{t1}$  торцового сечения, лежащей на радиусе  $r_{e1}$ .

Номинальный радиус  $R_2$  режущей головки (рис. 3) определяет расстояние от оси вращения инструмента до точки  $A_1$  пересечения оси симметрии профиля зуба производящего колеса с его окружностью радиусом  $r_{w0}$ . Тогда положение оси  $O_0$  производящего колеса определится координатами

$$\begin{cases} x_0 = -R_2 - A_1 B_1 = -R_2 + r_{w0} \sin \frac{\pi}{z_0}, \\ y_0 = r_{w0} + r_{w1} - r_{a1}. \end{cases} \quad (1)$$

Координаты точки  $E_{w2}$  профиля зуба производящего колеса в системе координат инструмента

$$\begin{cases} x_{ew2} = x_0 - r_{w0} \sin \eta_{w0}, \\ y_{ew2} = y_0 - r_{w0} \cos \eta_{w0}. \end{cases}$$

Зададимся параметром  $\theta_2$  для фиксации точки  $E_{t2}$  торцового профиля  $I_{t2}$  зуба производящего колеса. Уравнения конической поверхности, формируемой внутренней режущей кромкой  $I_2$  инструмента,

$$\begin{cases} x_2 = -\rho_2 \cos \theta_2; \\ z_2 = \rho_2 \sin \theta_2, \end{cases}$$

где  $\rho_2$  — радиус-вектор точки внутренней режущей кромки.

Положим  $z_2 > 0$ . Проведем через точку  $E_{t2}$  нормаль к профилю  $I_{t2}$ , которая пересечет межосевую линию в точке  $C_1$  касания начальных окружностей шестерни и производящего колеса.

Координаты точки  $E_{t2}$  в системе  $S_2$  примут вид

$$\begin{cases} x_2 = -z_2 \operatorname{ctg} \theta_2; \\ y_2 = y_{ew2} - \left( \frac{z_2}{\sin \theta_2} + x_{ew2} \right) \operatorname{ctg} \alpha_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha_2 = \alpha_w + \eta_{w0}$  — угол профиля реза инструмента;  $\alpha_w$  — угол зацепления передачи.

Угол наклона касательной к торцовому профилю производящей поверхности  $\alpha_{t2} = \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \theta_2}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right)$ , угол  $\chi_1 = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_2 - x_0}{y_0 - y_2} \right)$ .

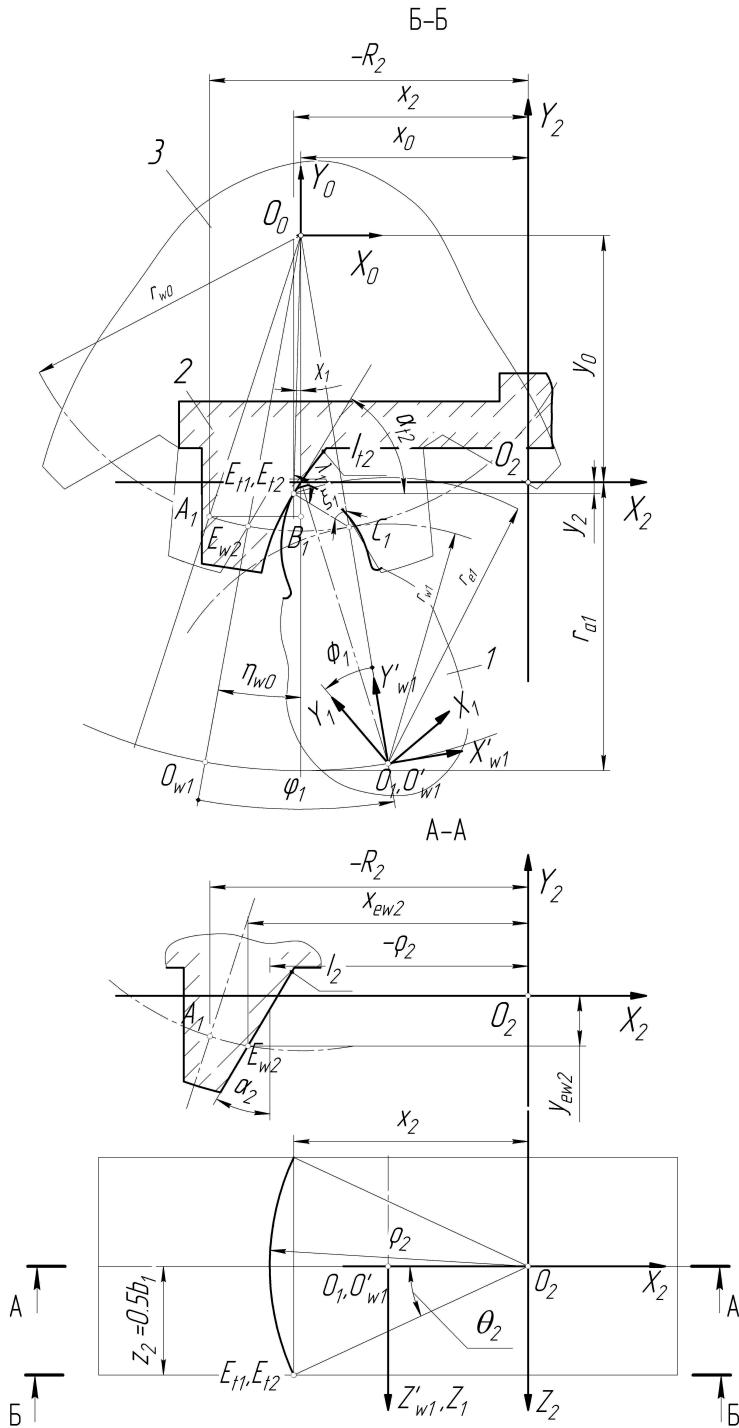


Рис. 3. Схема к расчету координат точек торцевого профиля зуба шестерни

В треугольнике  $O_0O_1E_{t2}$  (см. рис. 3) углы

$$\lambda_1 = \pi - \alpha_{t2} + \chi_1; \quad \xi_1 = \arcsin \frac{r_0 \sin(\pi - \lambda_1)}{r_{w0}}.$$

Пользуясь способом преобразования координат, описанным в монографии [5], и учитывая зависимости (1), (2), получим уравнения, связывающие координаты торцового профиля производящей поверхности в системе  $S_2$  с координатами профиля зуба шестерни в системе  $S_1$ ,

$$\begin{aligned}x_1 &= (x_2 + x_{O_0}) \cos \Psi_1 + (y_2 - y_{O_0}) \sin \Psi_1 + a_{w0} \sin \Phi_1, \\y_1 &= -(x_2 + x_{O_0}) \sin \Psi_1 + (y_2 - y_{O_0}) \cos \Psi_1 + a_{w0} \cos \Phi_1,\end{aligned}$$

где  $\Psi_1 = \Phi_1 + \varphi_1 + \eta_{w0}$ ;  $\Phi_1 = u_{01}\varphi_1$  — фаза станочного зацепления шестерни;  $\varphi_1 = \eta_{w0} + \alpha_{t2} - \xi_1$  — фаза станочного зацепления производящего колеса;  $u_{01} = z_0/z_1$  — передаточное число станочного зацепления.

### Литература

- [1] Сухоруков Ю.Н. *Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колес: справочник*. Киев, Техника, 1992, 197 с.
- [2] Брагин В.В., Решетов Д.Н. *Проектирование высоконапряженных цилиндрических зубчатых передач*. Москва, Машиностроение, 1991, 224 с.
- [3] Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Шейнин Г.М., Маликов А.А. *Способ обработки пары цилиндрических зубчатых колес. Пат. 2510789 Российская Федерация*. МПК В23F9/02, В23F9/08. Заявитель и патентообладатель Тульский гос. ун-т. № 2012136485/02; заявл. 24.08.12; опубл. 10.04.14, бюл. № 10, 5 с.
- [4] Ямников А.С., Бобков М.Н., Шейнин Г.М. Новый способ обработки круговых зубьев цилиндрических колес. *СТИН*, 2000, № 10, с. 18–20.
- [5] Литвин Ф.Л. *Теория зубчатых зацеплений*. Москва, Наука, 1968, 584 с.

УДК 658.511.3+65.015.22

## Быстрая переналадка станков с ЧПУ на авиазаводах

© Исаченко Алексей Сергеевич, Казимиров Денис Юрьевич

Россия, г. Иркутск, Иркутский национальный  
исследовательский технический университет

[isachenko.alexey.irk@gmail.com](mailto:isachenko.alexey.irk@gmail.com)

*Решена проблема снижения подготовительно-заключительного времени в инновационном широкономенклатурном производстве. Проанализированы особенности данного вида производства. Представлена процедура организации и внедрения системы быстрой переналадки, позволяющей значительно снизить время перехода на новое изделие.*



*Опыт внедрения быстрой переналадки был реализован на пятикоординатном фрезерном станке с ЧПУ DupaMill 3000 для производства неметаллической оснастки. Это дало эффект уменьшения времени перехода на новое изделие на 53 % исходного.*

**Ключевые слова:** быстрая переналадка, время переналадки станка, аналитические карты переналадки, хронометраж, временные события.

Авиационное производство характеризуется изготовлением деталей различных конструкций с однократным выпуском и частой сменой объекта производства на неспециализированных рабочих местах. Операция наладки обычно не регламентируется технологическим процессом.

Современные пятикоординатные станки с ЧПУ, входящие в состав участков цеха изготовления неметаллической оснастки, обладают длительным временем переналадки при смене объекта производства, что напрямую влияет на производственную мощность. Из этого следует, что одной из серьезных проблем в авиационном производстве является частая и длительная переналадка.

Теоретически при большой длительности переналадки станка имеет смысл производить продукцию крупными партиями, так как доля времени переналадки, входящая в подготовительно-заключительное время, во времени производства всей партии будет уменьшаться с увеличением объема партии  $n$  и стремиться к нулю, т. е.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{T_{пз}}{n} = 0,$$

где  $T_{пз}$  — подготовительно-заключительное время;  $n$  — объем партии.

Для рассматриваемого производства объем партии чаще всего принимает значения  $n = 1, 2$ . Следовательно, снизить долю времени переналадки во времени производства путем увеличения партии невозможно. Таким образом, следует уменьшить само время переналадки станка.

Одним из инструментов бережливого производства, произведших революцию в минимизации времени перехода на новое изделие, является быстрая переналадка (Single-Minute Exchange of Die, или SMED), представляющая собой набор теоретических и практических методов и позволяющая сократить время переналадки оборудования до нескольких минут.

Если переналадка выполняется за считанные минуты, как при применении системы SMED, то даже без увеличения объема партии отношение времени производства и времени перехода на новое изделие может стать максимально выгодным.

Концепции работы [1] и опыт, полученный при внедрении быстрой переналадки в цехе изготовления неметаллической оснастки, стали предпосылками к созданию процедуры организации и проведения мероприятий по внедрению SMED для достижения указанной задачи на авиационном производстве. Процедура включает следующие шаги:

1. Выбор станка.

Выбирают единицу оборудования для снижения времени переналадки.

2. Определение целевого времени переналадки.

Ставят задачу по снижению времени переналадки. Конкретное значение должно быть строго определено, например на 50 % при первом внедрении SMED.

3. Выбор членов команды.

Решают вопросы, связанные с персоналом.

4. Документация элементов и микроэлементов.

Документируют действительную последовательность и время выполнения элементов (укрупненных действий процесса переналадки) и микроэлементов (вспомогательных приемов и других отдельных действий, являющихся составными частями элементов) переналадки станка. Это может быть сделано с использованием видеосъемки.

Составляют диаграмму путей, пройденных оператором переналадки, целью которой является визуализация ненужных перемещений оператора во время переналадки. Основой для диаграммы путей являются чертеж рабочего места и план-схема участка. Перемещения оператора переналадки рисуют на нем непрерывной линией. Полученная схема носит название диаграммы «Спагетти».

5. Преобразование элементов и микроэлементов переналадки станка в визуальную форму.

Полученные данные об элементах и микроэлементах переналадки станка копируют из листа мониторинга в аналитическую карту с указанием степени их завершенности. Пометка «X» микроэлемента означает, что за этим микроэлементом идет следующий микроэлемент, а пометка «E» показывает последний микроэлемент.

6. Анализ элементов и микроэлементов переналадки станка.

Все микроэлементы распределяют на две категории — внутренние, которые могут выполняться только при остановленном оборудовании, и внешние, которые могут выполняться при работающем оборудовании. Внешние микроэлементы помечают курсивом, внутренние — нет.

Проверяют, не воспринимают какие-либо микроэлементы переналадки ошибочно как внутренние. Находятся способы преобразования этих микроэлементов во внешние. В аналитической карте такие микроэлементы переносят либо в начало действий по переналадке, либо в конец.

Разрабатывают и записывают предложения по улучшению отдельных микроэлементов, а также внутренние стандарты предприятия, затрагивающие процессы переналадки станков.

7. Немедленный повтор анализа элементов и микроэлементов.

Если целевое время переналадки, определенное в шаге 2, не было достигнуто, то немедленно повторяют анализ микроэлементов переналадки станка.

8. Применение полученных данных для подобных станков.

Следует посмотреть, можно ли применить полученную процедуру переналадки для других станков, имеющих сходную конструкцию. Необходимо рассмотреть возможность применения если не идентичной, то хотя бы похожей процедуры переналадки. Более того, даже на разных станках могут присутствовать сходные элементы, например одинаковые патроны, методы зажима и т. д., что позволяет использовать для них некоторые полученные результаты SMED. Это может сэкономить время внедрения SMED на станках, подобных выбранному.

9. Повтор внедрения SMED.

Снижение времени переналадки станка является повторяющимся процессом, поэтому необходимо проводить подобные мероприятия в цехе каждые шесть месяцев и, таким образом, приближаться к цели — «достижение времени переналадки станка за одну минуту» [2].

Для оценки целесообразности проведения мероприятий по SMED был выбран участок по производству неметаллической оснастки с пятикоординатным фрезерным станком Dynamill 3000, который переналаживали на обработку литейной модели. Целевым значением снижения времени переналадки решено было принять 50 % те-

кущего. Видеофайл с фотографией рабочего времени был проанализирован в режиме сквозного просмотра с целью определения укрупненных элементов переналадки.

В итоге выделены следующие действия процесса переналадки: подготовка заготовки и управляющей программы (УП), транспортировка, замена инструмента, настройка на ноль, подготовка базовой плоскости, установка заготовки, которые совершались в указанном порядке. В аналитической карте (см. табл.) эти элементы вписаны в шапку таблицы в колонки 2–7. Временные события указаны в последовательности выполнения сверху вниз и справа налево.

Все эти элементы изначально являлись внутренними элементами переналадки, т. е. выполнялись при остановленном станке. Заполнение ячеек таблицы осуществлялось после просмотра видеофайла в режиме стоп-паузы. В столбец каждого элемента были вписаны микроэлементы переналадки, включающие в себя их краткое описание, время выполнения и отметку об окончании укрупненного элемента. После заполнения всей аналитической карты получено визуальное представление действительной ситуации. Для сокращения информации представлены часть колонок и строк. Всего таблица содержит 20 строк.

Аналитическая карта

Элемент	Внешние элементы		Внутренние элементы			Внешние элементы
	1. Начальные действия	2. Подготовка заготовки и УП	3. Транспортировка	7. Установка заготовки	8. Конечные действия	
T, с	499	0	43	450	139	
Микроэлементы	<i>Взял документ, 5 с, X</i>					
	<i>Подождал к стеллажу, 10 с, X</i>					
	...					
	<i>Ушел к компьютеру, 17 с, X</i>					
	<i>Переписывает УП, 58 с, E</i>					
	<i>Катит тележку к стеллажу, 25 с, X</i>					
	<i>Поднимает тележку, 25 с, X</i>					
	...					
	<i>Отодвигает тумбу, 8 с, X</i>					
	<i>Катит к станку, 17 с, X</i>					
...						

Для операций над укрупненными элементами в шапку таблицы перед ними добавляют столбец 1 внешних начальных действий, а в конце — столбец 8 внешних конечных действий. Каждый выявленный микроэлемент рассматривают с точки зрения возможности выполнения при работающем станке. Если такая возможность существует, его помечают курсивом и рассматривают как внешний элемент переналадки, если нет — его не выделяют и он остается внутренним. Часть микроэлементов, сохраняющих свое положение в процедуре переналадки, для упрощения отображения в таблице пропускают и заменяют многоточием.

Ранее выделенные микроэлементы переносят либо в столбец 1 начальных действий, либо в столбец 8 конечных действий в зависимости от логики процесса выполнения переналадки. Их перемещение на аналитической карте обозначено стрелками. Если перемещаемые элементы идут последовательно, то для упрощения в

карте их перемещают блоками (выделены утолщенными линиями), а не отдельными микроэлементами. Так, из столбца 3 блок от «Катит тележку к стеллажу» до «Катит к станку» перенесен в укрупненный элемент 1. В результате удалось вывести 7 микроэлементов во внешнюю переналадку.

Расчет суммарного времени каждого элемента показал, что подготовительно-заключительное время после преобразования внутренних микроэлементов во внешние сокращается на 11 мин (31 %). Эту экономию времени можно значительно повысить посредством улучшения элементов и микроэлементов переналадки станка.

После преобразования внутренних микроэлементов во внешние были составлены возможные варианты улучшения элементов и микроэлементов переналадки станка. Выработаны следующие предложения, нацеленные на дополнительное снижение времени переналадки.

1. Часть времени оператор тратит на перенос инструмента: фрезы, сверла, центроискателя и ключа слесарного. Все эти перемещения можно устранить путем добавления держателя для инструмента с конусным хвостовиком HSK и лотка для слесарного инструмента на ручку телеги.

2. На видеофайле процесса переналадки замечено следующие недочеты:

2.1. Путь, который проделывает оператор с тележкой от стеллажа с заготовками до станка, имеет препятствия. Этого можно избежать, совершив некоторые перестановки на рабочем месте для освобождения пути согласно системе 5S.

2.2. Тележка для транспортировки заготовки была занята перед началом работы. Необходимо, чтобы все элементы предыдущего процесса производства были завершены и не мешали начальным действиям текущего процесса переналадки.

2.3. При закатывании тележки с заготовкой на станок оператору пришлось отодвинуть мешающую ему фрезерную голову. Этого можно избежать, если заранее освободить рабочее пространство станка.

3. Наибольшую часть времени переналадки занимает подготовка базовой плоскости и сверление базовых и крепежных отверстий в заготовке. Это время можно значительно сократить двумя способами: сверлением отверстий вне станка по шаблону вручную или же подготовкой базовой плоскости и сверлением отверстий на другом станке.

Внедрение всех данных предложений позволяет снизить время переналадки до 16,3 мин (53 % исходной). Данный результат обеспечивает целевое время, поэтому проводить немедленный повторный анализ (шаг 7) нет необходимости.

Снижение времени переналадки оказывает положительное влияние на работу цеха: а) предприятие может производить продукцию мелкими партиями; б) уменьшаются количество оснастки и затраты на нее; в) снижается стоимость работ по переналадке (частично за счет часовой тарифной ставки оператора); г) увеличивается производительность оборудования за счет снижения излишней перегрузки и простоя. Все это позволяет производителю более гибко отвечать на запросы потребителей и выпускать продукцию своевременно.

## Литература

- [1] Kušar J., Berlec T., Zefan F., Starbek M. Reduction of Machine Setup Time. *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering*, 2010, vol. 56, no. 12, pp. 833–845.
- [2] Синго С. Быстрая переналадка: Революционная технология оптимизации производства / пер. с англ. Москва, Альпина Бизнес Букс, 2006, 344 с.

УДК 621.7.014.2

## **Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки**

© Кострюков Александр Андреевич<sup>1</sup>, Смолкина Татьяна Владимировна<sup>2</sup>,  
Косарев Илья Вячеславович<sup>2</sup>, Щедрин Алексей Владиславович<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Орехово-Зуево, ОАО «Демиковский машиностроительный завод»,

<sup>2</sup> Россия, г. Орехово-Зуево, ОАО «НПП “Респиратор”»,

<sup>3</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный  
машиностроительный университет (МАМИ)

[kos2607@gmail.com](mailto:kos2607@gmail.com), [ts76@list.ru](mailto:ts76@list.ru), [kaaoz@bk.ru](mailto:kaaoz@bk.ru)

*Предложен вариант системного структурно-параметрического анализа-синтеза инновационных методов обработки, разработана обобщенная структура метода обработки поверхности заготовки детали, что в совокупности является научной основой современных систем искусственного технологического интеллекта.*

**Ключевые слова:** метод обработки, структурно-параметрический анализ-синтез, система искусственного технологического интеллекта.

В настоящее время для эффективного решения непрерывно усложняющихся технологических задач и опережающего проектирования конкурентоспособных инновационных технологических объектов широко применяются системы искусственного технологического интеллекта. Одной из идеологических баз таких систем является структурно-параметрический анализ-синтез методов обработки, научные основы которого разработаны А.М. Кузнецовым и развиты его научной школой, насчитывающей более 60 специалистов высшей квалификации [1]. Введение понятия метода обработки поверхности заготовки детали позволило довести до логического завершения структуру производственных процессов применяемых в машиностроении, а также определить содержание соответствующих технологических операций. Дополнительно появляется возможность комплексного системного обобщения и упорядочения всего опыта технологии машиностроения как ведущей прикладной науки с позиций фундаментального физического явления технологическая наследственность методов механической, физической, химической и комбинированной обработки.

В перспективе общность структуры метода обработки позволяет распространить единые алгоритмические процедуры на синтез инновационных методов получения заготовок деталей, сборки, ремонта и восстановления, упрочнения и т. д.

Эффективность данного системного подхода иллюстрируется примерами структурно-параметрического синтеза высокоэффективных методов деформирующей и комбинированной обработки инструментами с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях применения современных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие эффекта безызносности при трении Гаркунова — Крагельского [2 – 5]. Другой пример эффективности — высококачественная подготовка

научных кадров технологов высшей квалификации ОАО «НПП “Респиратор”», входящем в холдинг «Технодинамика» госкорпорации «Ростех».

### Литература

- [1] Щедрин А.В. и др. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2009, № 4, с. 15–20.
- [2] Щедрин А.В. и др. Повышение эффективности комбинированной обработки отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхности рабочих элементов инструмента. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2009, № 6, с. 14–19.
- [3] Щедрин А.В. и др. Повышение качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011, № 8, с. 21–25.
- [4] Щедрин А.В. и др. Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов. *Вестник машиностроения*, 2012, № 9, с. 76–79.
- [5] Поляков А.О., Козлов А.Ю. Износу — нет, ученые укрощают силу трения. *Еженедельная газета научного сообщества «Поиск»*. 2012, № 49 (1227), с. 18.

УДК: 658.512

## Применение методов Lean Production при проектировании производственных линий как фактор повышения эффективности производства машиностроительного предприятия

© Фаттахов Хамит Ильдусович, Стяжкин Максим Николаевич,  
Мухутдинов Аглям Рашидович

Россия, г. Зеленодольск, ОАО «ПО “Завод имени Серго”»

[khamit.fattakhov@mail.ru](mailto:khamit.fattakhov@mail.ru), [St.maxim\\_1986@mail.ru](mailto:St.maxim_1986@mail.ru)

*Рассмотрена возможность применения принципов Lean Production как фактора повышения эффективности производства машиностроительного предприятия. Обоснована необходимость применения принципов Lean при проектировании производственных линий машиностроительного предприятия. Предложено оценивать проектные решения с точки зрения трех базовых принципов вытягивающей системы производственной логистики. Приводится практический пример применения комплекса мер по оптимизации существующего технологического решения с помощью методов Lean Production.*

**Ключевые слова:** *Lean Production, вытягивающая система, проектирование производственных линий, организация производства.*

В последние десятилетия Lean Production приобретает все бóльшую актуальность в промышленности, банковской сфере, социально-культурных областях и сфере услуг в России. Но отметить возрастающую роль концепции Lean в важной отрасли тяжелой промышленности — машиностроении, за счет которого формируется в среднем 15 % общего уровня ВВП России [1]. В связи с такими факторами, как невысокое качество выпускаемой продукции по сравнению с ведущими мировыми производителями, физический и моральный износ основных производственных фондов, нехватка средств на обновление оборудования, Lean Production входит в число основных методов повышения эффективности производства и снижения себестоимости продукции без существенных затрат [2].

В общем случае Lean Production можно определить как интегрированный набор инструментов организации производства, называемых Just-in-time, Kaizen, TQM (всеобщее управление качеством), TPM (всеобщее обслуживание оборудования), а также набор методов управления персоналом, включая бригадную организацию труда и вовлечение работников в принятие решений [3].

Наряду с отмеченными методами одним из важнейших инструментов Lean Production является вытягивающая система логистики. Вытягивающая система предполагает сохранение заранее определенного уровня запасов на каждом этапе производства и движение производственного заказа от одного участка к другому при выполнении заказа максимально быстро. Планирование в такой вытягивающей системе производства осуществляется только в задающем ритм процессе. Таким образом, изготавливается только та продукция, которая реально нужна, и только тогда, когда в этом возникает необходимость, что позволяет адекватно реагировать на запросы рынка и сглаживать конфликты интересов в производственной системе предприятия [4].

Архаичные технологические решения на отечественных предприятиях неукоснительно тормозят, а зачастую и делают невозможным, комплексное внедрение инструментов Lean, в частности вытягивающей системы логистики, что снижает эффективность производственного процесса и производительность труда и приводит к несанкционированному росту себестоимости продукции. В связи с этим крайне важным является соблюдение принципов вытягивающей системы производственной логистики на стадии проектирования производственных линий, что позволит заложить основы Lean на стадии разработки технологической документации.

Вытягивающая система базируется на трех основополагающих принципах:

1. Частые поставки комплектующих изделий и материалов мелкими партиями.
2. Комплексная визуализация уровня незавершенной продукции.
3. Своевременное удовлетворение запросов потребителя.

Реализация принципов системы вытягивания в данной статье рассматривается на примере Центра специального машиностроения по производству специзделий, формируемого на базе ОАО «ПО «Завод имени Серго»» (г. Зеленодольск), во исполнение программы реструктуризации на среднесрочный период, разработанной ГК «Ростех» в исполнении поручения Правительства Российской Федерации.

Экспертами компании различных направлений и специализаций проводится углубленный анализ планировки, технического задания производства продукции и автоматизированного складирования изделий на предмет соответствия принципам вытягивающей системы (табл. 1, рис. 1).

Основные результаты реализации принципов вытягивающей системы в рамках проектирования Центра специального машиностроения представлены ниже (рис. 2, 3, табл. 2).

Классификация основных принципов вытягивающей системы

№ п/п	Основные принципы вытягивающей системы	Эффект от реализации принципа	Применяемые инструменты
1	Частые поставки комплектующих мелкими партиями	Минимизация уровня незавершенной продукции; повышение производительности	Диаграмма «Спагетти»; SMED (быстрая переналадка)
2	Визуализация межпроизводственных запасов	Интенсификация производственного процесса; повышение производительности труда	FIFO («первый пришел — первый ушел»); реализация принципа «супермаркет»
3	Своевременное удовлетворение запросов потребителя	Выравнивание производственного цикла; сокращение количества и времени простоев; своевременное выполнение заказа	Диаграмма Ямадзуми; SMED (быстрая переналадка)

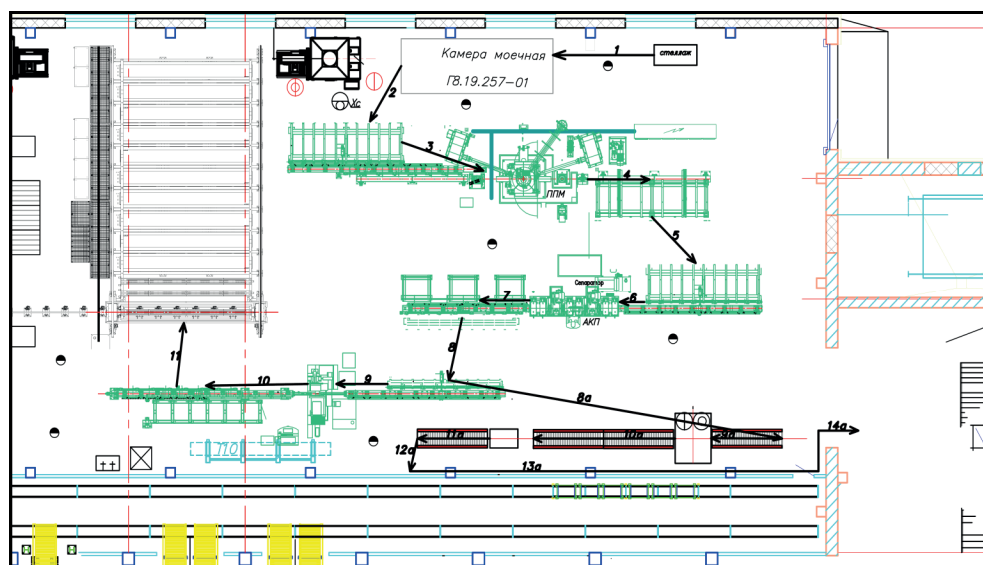


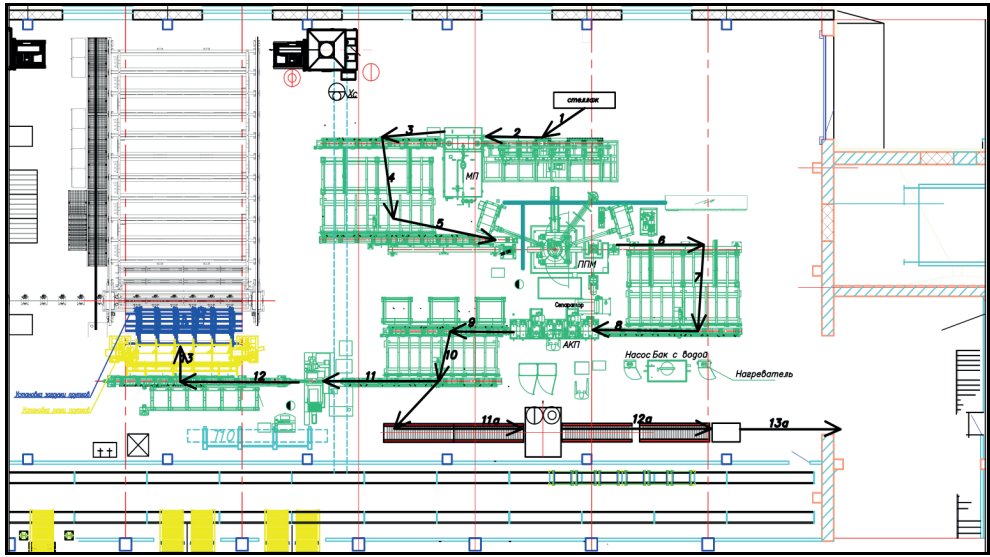
Рис. 1. Диаграмма «Спагетти» производства и системы межоперационной транспортировки изделий (первоначальный вариант)

При оптимизации планировочного решения производства и системы межоперационной транспортировки изделий были достигнуты следующие результаты:

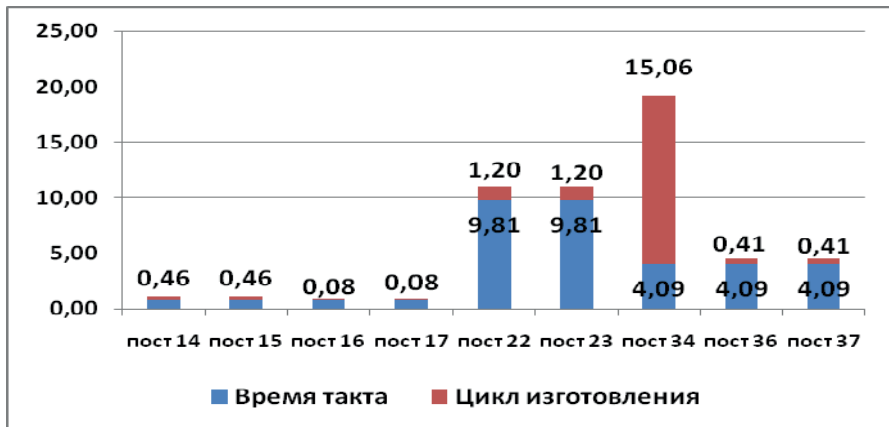
1. Осуществлена оптимизация трудовых ресурсов в количестве 5 человек.
2. Достигнуто снижение трудоемкости в 3 раза.
3. В целях «расширения» потенциального «узкого места» за счет изменения метода обработки изделия, было интенсифицировано выполнение ряда технологических операций (до оптимизации обработка 30 изделий занимала 60 минут, после оптимизации — 30 минут).
4. В рамках завершающего цикла производственного процесса достигнуто повышение производительности оборудования в 2 раза.



## A1. Металлорежущие станки



**Рис. 2.** Диаграмма «Спагетти» производства и системы межоперационной транспортировки изделий (оптимизированное планировочное решение)



**Рис. 3.** Диаграмма Ямадзуми, отражающая результаты проведенной оценки соотношения производительности со временем такта производства в разрезе «узких мест»

Формирование табл. 2 по заданному алгоритму позволило провести комплексную оценку существующего производственного цикла в разрезе каждой единицы оборудования, сопоставить полученные данные с временем такта и выявить потенциальные «узкие места» с последующим формированием комплекса мер, направленных на их ликвидацию и, как следствие, возможностью адекватного реагирования на запросы рынка, с полным обеспечением потребности заказчика.

Разработанный комплекс мероприятий по устранению «узких мест» включает:

- в рамках постов № 14, 15, 16, 17 — диверсификацию производственной линии со сбалансированным перераспределением производственных мощностей между единицами оборудования;
- в рамках постов № 22, 23, 34 — исключение операции «шлифовка» в разрезе определенных изделий, что позволяет подстроиться под заданное время такта;
- в рамках постов № 36, 37 — программное обеспечение принципа FIFO.

Таблица 2

Сопоставление производительности с временем такта производства

Пост №	Детали	Объем производства в год (млн шт.)	Объем производства в день (шт.)	Доступное рабочее время в день (с)	Производительность (шт./ч)	Цикл изготовления (с/шт.)	Такт производства (с)
1	1, 2, 3	2,5	9 470	51 600	1 500	2,4	4,90
2	9, 10/2, 16, 7, 15	2,5	9 470	51 600	1 500	2,4	4,90
9	7, 15	1	3 788	51 600	1 800	2	12,26
10	7, 14	1	3 788	51 600	1 800	2	12,26
11	8, 10	1	3 788	51 600	720	5	12,26
12	9, 11, 15	1,5	5 682	51 600	2 500	1,44	8,17
13	Не включается		0	51 600	2 500	1,44	
14	Все	16,6	62 879	51 600	3 000	1,2	0,74
15	Все	16,6	62 879	51 600	3 000	1,2	0,74
16	Все	15	56 818	51 600	4 000	0,9	0,82
17	Все	15	56 818	51 600	4 000	0,9	0,82
18	Не включается		0	51 600	60	60	
19	9, 16	1,25	4 735	51 600	800	4,5	9,81
20	9, 10/2, 16	0,625	2 367	51 600	188	19,15	19,62
22	8, 9, 10, 16	1,25	4 735	51 600	327	11,01	9,81
23	8, 9, 10, 16	1,25	4 735	51 600	327	11,01	9,81
24	8, 10	0,625	2 367	51 600	188	19,15	19,62
25	8, 10	0,625	2 367	51 600	188	19,15	19,62
31	8, 10	1	3 788	51 600	700	5,14	12,26
32	9, 10/2	1	3 788	51 600	700	5,14	12,26
33	17	0,5	1 894	51 600	154	23,38	24,52
34	8, 9, 10, 10/2, 16, 17	3	11 364	51 600	188	19,15	4,09
35	16	0,5	1 894	51 600	188	19,15	24,52
36	Все	3	11 364	51 600	800	4,5	4,09
37	Все	3	11 364	51 600	800	4,5	4,09

В заключение следует отметить, что соблюдение принципов вытягивающей системы на стадии проектирования производственной линии в дальнейшем позволит существенно повысить производительность труда, увеличить оборачиваемость ресурсов, снизить уровень незавершенного производства и товарных запасов, сократить производственные площади и затраты на транспортировку и складирование, улуч-

шить качество выпускаемой продукции и повысить уровень конкурентоспособности без значительных капитальных вложений.

**Литература**

- [1] Абросимова А.А., Барцев И.А. Опыт внедрения бережливого производства в машиностроении на примере ОАО «Заволжский моторный завод. *Российское предпринимательство*, 2013, № 2 (224), с. 73–78.
- [2] Булей Н.В. Анализ современного состояния и перспективы развития отрасли машиностроения // <http://www.e-rej.ru/Articles/2007/Buley.pdf> 01.06.2015 г.
- [3] Талалай А.М. Lean Production — полезный инструмент для ISO 9001:2000 и ISO/TS 1949:2002. *Q-мир*, 2006, № 2 (12).
- [4] Фаттахов Х.И., Мингалеев Г.Ф. Организация вытягивающей системы планирования поставки покупных и комплектующих изделий для сборочных цехов промышленных предприятий. *Вестник УГУЭС. Наука, образование, экономика*, 2013, № 4 (6).

УДК 621.91.01

## Снижение технологической себестоимости и обеспечение высотных параметров шероховатости поверхности при токарной обработке

© Акинъшин Руслан Николаевич

Россия, г. Королев, ЗАО «Завод экспериментального машиностроения»  
Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева

[ruller003@mail.ru](mailto:ruller003@mail.ru)

*Рассмотрены проблемы лезвийной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов, обоснована актуальность их решения для современного машиностроительного производства. Предложен подход к выбору режима резания, материала и геометрии режущего инструмента при точении, позволяющий обеспечить требуемые значения параметров шероховатости поверхности (среднего арифметического отклонения профиля Ra и высоты неровностей профиля по десяти точкам Rz) и снизить технологическую себестоимость токарной обработки за счет уменьшения основного времени обработки и повышения стойкости инструмента.*

**Ключевые слова:** токарная обработка, технологическая себестоимость, параметры шероховатости поверхности, рациональная скорость резания.

Широко используемые в машиностроении различные материалы (жаропрочные, жаростойкие, коррозионно-стойкие, высокопрочные, магнитные и т. п.) характеризуются специфическими физическими, химическими и другими свойствами и являются труднообрабатываемыми. Несмотря на тенденции повышения точности заготовительных методов (литья, обработки давлением, порошковой металлургии) и развития электро-физико-химических, лазерных, гидроабразивных методов обработки, доля обработки резанием в технологическом процессе изготовления деталей по трудоемкости и производственным затратам составляет 40...60 % общих затрат [1].

Изучение методов лезвийной обработки ведется давно, и в настоящее время накоплен большой теоретический и экспериментальный материал в данной области. Тем не менее на машиностроительных предприятиях (особенно в единичном, мелко- и среднесерийном производстве) обработка заготовок выполняется с режимами резания, значительно отличающимися от оптимальных, а требуемые параметры качества

деталей, стойкость инструмента достигаются методом «проб и ошибок», что приводит к значительным материальным затратам при изготовлении деталей. Поэтому задача выбора рациональных условий лезвийной и, в частности, токарной обработки остается очень актуальной.

Целью данной работы является разработка методики снижения технологической себестоимости токарной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов при гарантированном обеспечении параметров шероховатости поверхности.

Технологическая себестоимость — себестоимость, которая включает в себя только затраты, связанные с выполнением технологического процесса [2]: стоимость исходной заготовки; заработную плату рабочих; затраты на силовую электроэнергию; затраты на вспомогательные материалы; затраты на режущий и мерительный инструмент, приспособления; затраты на эксплуатацию оборудования; затраты на содержание производственных площадей.

На основе анализа составляющих технологической себестоимости можно сделать вывод, что для ее снижения необходимо повышение производительности при обеспечении заданной стойкости режущего инструмента и параметров качества детали в соответствии с требованиями конструкторской документации.

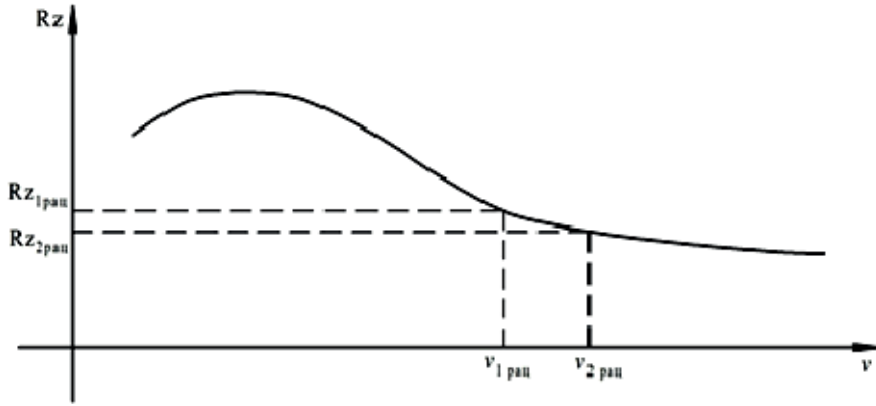
В данной работе из всего многообразия параметров, характеризующих качество поверхностного слоя детали, основное внимание уделено высотным параметрам шероховатости:  $Ra$  (среднее арифметическое отклонение профиля) и  $Rz$  (высота неровностей профиля по десяти точкам (ГОСТ 2789—73)), поскольку:

- они являются частью технических требований всех чертежей машиностроительных деталей и подлежат обязательному контролю;
- для них существуют доступные и надежные средства измерения;
- при изучении проблемы надежности машин установлено, что величина микронеровностей поверхности оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин: контактную жесткость, износостойкость, усталостную прочность, герметичность и коррозионную стойкость.

Предлагается осуществлять выбор условий резания по зависимости высотных параметров шероховатости обработанной поверхности  $Rz$  или  $Ra$  от скорости резания  $v$  (рис. 1). По мнению автора, предпочтительным диапазоном режима резания является интервал  $v_{1\text{рац}} - v_{2\text{рац}}$ , так как уменьшение скорости резания ниже значения  $v_{1\text{рац}}$  приводит к возрастанию значения  $Rz$  ( $Ra$ ), а увеличение скорости выше  $v_{2\text{рац}}$ , не дает существенного снижения параметра шероховатости. Следует отметить, что при различных глубине резания  $t$ , подаче  $S_o$ , геометрии инструмента ( $r$ ,  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\phi_1$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\lambda$ ) диапазон скоростей резания  $v_{1\text{рац}} \dots v_{2\text{рац}}$ , а также параметр шероховатости обработанной поверхности  $Rz_{\text{рац}}$  или  $Ra_{\text{рац}}$  (назовем ее «рациональной») будет меняться. Это значит, что, варьируя условия обработки, можно найти такие значения режима резания и геометрии инструмента, при которых «рациональная» величина шероховатости  $Rz_{\text{рац}}$  ( $Ra_{\text{рац}}$ ) будет равна значению, заданному на чертеже детали. Кроме того, автор считает, что указанный интервал режимов резания является предпочтительным и с точки зрения обеспечения максимальной стойкости инструмента. Тесная взаимосвязь параметров качества поверхностного слоя и стойкости инструмента была установлена профессором А.Д. Макаровым [3] и используется для оптимизации режимов резания в ряде работ [1, 4].

Таким образом, разрабатываемая методика повышения эффективности точения заготовок из труднообрабатываемых материалов заключается в определении множества режимов резания  $\{t_i, S_{oi}, v_i\}$ , при которых величина высотного параметра шеро-

ховатости обработанной поверхности  $Rz_{\text{рац}}$  ( $Ra_{\text{рац}}$ ) соответствует значению, заданному в конструкторской документации на рассматриваемую поверхность детали. Из полученного множества  $\{t_i, S_{oi}, v_i\}$ , удовлетворяющих принятому ограничению, выбираются такие  $(t_k, S_{ok}, v_k)$ , при которых основное время обработки  $t_{\text{осн}}$  минимально.



**Рис. 1.** Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности от скорости резания

Исходные данные для решения поставленной задачи:

- 1) физико-механические свойства обрабатываемого материала: предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_t$ , модуль упругости  $E$ , коэффициент Пуассона  $\mu$ ;
- 2) геометрия обрабатываемой поверхности: диаметр  $d$  и длина  $L$ ;
- 3) требуемое значение параметра шероховатости поверхности  $Rz_{\text{тр}}$  ( $Ra_{\text{тр}}$ ).

Проведенные рассуждения позволяют предложить следующий алгоритм выбора рациональных условий обработки:

1) назначение (или расчет) по существующим справочным данным, например, [5] или на основе опыта исполнителя значений глубины резания  $t_{\text{нач}}$ , подачи  $S_{o \text{ нач}}$  и диапазона изменения скорости резания  $v$ ;

2) выбор материала и геометрии режущего инструмента  $\{r, \rho, \phi, \phi_1, \gamma, \alpha, \lambda\}$ . Для поиска рационального режима резания предпочтительно выбирать несколько инструментов. По мнению автора, ориентировочное число инструментов, участвующих в расчете, не будет превышать 10, так как в действующем производстве их количество ограничено имеющейся номенклатурой, а в случае, если речь идет о заказе инструмента, то рекомендациями производителей инструмента или другой справочной информацией [5];

3) расчет зависимостей  $Rz$  или  $Ra$  от скорости резания  $v$  для принятых начальных значений глубины резания  $t_{\text{нач}}$ , подачи  $S_{o \text{ нач}}$ , материала и геометрии инструмента. Причем, предлагается использовать не только  $t_{\text{нач}}$  и  $S_{o \text{ нач}}$ , но и следующий ряд значений:  $0,50t_{\text{нач}}$ ;  $0,75t_{\text{нач}}$ ;  $1,25t_{\text{нач}}$ ;  $1,5t_{\text{нач}}$ ;  $0,50S_{o \text{ нач}}$ ;  $0,75S_{o \text{ нач}}$ ;  $1,25S_{o \text{ нач}}$ ;  $1,50S_{o \text{ нач}}$ . При построении зависимостей находится  $v_{\text{рац } i}$  и соответствующее ей  $Rz_{\text{рац } i}$  (или  $Ra_{\text{рац } i}$ ). Все рассчитанные значения должны сохраняться, чтобы исполнитель имел возможность их самостоятельного анализа по окончании вычислений;

4) полученные значения  $Rz_{\text{рац } i}$  (или  $Ra_{\text{рац } i}$ ) сравниваются с требуемым значением  $Rz_{\text{тр}}$  ( $Ra_{\text{тр}}$ ). Если выполняется условие:  $0,85Rz_{\text{тр}} \leq Rz_{\text{рац } i} \leq 1,15Rz_{\text{тр}}$ , то соответствующие  $v_{\text{рац } i}$ ,  $t_i$ ,  $S_{oi}$  и геометрия инструмента  $(r, \rho, \phi, \phi_1, \gamma, \alpha, \lambda)$  заносятся в отдельный

массив. В результате из всех возможных сочетаний режимов резания и геометрии инструментов формируется перечень значений, обеспечивающих требуемый параметр шероховатости поверхности;

5) для полученного множества «рациональных» условий обработки рассчитывается основное время по формуле

$$t_{\text{осн}} = L\pi d / (S_0 v)$$

и выбирается вариант с минимальным временем.

Таким образом, данная методика позволяет для точения конкретной поверхности назначить режущий инструмент, значения глубины резания, подачи и скорости резания, при которых обеспечивается заданный параметр качества поверхности и достигается минимальное основное время обработки, т.е. увеличивается производительность.

Отметим, что в результате выполнения алгоритма может быть не найдено ни одного решения. Это возможно в двух случаях:

1) все рассчитанные значения  $Rz_{\text{рац } i}$  (или  $Ra_{\text{рац } i}$ ) меньше требуемого по конструкторской документации (менее вероятный вариант);

2) все рассчитанные значения  $Rz_{\text{рац } i}$  (или  $Ra_{\text{рац } i}$ ) больше требуемого по конструкторской документации (более вероятный вариант).

Решать данную проблему необходимо следующим образом: изменить начальные значения глубины резания, подачи, диапазон скорости резания, использовать режущий инструмент с другой геометрией, и повторить расчет. В первом случае это должно, в конечном счете, привести к определению «рационального» параметра шероховатости при более высоких значениях режима резания, а во втором случае решение может быть не найдено. Это говорит о том, что принятый метод лезвийной обработки (точение) не может обеспечить требуемые параметры шероховатости поверхности, поэтому необходимо использовать другие технологические методы (абразивные, электро-физико-химические или методы поверхностно-пластического деформирования).

Используя предложенную методику, можно определять рациональные режимы резания для всего маршрута обработки поверхности. При выполнении расчетов для чистовой обработки поверхности используется значение параметра шероховатости, заданное на чертеже детали, а для промежуточных переходов назначаются значения параметров шероховатости в 2–3 раза превышающие значения на следующем переходе. Таким образом учитывается формирование параметра качества поверхности на протяжении всего процесса ее изготовления.

Для выбора рациональных условий обработки по рассмотренной методике необходимы математические зависимости, позволяющие рассчитывать высотные параметры шероховатости. Вычисление среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  и высоты неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$  можно осуществлять по формулам, приведенным в работах [6, 7].

Таким образом, в статье рассмотрен подход к выбору режима резания, материала и геометрии режущего инструмента при точении заготовок из труднообрабатываемых материалов, позволяющий обеспечить требуемые параметры шероховатости поверхности при снижении себестоимости обработки за счет уменьшения основного времени обработки и повышения стойкости инструмента.

## Литература

- [1] Касимов Л.Н. *Ресурсосберегающие технологии механической обработки труднообрабатываемых материалов*. Уфа: ООО «Дизайн ПолиграфСервис», 2003, 182 с.
- [2] Суслов А.Г., Дальский А.М. *Научные основы технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2002, 684 с.
- [3] Макаров А.Д. *Оптимизация процессов резания*. Москва, Машиностроение, 1976, 278 с.
- [4] Козлов В.А. *Структурно-параметрическая оптимизация точения материалов на основе математического моделирования процесса обработки*: Дис. ... д-ра техн. наук. Рыбинск, 1999, 444 с.
- [5] Гузев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. *Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник*. Москва, Машиностроение, 2005, 368 с.
- [6] Акиншин Р.Н. Расчет высотных параметров шероховатости поверхности при точении. *Науч. тр. III Междунар. науч. конф. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении»*. Москва, Издательский дом «Спектр», 2014, с. 8–10.
- [7] Акиншин Р.Н. Расчет составляющей профиля шероховатости поверхности, обусловленной пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки. *Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении — основа технологического развития России»*. Часть 1. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014, с. 19–24.

УДК 621.922

## Прогнозирование размера площадки затупления абразивного зерна для различных технологических условий

© Ардашев Дмитрий Валерьевич

Россия, г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)

[dva79@inbox.ru](mailto:dva79@inbox.ru)

*Основные показатели, определяющие работоспособность абразивного инструмента, — интенсивность и степень его затупления. При рассмотрении дискретного контакта шлифовального круга с обрабатываемой заготовкой в качестве такого параметра можно использовать размер площадки затупления. Предложена математическая модель площадки затупления абразивного зерна, в которой впервые учтены основные механизмы износа — механический и физико-химический. Механический износ анализируется с позиций кинетической теории прочности твердого тела, а физико-химический — с позиции теории массопереноса. Поскольку и механический и физико-химический износ абразивного зерна зависят от начальной площадки затупления, то в предложенной математической модели впервые учтена нелинейная обратная связь по размеру площадки затупления. Таким образом, математическая модель является многофакторной и позволяет прогнозировать величину износа абразивного инструмента для различных технологических условий.*



**Ключевые слова:** площадка затупления, износ абразивного зерна, кинетическая теория прочности, физико-химический износ.

В научной литературе достаточно подробно представлены различные виды износа абразивных зерен при шлифовании [1–9]. Во всех работах, освещающих эту проблему, описаны исследования того или иного механизма износа абразивного зерна в различных технологических условиях операции шлифования, выполненные теоретико-эмпирическими методами. Следует отметить, что в подавляющем большинстве научно-технической литературы механический и физико-химический износ абразивного зерна в процессах шлифования признаны основными, действующими при шлифовании большинства конструкционных легированных сталей и сплавов. Однако в настоящее время отсутствуют зависимости, позволяющие прогнозировать размер площадки затупления абразивного зерна в различных технологических условиях, в которых учтены разные механизмы изнашивания.

В общем виде модель износа абразивного зерна в процессах шлифования, учитывающая различные механизмы изнашивания, имеет вид

$$M_{a.з} = M_{a.з}^M + M_{a.з}^{\Phi-X}, \quad (1)$$

где  $M_{a.з}$  — объем части абразивного зерна, изношенной в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом;  $M_{a.з}^M$  — масса изношенной части абразивного зерна в результате механического взаимодействия с обрабатываемым материалом;  $M_{a.з}^{\Phi-X}$  — масса изношенной части абразивного зерна в результате физико-химического взаимодействия с обрабатываемым материалом.

Механическая составляющая износа абразивного зерна определена автором исходя из основных положений кинетической теории твердых тел [10], а физико-химический износ — с помощью теоретических и эмпирических исследований [1]. Автором статьи была получена формула для определения массы изношенной части абразивного зерна в результате действия механического и физико-химического износа:

$$M_{a.з} = \frac{60V_{\kappa} \rho_a w_{a.з}^M T \exp \frac{qM_m}{6\rho_a \cdot 10^{23} \sigma}}{2kT_i} + 0,08\rho_m \frac{m_d}{m} C_0 l_3^{3/2} D^{1/2} L_k V_k^{1/2} \frac{T}{D_{\kappa}} \cdot \quad (2)$$

$$n_{\kappa} \left( 1 + \frac{v_3}{60V_{\kappa}} \right) \sqrt{\frac{D_{\kappa} d_3 n_3}{D_{\kappa} + d_3} \frac{v_{\text{спал}}}{I_0} \left( i, \frac{qM_m}{6\rho_a \cdot 10^{23} \sigma} \right)}$$

Для определения размера площадки затупления абразивного зерна представим его в виде конуса. В результате геометрических преобразований получим, что размер площадки затупления зерна  $l_{zi}$  в каждый момент времени может быть определена по формуле

$$l_{zi} = 2\sqrt[3]{l_{zi-1} + \frac{3V}{\pi}} = 2\sqrt[3]{l_{zi-1} + \frac{3M_{a.з}}{\pi\rho_a}}, \quad (3)$$

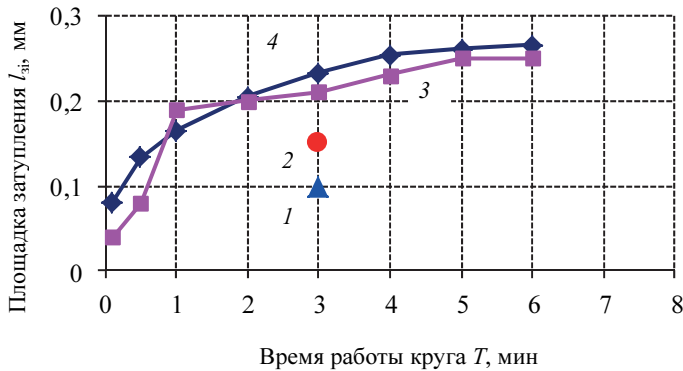
где  $V$  — объем абразивного материала, изношенного в результате взаимодействия с обрабатываемой заготовкой;  $l_{3i-1}$  — величина площадки затупления на абразивном зерне в каждый предыдущий момент времени.

Учитывая (2) получаем математическую зависимость для определения величины площадки затупления абразивного зерна в любой момент времени его взаимодействия с обрабатываемым материалом:

$$l_{3i} = 2 \left( l_{3i-1} + \frac{180V_{\kappa} w_{a.3}^M T \exp \left[ \frac{qM_m \sigma}{12kT_i \rho_a \cdot 10^{23}} \right]}{n_{\kappa} \left( 1 + \frac{v_3}{60V_{\kappa}} \right) \sqrt{v_{\text{спрад}} \frac{D_{\kappa} d_3 n_3}{(D_{\kappa} + d_3)}} \cdot I_0 \left( i, \frac{qM_m \sigma}{12kT_i \rho_a \cdot 10^{23}} \right) \pi + \frac{0,24C_0 l_{3i-1}^{3/2} D_{\text{сп}}^{1/2} L_{\kappa} V_{\kappa}^{1/2} \rho_m m_d T}{D_{\kappa} m \rho_a}} \right)^{1/3} . (4)$$

Зависимости размера площадки затупления, полученные по формуле (4), которые рассчитаны для начального периода работы инструмента, а также данные других исследователей, приведены на рисунке.

Разработанная математическая модель определения величины площадки затупления абразивного зерна в различных технологических условиях является рекурсивной (учитывает обратную нелинейную связь по размеру площадки); многофакторной (учитывает технологические условия выполнения операции шлифования, время работы инструмента и другие параметры); комплексной (учитывает различные механизмы протекания износа абразивного зерна).



**Рис. 1.** Зависимость размера площадки затупления от времени работы круга: 1 — по данным [11]; 2 — по [12]; 3 — по данным (эксперимент) [13]; 4 — полученные по формуле (4)

Полученные размеры площадки затупления свидетельствуют об адекватности модели (4).

Расчет площадки затупления в зависимости от технологических условий, в которых эксплуатируется абразивный инструмент, позволяет прогнозировать значения его эксплуатационных показателей.

## Литература

- [1] Лолодзе Т.Н. *Прочность и износостойкость режущего инструмента*. Москва, Машиностроение, 1982, 320 с.
- [2] Филимонов Л.Н. *Стойкость шлифовальных кругов*. Ленинград, Машиностроение, 1973, 134 с.
- [3] Мишнаевский Л.Л. *Износ шлифовальных кругов*. Киев, Наукова думка, 1982, 192 с.
- [4] Маслов Е.Н. *Теория шлифования материалов*. Москва, Машиностроение, 1974, 320 с.
- [5] Носенко В.А., Даниленко М.В. Вероятности видов изнашивания вершин зерен круга и их зависимость от силы контактного взаимодействия и твердости абразивного инструмента. *Известия ВолгГТУ*, 2009, т. 8, № 5, с. 20–23.
- [6] Yossifon S., Rubenstein C. Wheel wear when grinding workpieces exhibiting high adhesion. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1982, vol. 22, pp. 159–176.
- [7] Deutsch S.J. Analysis of mechanical wear during grinding by empirical-stochastic models. *Wear*, 1974, vol. 29, pp. 247–257.
- [8] Neugebauer R. Hess K.-U., Gleich S., Pop S. Reducing tool wear in abrasive cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1120–1123.
- [9] Hitchiner M.P., Wilks J. Some remarks on the chemical wear of diamond and cubic BN during turning and grinding. *Wear*. 1987, vol. 114, pp. 327–338.
- [10] Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. *Кинетическая теория прочности твердых тел*. Москва, Наука, 1974, 560 с.
- [11] Корчак С.Н. *Производительность процесса шлифования стальных деталей*. Москва, Машиностроение, 1974, 280 с.
- [12] Маталин А.А. Механизм работы абразивного зерна. *Основные вопросы высокопроизводительного шлифования*. Москва, Машгиз, 1960, 56 с.
- [13] Dyakonov A.A. Simulated stochastic thermo-physical model of grinding process / A.A. Dyakonov. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2014, vol. 2, pp. 914–917.

УДК 621.91.01

## **К разработке методики расчета силовых параметров фрезерования на основе аналитической модели косоугольного резания**

© Леквешвили Мария Анатольевна, Оленин Леонид Дмитриевич

Россия, г. Москва, Университет машиностроения (МАМИ)

[olenin003@mail.ru](mailto:olenin003@mail.ru)

*Представлены результаты анализа режимов резания при фрезеровании концевой фрезой с боковым винтовым зубом. При исследовании использована методика расчета технологических сил, разработанная на основе аналитической модели косоугольного резания. Приведено сравнение результатов анализа с данными, полученными экспериментально.*

**Ключевые слова:** аналитическая модель, косоугольное резание, концевая фреза, режимы резания.

В современном машиностроении непрерывно разрабатываются материалы с новыми механическими характеристиками. Когда проблема создания материалов решена, возникают проблемы его обработки, в том числе резанием [1]. Для этого проектируется новый более высокостойкий и эффективный инструмент. Эффективность обработки обеспечивается применением новых инструментальных материалов, износостойких покрытий и оптимизацией геометрии режущего инструмента.

В сложившейся практике, несмотря на очевидные успехи в использовании высокопроизводительных вычислительных программ и средств, оптимальная геометрия режущего инструмента отрабатывается опытным путем. Для этого проводится множество экспериментов. Это надежный подход, позволяющий получить ответы практически на все вопросы, но является трудоемким и дорогостоящим. Снизить затраты можно, если на начальном этапе проектирования спрогнозировать оптимальную геометрию инструмента и режимы резания [2]. Это возможно, если использовать аналитическую методику расчета, основанную на физических уравнениях, полученных на основе анализа механики резания. Создание такой модели является актуальной научной и практической задачей.

В работе использована аналитическая модель косоугольного резания острозаточенным инструментом, разработанная в Университете машиностроения (МАМИ) на кафедре АССИ. Модель получена на основе энергетического метода анализа. Процесс резания рассмотрен как процесс непрерывного пластического деформирования материала, обладающего деформационным упрочнением. В отличие от известных, модель учитывает работу разрушения, связанную с образованием новых поверхностей: обработанная поверхность и наружная поверхность стружки [3, 4].

Кроме этого, принято, что давление на контакте прямо пропорционально нормальному давлению, т. е. подчиняется закону Кулона — Амонтона. Считается, что трение не достигает предельного значения, так как при нормальном режиме резания отсутствует «налипание». Так называемая усадка стружки определяется аналитически, исходя из минимума давления резания, подводимого через переднюю поверхность.

В расчетах использована методика расчета силовых параметров резания концевой фрезой с наклонным боковым зубом, созданная на основе аналитической модели косоугольного резания. Методика учитывает геометрию режущих элементов концевой фрезы с боковым наклонным зубом.

Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными. Эксперименты проводились в Институте станков, Штутгарт (Германия) на трехосевом обрабатывающем центре фирмы Hermle. Для этого были изготовлены концевые фрезы с различной геометрией.

Режимы резания изменялись в следующих пределах: скорость резания  $v = 50 \dots 150$  м/мин, подача на зуб  $s_z = 0,05 \dots 0,15$  мм/зуб, глубина фрезерования  $t = 1 \dots 2$  мм. Для измерения силы использовался 4-компонентный динамометр Kistler, позволяющий измерять три составляющие силы резания и крутящий момент на шпинделе. Измерительная установка представлена на рис. 1.

Методика позволяет рассчитать окружную силу на зубе фрезы в зависимости от угла ее поворота. Установлено, что эпюра изменения расчетной окружной силы удовлетворительно совпадает с эпюрой, зарегистрированной в ходе эксперимента.

Таким образом, разработанную методику можно рекомендовать в качестве основы для разработки рабочих расчетных методик при конструировании вращающегося инструмента с наклонным с боковым зубом.

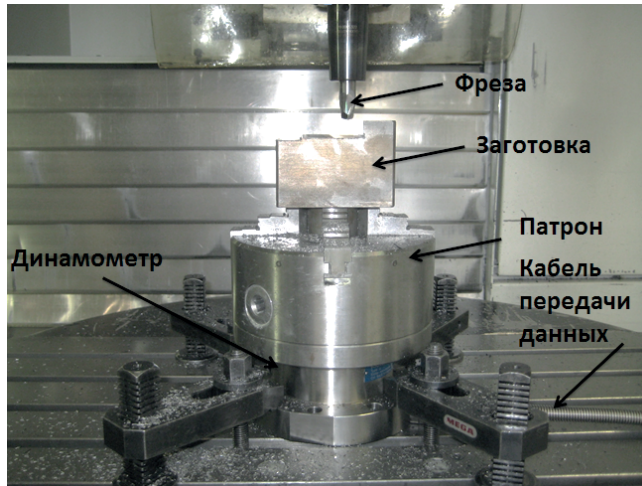


Рис. 1. Экспериментальная установка концевой фрезерования

### Литература

- [1] *Материалы II Всерос. науч.-техн. конф. «Роль фундаментальных исследований при реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.»*. Москва, ВИАМ, 2015.
- [2] Altintas Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge, Cambridge University Press, United Kingdom, 2012, p. 382.
- [3] Оленин Л.Д. К анализу механики резания упрочняемого материала. Стружкообразование. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2008, № 1 (2), с. 183–190.
- [4] Оленин Л.Д. К анализу механики резания цилиндрическим сверлом с перемычкой. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2011, № 2 (12), с. 180–188.

УДК 621.9

## Проектирование угловой фрезерной головки

© Новичков Александр Алексеевич, Савин Игорь Алексеевич

Россия, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, Набережночелнинский филиал Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева — КАИ

[classic694@mail.ru](mailto:classic694@mail.ru)

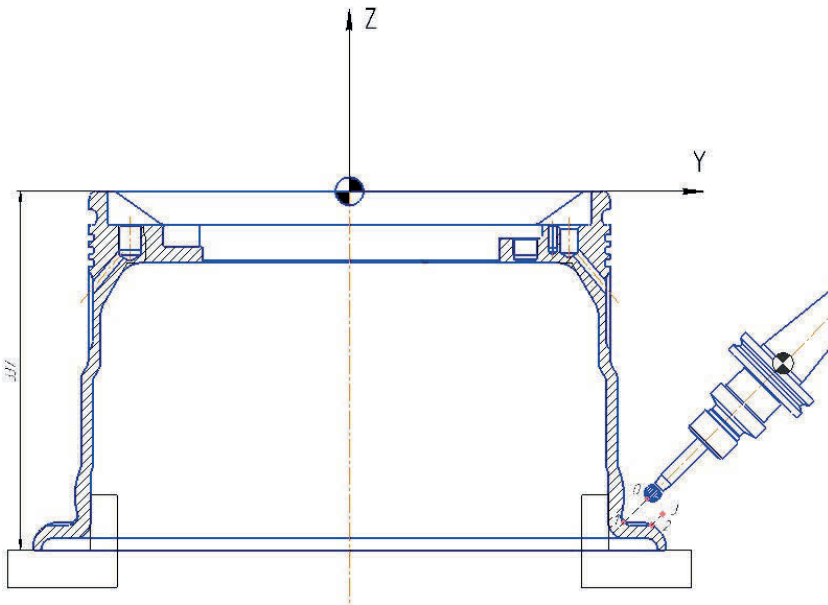
*Предложена спроектированная угловая фрезерная головка, способная обрабатывать труднодоступные поверхности. Выполнен анализ фрезерной головки на жесткость в программе Unigraphics 8.5. Предлагаемая головка должна увеличить*

точность и качество механической обработки, а также повысить производительность.

**Ключевые слова:** угловая фрезерная головка, программа Unigraphics, жесткость.

Фрезерные угловые головки позволяют значительно снизить время обработки за счет уменьшения числа переустановок детали. Угловые головки являются неотъемлемой частью металлообрабатывающего оборудования и обеспечивают значительное повышение его производительности, что является необходимым условием для успешной конкуренции во всем мире.

Угловые фрезерные головки обеспечивают возможность обработки детали под углом по отношению к оси шпинделя станка (рис. 1).



**Рис. 1.** Пример обработки с использованием угловой головки

Предлагаемая фрезерная головка предназначена для вертикальных и горизонтальных видов обработки. Применение данной головки позволит сократить число установок, повысить точность обработки, так как фрезерование будет проходить за один установ детали. Все это в целом обеспечит повышение производительности операций и позволит более эффективно использовать оборудование.

Конструкция фрезерной головки с корпусом из чугуна представлена на рис. 2.

Головка выполнена с использованием посадочного конуса BT-50 и может работать в диапазоне скоростей 50...2000 об/мин.

Головка имеет возможность изменять углы поворота частей головки для достижения требуемого угла шпинделя, указанного в таблице.

Для проверки головки на сопротивление нагрузкам сил резания необходимо провести расчет на жесткость.

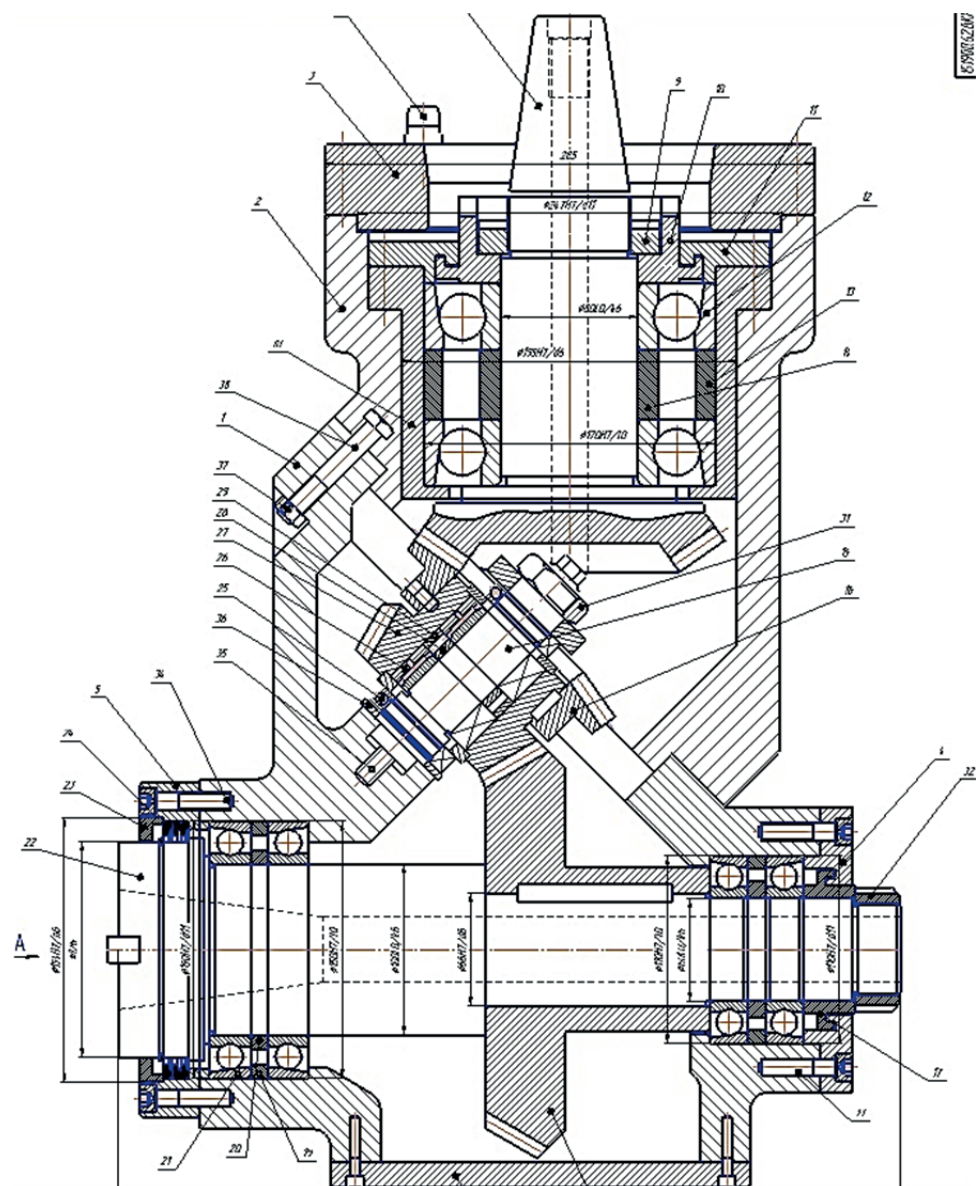


Рис. 2. Конструкция фрезерной головки

“А” требуемый угол наклона шпинделя	Установка фрезерной головки по шкале 1	Установка фрезерной головки по шкале 2	“А” требуемый угол наклона шпинделя	Установка фрезерной головки по шкале 1	Установка фрезерной головки по шкале 2
1°	1°24'51"	0°30'00"	46°	67°05'17"	25°07'03"
2°	2°49'43"	1 00'00"	47°	68°39'15"	25°46'24"
3°	4°14'35"	1°30'02"	48°	70°13'44"	26°26'17"
4°	5°39'29"	2°00'05"	49°	71°48'47"	27°06'42"
5°	7°04'24"	2°30'09"	50°	73°24'24"	27°47'42"
6°	8°29'21"	3°00'15"	51°	75°00'38"	28°28'17"
7°	9°54'20"	3°30'24"	52°	76°37'30"	29°11'30"
8°	11°19'22"	4°00'35"	53°	78°15'02"	29°54'22"
9°	12°44'28"	4°30'50"	54°	79°53'17"	30°37'56"
10°	14°09'37"	5°01'09"	55°	81°32'17"	31°22'13"
11°	15°35'50"	5°31'32"	56°	83°12'04"	32°07'16"
12°	17°00'08"	6°01'59"	57°	84°52'40"	32°53'06"
13°	18°25'28"	6°32'32"	58°	86°34'10"	33°39'47"
14°	19°50'56"	7°03'10"	59°	88°16'35"	34°27'22"
15°	21°16'29"	7°33'54"	60°	90°	35°15'51.8"
16°	22°42'08"	8°04'45"	61°	91°44'28"	36°05'21"
17°	24°07'54"	8°35'42"	62°	93°30'02"	36°55'54"
18°	25°33'46"	9°06'47"	63°	95°17'47"	37°47'33"
19°	26°59'46"	9°38'00"	64°	97°04'48"	38°40'21"
20°	28°25'54"	10°09'21"	65°	98°54'11"	39°34'25"
21°	29°52'11"	10°40'51"	66°	100°45'01"	40°29'49"
22°	31°18'36"	11°12'31"	67°	102°07'23"	41°26'38"
23°	32°45'12"	11°44'20"	68°	104°31'26"	42°24'57"
24°	34°11'56"	12°18'20"	69°	106°27'18"	43°24'55"
25°	35°38'52"	12°48'31"	70°	108°25'08"	44°26'37"
26°	37°05'58"	13°20'53"	71°	110°25'04"	45°30'13"
27°	38°33'17"	13°53'28"	72°	112°27'20"	46°35'50"
28°	40°00'48"	14°26'15"	73°	114°32'08"	47°43'41"
29°	41°28'32"	14°59'17"	74°	116°39'43"	48°53'57"
30°	42°56'29"	15°32'32"	75°	118°30'23"	50°05'52"
31°	44°24'41"	16°06'02"	76°	121°04'29"	51°22'41"
32°	45°53'07"	16°39'48"	77°	123°22'25"	52°41'47"
33°	47°21'50"	17°13'49"	78°	125°44'42"	54°04'30"
34°	48°50'48"	17°48'08"	79°	128°44'53"	55°31'17"
35°	50°20'04"	18°22'44"	80°	130°44'45"	57°02'43"
36°	51°49'38"	18°57'38"	81°	133°24'12"	58°39'30"
37°	53°19'31"	19°32'52"	82°	136°11'28"	60°22'33"
38°	54°49'44"	20°08'27"	83°	139°08'09"	62°13'04"
39°	56°20'17"	20°44'22"	84°	142°16'26"	64°12'40"
40°	57°51'12"	21°20'39"	85°	145°39'30"	66°23'44"
41°	59°22'30"	21°57'20"	86°	149°22'17"	68°49'50"
42°	60°54'10"	22°34'23"	87°	153°33'02"	71°36'58"
43°	62°54'10"	23°11'52"	88°	158°27'58"	74°56'51"
44°	63°58'50"	23°49'48"	89°	164°49'02"	79°49'34"
45°	65°31'49"	24°28'11"	90°	180°	90°

Анализ жесткости шпинделя выполнен в программе Unigraphics 8.5, с помощью модуля NX Nastran (инструмент для проведения компьютерного инженерного анализа (CAE) проектируемых изделий), который позволяет решать большинство расчетных задач при создании изделия. NX Nastran обеспечивает анализ напряжений и разрушений, вибраций, усталости и долговечности, передачи тепла, шума/акустики и аэроупругости. Система NX Nastran обеспечивает интеграцию с большим числом CAE приложений.



Проверка на жесткость осуществляется в несколько этапов (рис. 3):

- 1) создание 3-мерной модели шпинделя фрезерной головки.
- 2) создание конечно-элементной сетки.
- 3) создание файла симуляции.
- 4) назначение опор (опоры вала – шейки под подшипники).
- 5) визуализация системой NX Nastran приложенных нагрузок и сдвигов после запуска решателя.

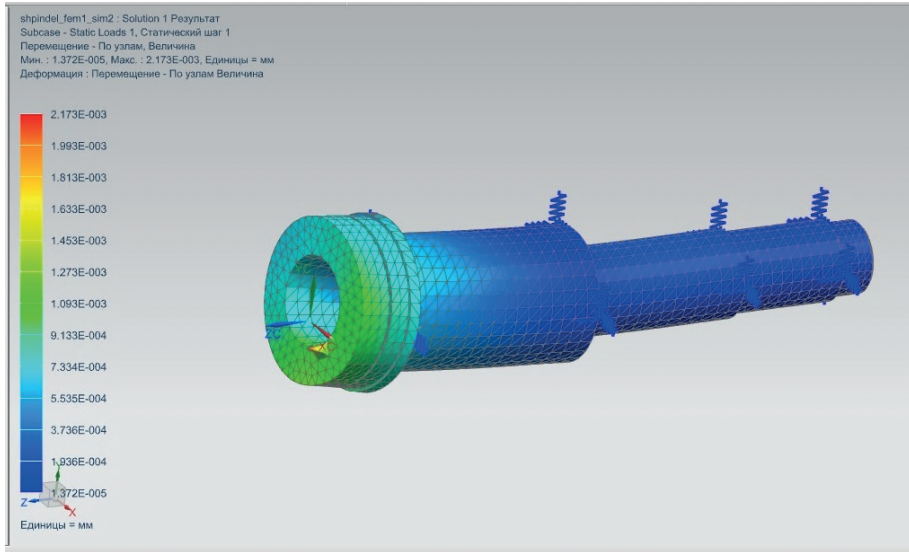


Рис. 3. Результат расчета на жесткость шпинделя

Максимальные сдвиги под воздействием сил резания составляют 0,003 мм, что меньше, чем допустимое радиальное биение шпинделя. Таким образом, вал проходит расчет на жесткость.

### Литература

- [1] Бабук В.А., Шкред В.А. *Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении*. Минск, Высшая школа, 1986, 168 с.
- [2] Горюшкин А.К. *Приспособления для металлорежущих станков*. Москва, Машиностроение, 1989, 132 с.
- [3] Федоренко В.А. *Справочник по машиностроительному черчению*. Ленинград, Машиностроение, 1979, 223 с.

## **Анализ зависимостей параметров постоянных магнитов и их установки на усилие вибрации при сверлении с наложением осевых колебаний**

© Сидорова Виктория Викторовна, Разумов Михаил Сергеевич,  
Гречухин Александр Николаевич, Емельянов Сергей Геннадьевич

Россия, г. Курск, Юго-Западный государственный университет

[victoriainoiapobeda@yandex.ru](mailto:victoriainoiapobeda@yandex.ru), [mika\\_1984@mail.ru](mailto:mika_1984@mail.ru), [Agrechuhin@mail.ru](mailto:Agrechuhin@mail.ru)

*Рассмотрен прогрессивный вид обработки резанием – вибрационное резание, предназначенный для формообразования глубоких отверстий малого диаметра в труднообрабатываемых металлах и сплавах на примере титана. Представлено описание конструкции устройства для вибрационного сверления, принцип его работы. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению влияния расстояния между магнитами на усилие вибраций.*

**Ключевые слова:** магнит, вибрационное резание, усилие вибраций.

Титан и его сплавы находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Сравнительно высокая стоимость титана и его сплавов компенсируется высокими эксплуатационными характеристиками металла, в некоторых случаях титановые сплавы являются единственным материалом, из которого можно изготовить работоспособную конструкцию.

Трудоемкость механической обработки титановых сплавов в 3–4 раза больше, чем для углеродистых сталей, и в 5–7 раз выше, чем для алюминиевых сплавов.

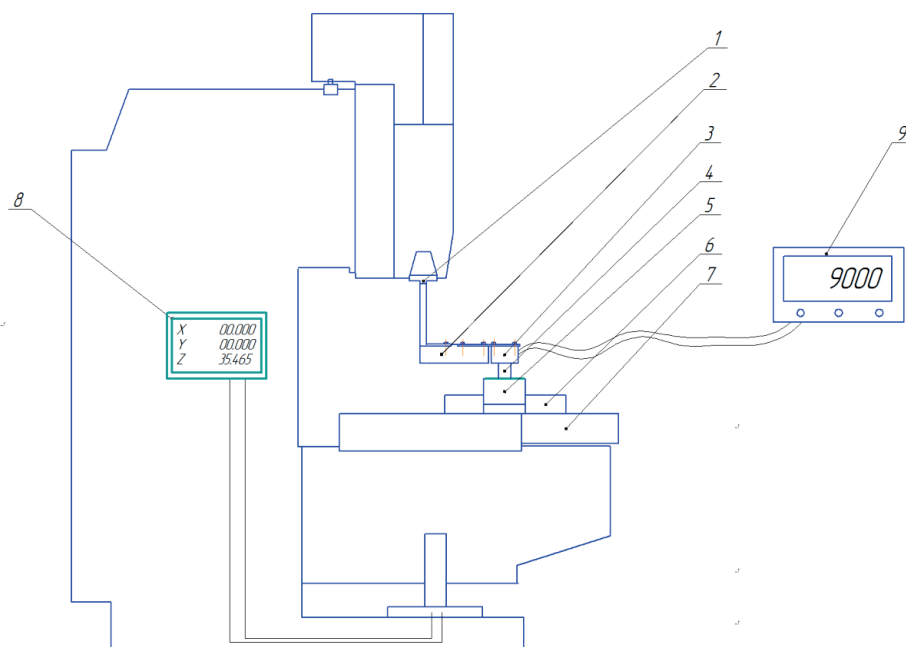
Для получения транспортабельной формы стружки в виде отдельных сегментов, колец, коротких завитков или сплошной пружины используют специальные способы стружкозавивания и стружколоманья. При сверлении имеет место значительное трение стружки о поверхность канавок сверла, трение стружки и сверла об обработанную поверхность [1]. Решением данной проблемы является сверление отверстий с наложением вибрационных колебаний на инструмент [2]. Такой способ сверления получил название – вибрационное резание. Он характеризуется тем, что инструменту наряду с основным вращательным движением сообщается колебательное движение относительно обрабатываемой заготовки. Его применяют для дробления стружки при обработке труднообрабатываемых материалов [3].

В настоящее время большое распространение получили механические и электромагнитные вибровозбудители, однако их сложная конструкция увеличивает себестоимость обработки. Применение вибрационного оборудования на основе постоянных магнитов позволит значительно снизить его себестоимость [4].

На кафедре «Машиностроительные технологии и оборудования» Юго-Западного государственного университета спроектировано устройство для реализации вибрационного сверления [5, 6].

Сущность изобретения заключается в том, что вибрации создаются за счет взаимодействия подвижных и неподвижных неодимовых магнитов, вследствие того, что при перемещении меняется полярность. С целью снижения затрат на производство данного вида устройств предлагается подвижную часть устройства выполнить из немагнитного материала с вставками из магнитного материала вместо неодимовых магнитов, что также создаст вибрации. Недостатком данной конструкции является снижение усилия вибраций.

Для определения зависимости силы постоянных магнитов от расстояния при вибрационном резании был проведен эксперимент. Схема установки для проведения экспериментальных исследований с целью определения усилий постоянных магнитов представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема установки для проведения экспериментальных исследований с целью определения усилий постоянных магнитов

Экспериментальные исследования заключались в том, что в патроне фрезерного станка был закреплен тензодатчик балочного типа. Данный датчик был предварительно откалиброван. К тензодатчику был подключен блок индикации, а на тензодатчике закреплены экспериментальные образцы магнитов. На станине фрезерного станка был закреплен цилиндр из металлического материала на пластине из немагнитного материала. Передвижение рабочего стола фрезерного станка позволяло с точностью до 0.001 мм регулировать расстояние между испытываемыми образцами, что фиксировалось на мониторе фрезерного станка, а блок индикации показывал создаваемое усилие (рис. 2).

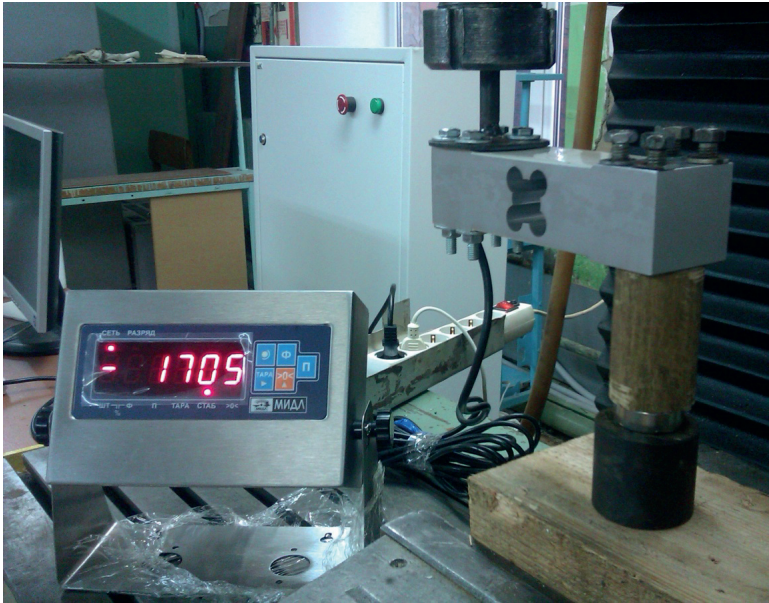


Рис. 2. Фрагмент проведения экспериментальных исследований

В ходе экспериментальных исследований были проведены серии исследований с постоянными магнитами диаметром 10 мм и высотой 5, 10, 15, 20, 25, 30 мм. Результаты исследований представлены на рис. 3.

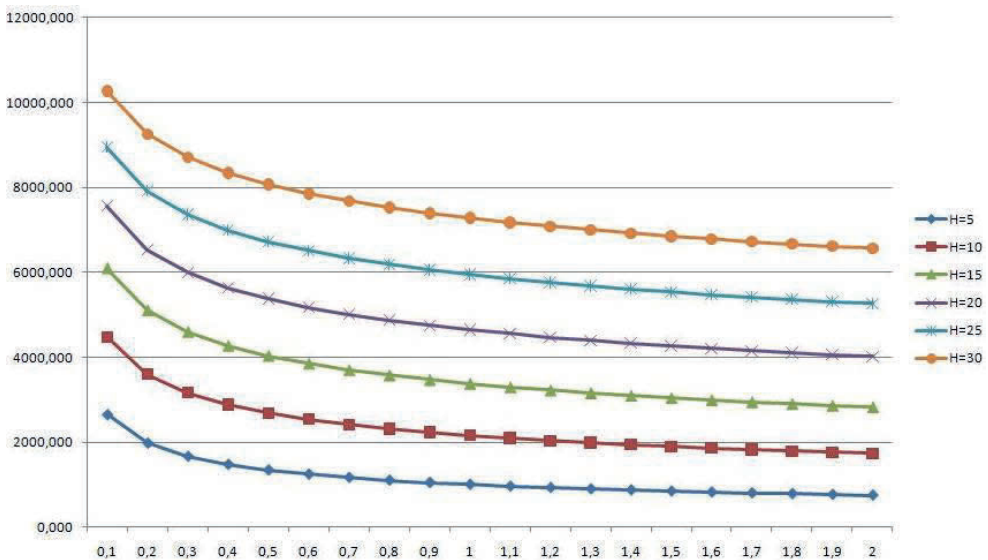


Рис. 3. Зависимость силы постоянных магнитов от расстояния при вибрационном резании при различной высоте испытуемых магнитов

Затем были проведены исследования с постоянными магнитами высотой 10мм и диаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30 мм. Результаты исследований представлены на рис. 4.

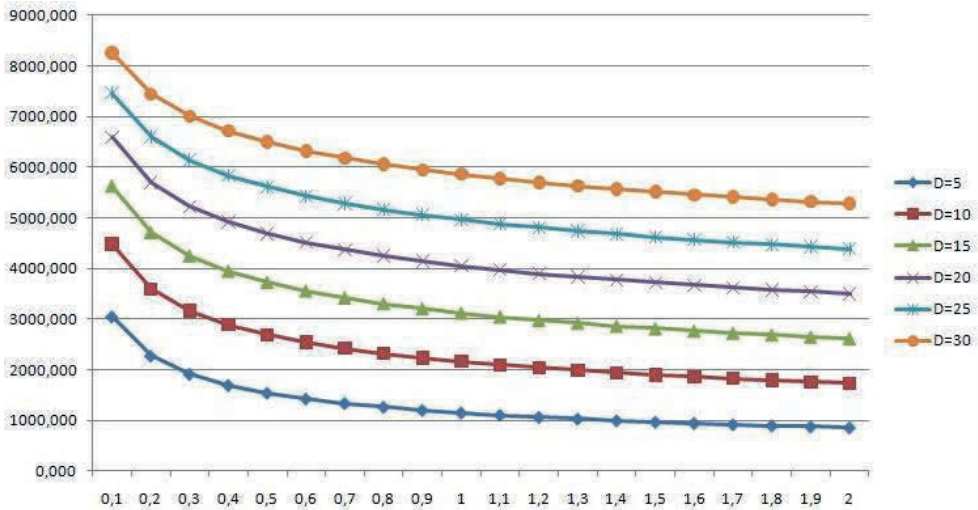


Рис. 4. График зависимости силы постоянных магнитов от расстояния при вибрационном резании при различных диаметрах испытуемых магнитов

Результаты эксперимента показывают влияние габаритных параметров магнитов и расстояния между вставками из магнитного материала на усилие вибраций. Данные исследования могут быть полезны при выборе и расчете конструктивных особенностей устройства для сверления с вибрациями.

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ МК-2653.2014.8.*

### Литература

- [1] Сидорова В.В., Разумов М.С. Исследование влияния осевой нагрузки на спиральное сверло с цилиндрическим хвостовиком. *Инновации в науке, технике и технологиях: сб. науч. ст. Всероссийской научно-технической конференции / Ижевский гос. техн. ун-т. им. М.Т. Калашникова/ Ижевск, 2014, с. 242–243.*
- [2] Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Анализ методов расчета металлорежущего инструмента на жесткость при сверлении. *Молодые ученые — основа будущего машиностроения и строительства: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014, с. 323–326.*
- [3] Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Расчет силовых параметров вибрационного резания. *Будущее машиностроения России: сб. науч. тр. VII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. Москва, 2014, с. 10–11.*
- [4] Сидорова В.В., Разумов М.С. Повышение производительности вибрационного сверления отверстий малого диаметра в заготовках из титановых сплавов. *Интеграция науки и практики как условие экономического роста: сб. науч. тр. VII Международной научно-технической конференции. Ульяновский гос. техн. ун-т. Ульяновск, 2014, с. 11–12.*

- [5] Сидорова В.В., Разумов М.С. Устройство для вибрационного сверления. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2014, № 4 (306), с. 51–54.
- [6] Сидорова В.В., Разумов М.С., Понкратов П.А. *Устройство для вибрационного сверления. Пат. 147317 Российская Федерация: МПК В23В35/00*. Заявитель и правообладатель «Юго-Западный государственный университет». № 2014120738/02; заявл. 22.05.2014; опубл. 10.11.2014, бюл. № 21, 2 с.
- [7] Razumov M.S., Sidorova V.V., Grechukhin A.N. *Automated control of process conditions during drilling with imposition of vibrations*. Metallurgical and Mining Industry. 2014, no 5, pp. 20–24.

УДК 621.9

## Основные направления развития алмазных и нитридборных инструментов для обработки конструкционной керамики

© Шкарупа Михаил Игоревич, Рогов Владимир Александрович

Россия, г. Москва, ОАО «ВНИИАЛМАЗ»

[shkarupamish@mail.ru](mailto:shkarupamish@mail.ru)

*В производстве современной наукоемкой продукции большую роль играет механическая обработка, осуществляемая с применением алмазного и нитридборного инструмента. Представлены семь основных направлений развития алмазных и нитридборных инструментов для обработки труднообрабатываемых материалов.*

**Ключевые слова:** механическая обработка, алмазные и нитридборные инструменты, шлифование.

В производстве современной наукоемкой продукции роль механической обработки, осуществляемой с применением алмазного и нитридборного инструмента, сложно переоценить [1]. Высокая твердость и износостойкость алмаза и кубического нитрида бора (КНБ) выгодно отличают их от других инструментальных материалов, обеспечивают возможность обработки самых труднообрабатываемых материалов, в том числе конструкционной керамики (рис. 1).

Трудно назвать отрасль машиностроения, где бы не использовались технологии механической обработки алмазным и нитридборным инструментом, среди которых лезвийная обработка (точение, фрезерование, сверление и развертывание), абразивная и финишная обработки (шлифование, сверление, хонингование, суперфиниширование, доводка и полирование), правка абразивного инструмента, упрочнение (алмазное выглаживание и вибровыглаживание). Расширению применения данной обработки в промышленности способствуют как увеличение объема и совершенствование качества синтеза и подготовки алмазного сырья (абразивные шлифпорошки, микропорошки, наноалмазные порошки, синтетические монокристаллические и поликристаллические алмазы, композиционные сверхтвердые материалы, покрытия и др.), так и развитие новых технологий механической обработки [2]. Ниже приведены

основные направлениями развития алмазных и нитридоборных инструментов для обработки труднообрабатываемых материалов.

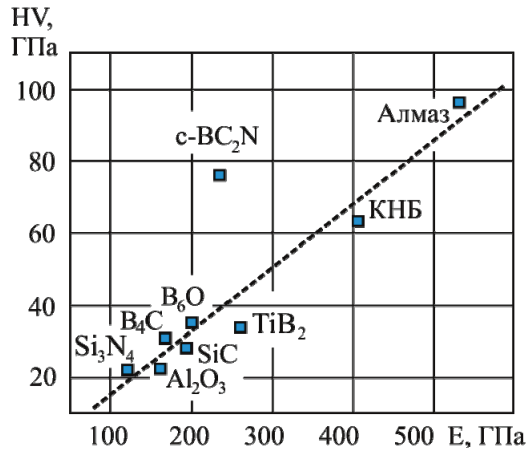


Рис. 1. Твердость и модуль упругости твердых материалов

1. Расширение применения высокопрочных и термостойких алмазов, в том числе получаемых по технологиям термохимического осаждения (CVD-алмазы). Метод CVD — одна из инновационных технологий получения алмазных продуктов путем термохимического осаждения из паровой фазы (рис. 2).

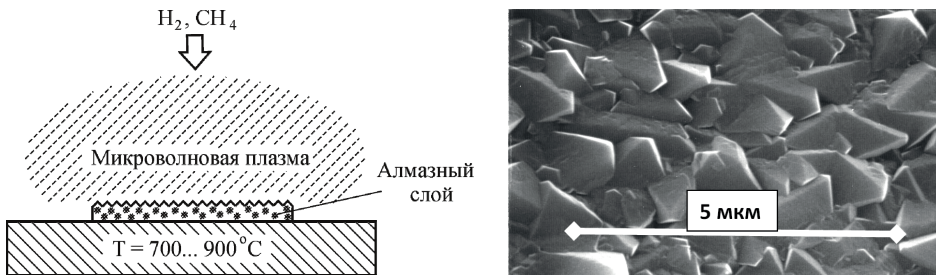


Рис. 2. Схема процесса получения покрытий из CVD-алмазов и структура алмазной пленки

2. Металлизация алмазных зерен для повышения износостойкости инструмента. Доказано, что прочность алмазных зерен, покрытых никелем вырастает на 22 %. Степень металлизации зерен варьируется от 40 до 100 % в зависимости от условий работы алмазного круга и вида операции шлифования. Степень металлизации 100 % соответствует тому, что масса металлического покрытия, нанесенного на единичное зерно алмаза или КНБ равна массе этого зерна. Дополнительно покрытия защищают алмазную фазу от окисления при спекании в металлических связках, создают развитую поверхность, повышающую сцепление с матричным материалом, что активно используется при изготовлении кругов на органических связках. Для металлизации алмазов используют вакуумное осаждение, термохимические и гальванические методы.

3. Разработка новых материалов и конструкций корпусов инструмента, в частности, из композиционных углерод-углеродных материалов, круги с внутренним подводом смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС), круги с регулярной структурированной рабочей поверхностью.

4. Новые технологии формирования алмазного рабочего слоя (электроразрядное спекание SPS, селективное лазерное спекание, сверхзвуковое газоплазменное напыление HVOF (рис. 3), газодинамическое (холодное) напыление, вакуумная пропитка материалом связки в графитовых или керамических формах, получаемых с применением выплавляемых моделей и др.

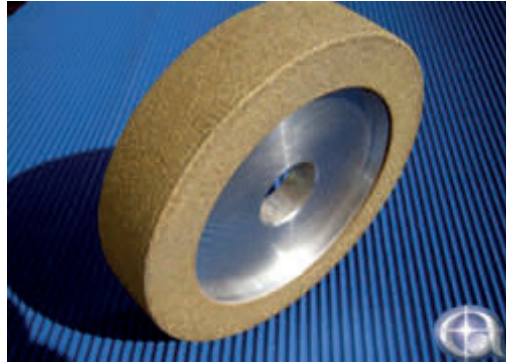
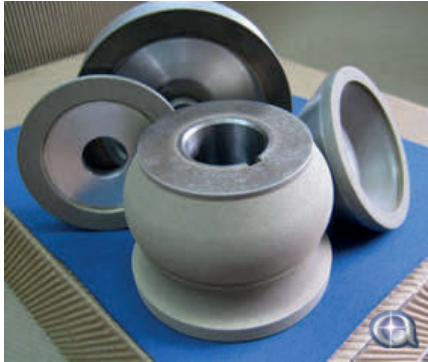


Рис. 3. Инструмент с алмазным рабочим слоем, полученным сверхзвуковым газоплазменным напылением

5. Разработка новых сверхтвердых композиционных инструментальных материалов с высоким содержанием алмазной фазы, алмазно-твердосплавные, жаростойкие инструментальные материалы на основе КНБ на вольфрам-рениевых, керамических и металлокерамических матрицах. Созданы новые композиционные наноматериалы с объемным содержанием сверхтвердой фазы (алмаз, КНБ) до 92 %.

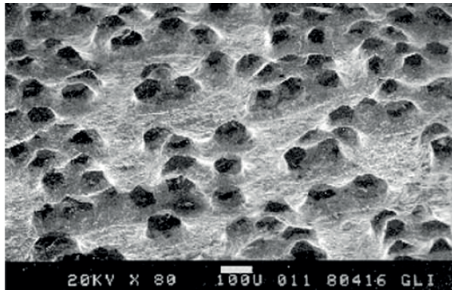
В ОАО «ВНИИАЛМАЗ» разработана группа технологий изготовления высоконаполненного материала без использования высоких давлений, основанная на применении мелкодисперсных и нанопорошков упрочняющей фазы и связки (защищены патентами РФ). Аналогами этих материалов являются композиты на металлокерамической и металлической связке, наполненные мелкозернистыми порошками алмазов и/или КНБ, а также спеченные поликристаллические сверхтвердые материалы: АСПК, СВСП, «Славутич», «Эльбор», «Бельбор», «Гексанит», твердосплавно-алмазный композиционный материал (ТАКМ), а также зарубежные композиты PDC (Polycrystalline diamond composite) и TSP (Thermally stable polycrystalline diamond), АВNNC (агрегированный нанокompозит нитрида бора), ВАМ (комбинация металлических сплавов алюминия и магния (AlMgB14) с диборидом титана (TiB2)).

6. Модифицирование известных и создание новых связок, в том числе, с использованием наноалмазов и других нанопорошковых материалов с обеспечением равномерного или функционально-градиентного распределения сверхтвердой фазы (рис. 4).

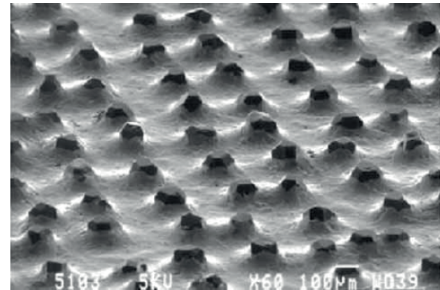
Для снижения удельного износа алмазных шлифовальных кругов и повышения эффективности механической обработки материалов необходимо снизить критические показатели, определяющие стойкость инструмента: силу трения и температуру в зоне резания. В ОАО «ВНИИАЛМАЗ» исследовано модифицирование органических



и металлических связок специальными антифрикционными и упрочняющими присадками с добавлением оксида графена, висмута и кобальта. Производственные испытания модифицированных алмазных шлифовальных и отрезных кругов на круглошлифовальном и отрезном станке при обработке изделий из конструкционной кварцевой керамики «Ниасит» показали, что удельный износ алмазосодержащего слоя у кругов формы 1А1 100×6×20×5 на модифицированной связке меньше в 1,83 раза по сравнению со стандартными кругами, используемыми на производстве. Производительность кругов на модифицированной связке оказалась выше на 26 % по сравнению с кругами, произведенными по действующему ГОСТ при соответствии качества поверхности требованиям документации.



а



б

**Рис. 4.** Расположение алмазных зерен на рабочей поверхности инструмента:  
а — произвольное; б — равномерное

Разработан новый класс связок, называемых гибридными (органо-металлическими), при использовании которых достигают высокую режущую способность и качество обработки, характерные для инструмента на органических связках, с его износостойкостью и надежностью, являющимися отличительными чертами металлических связок. Развивается применение кластерных кругов, в которых кластеры из нескольких алмазных зерен, соединенных связкой одного типа (металлической или керамической), объединены между собой связкой другого типа, например, органической. Это позволяет существенно повысить стойкость и производительность абразивного инструмента.

7. Приобретение опыта по обработке новых и специальных неметаллических материалов (композитов на полимерной и металлической основах углерод-углеродных композитов, керамик, керамокомпозитов, графитовых материалов).

Одним из путей увеличения эффективности механической обработки (производительности процесса, качества поверхности обрабатываемого материала) труднообрабатываемых материалов является развитие и использование технологии высокоскоростного и глубинного шлифования, а также интегральной технологии обработки HUDG и UDG high-speed ultrasonic deep grinding и ultrafast deep grinding (высокоскоростное глубинное ультразвуковое шлифование и сверхскоростное глубинное шлифование) разрабатываемой в ОАО «ВНИИАЛМАЗ». Такая технология позволит увеличить производительность обработки по удалению припуска в 10 и более раз, уменьшить силы шлифования, устранить остаточные напряжения и прижоги, снизить энергоемкость процесса обработки. Высокоскоростное шлифование выполняется кругами с суперабразивами на гальванической или металлической связках. Обычно

шлифование производится со скоростью резания 30...50 м/с. При высокоскоростном шлифовании скорость резания составляет 100...200 м/с, а при сверхскоростном шлифовании 200...400 м/с (см. таблицу).

Использование ультразвука при высокоскоростном глубинном шлифовании позволит достигать качества поверхности без чистовой обработки путем вибраций режущих зерен и резонирующих явлений в процессе обработки. При такой обработке требуются специальные станки повышенной точности с силовыми электрошпинделями, позволяющими достигать вращения до  $100\,000\text{ мин}^{-1}$  (об/мин).

#### Сравнение параметров резания при различных способах абразивной обработки

Параметр обработки	Способ обработки			
	Традиционный	Глубинный	Высокоскоростной глубинный	Сверхскоростной глубинный
Глубина резания, мм	0,001...0,005	0,1...30	0,1...30	0,5...30
Скорость резания, мм	20...60	20...60	80...200	200...400
Скорость удаления материала, $\text{мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$	0,1...10	0,1...10	50...2000	100...4000
Скорость подачи, м/мин	1...30	0,5...5	0,5...10	1...15

#### Литература

- [1] Дудаков В.Б., Бойцов А.Г., Шкарупа М.И. Алмазная обработка — инновационные пути. *РИТМ*. 2014, № 9.
- [2] Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. *Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов*. Санкт-Петербург, Лань, 2010.

УДК 658.5.012.1

## Применение технологии селективного лазерного плавления при производстве деталей малоразмерных газотурбинных двигателей

© Агаповичев Антон Васильевич, Сотов Антон Владимирович,  
Смелов Виталий Геннадиевич

Россия, г. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева  
(национальный исследовательский университет)

[Agapovichev5@mail.ru](mailto:Agapovichev5@mail.ru), [Sotovanton@ya.ru](mailto:Sotovanton@ya.ru)

*Рассмотрена разработка технологии и комплекса технологической подготовки производства для селективного лазерного спекания турбины малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД). Для представления работы МГТД одну из простейших его конструкций, можно представить как вал, на котором находится два диска с лопатками, первый диск компрессора, второй — турбины, между ними установлена камера сгорания.*

**Ключевые слова:** малоразмерный газотурбинный двигатель, селективное лазерное спекание, диск турбины, диск компрессора.

Принцип работы малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) такой же как и у обыкновенного ГТД: всасывание и сжатие воздуха в компрессоре, подача его в камеру сгорания, смешение сжатого воздуха с топливом для образования топливо-воздушной смеси (ТВС), воспламенение полученной ТВС при помощи свечи зажигания, расширение газов при сгорании топливо-воздушной смеси, вследствие чего формируется вектор давления газа, направленный в сторону меньшего сопротивления (в направлении лопаток турбины), передача энергии (давления) газа лопатками турбины на диск или вал, в котором эти лопатки закреплены, приводя во вращение диск (вал) турбины и, вследствие этого, передачу крутящего момента по валу на диск компрессора.

Для разработки технологии изготовления турбины МГТД необходимо выполнить следующий алгоритм:

- построение 3D-модели турбины МГТД;
- преобразование модели в формат STL;
- форматирование данного формата файла в специальном программном пакете MagicsRP;
- передача готового файла в установку SLM 280 HL.

На первом этапе разрабатывается 3D-модель турбины МГТД в программе трехмерного моделирования NX 9.0. Затем модель сохраняется в формате STL. С помощью специальной программы MagicsRP STL модель турбины редактируется и правильно располагается на специальной платформе построения. Платформа имеет размер 280×280 мм (рис. 1).

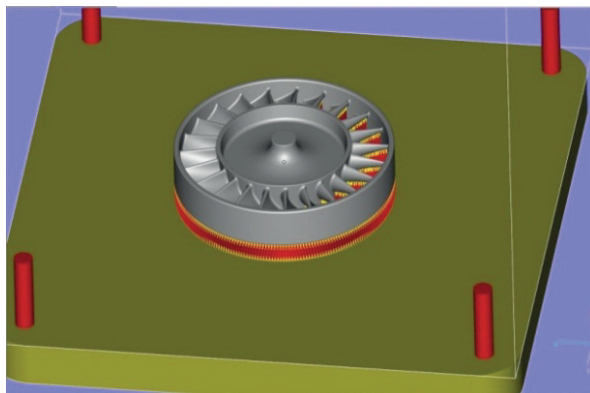


Рис. 1. Расположение турбины на платформе построения

Изделия крепятся на платформе за счет специального материала поддержки, который необходим для устойчивого положения детали во время послойного спекания внутри камеры построения. Для того чтобы после полного построения деталь можно было легко отделить от платформы, поддержки делают тонкостенными.

Во время изготовления детали внутри камеры построения после каждого наплаваемого слоя на поверхности изделия повышается температура, что плохо сказывается на качестве изготавливаемой детали. Для отвода тепла вместе с материалом поддержки устанавливаются специальные стержни (теплоотводы) цилиндрической, кубической и других форм (рис. 2).

После того как модель турбины МГТД отредактирована в программе MagicsRP и правильно расположена на платформе построения, ее загружают в установку SLM 280 HL. На этой установке файл турбины разбивается на слои в 50 мкм, производится окончательное позиционирование на платформе построения, подбираются параметры лазерного излучения. При изготовлении турбины МГТД параметры лазерного излучения должны быть следующие:

- мощность, скорость сканирования, фокус при построении контура основного материала: 350 Вт, 230 мм/с, 0 мм соответственно;
- мощность, скорость сканирования, фокус при построении материала поддержки: 100 Вт, 440 мм/с, 1 мм соответственно;
- мощность, скорость сканирования, фокус при построении границ основного материала: 175 Вт, 550 мм/с, 0 мм соответственно.

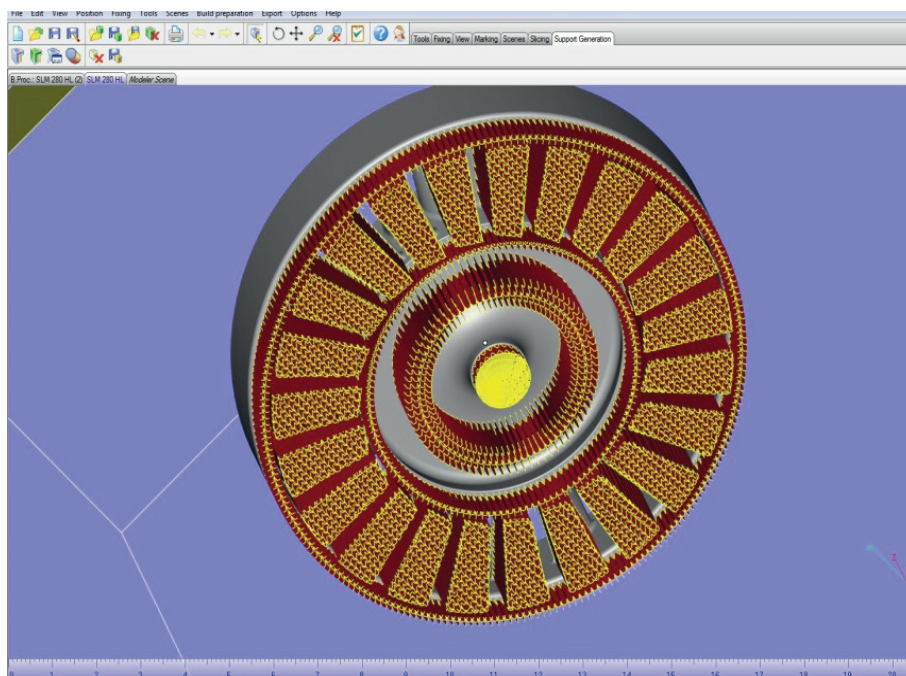


Рис. 2. Расположение детали и материала поддержки на платформе построения

Далее запускается процесс автоматического построения детали. Камера построения заполняется азотом и лазер начинает выборочно спекать слои металлического порошка. В результате получается готовая деталь МГТД, полученная методом послойного лазерного спекания. Изделие снимается с платформы построения путем отделения от материала поддержки, зачищается от оставшегося неспекенного металлического порошка.

### Литература

- [1] Балякин А.В., Смелов В.Г., Агаповичев А.В. Разработка методики литья из жаропрочных сплавов сложных деталей малоразмерных газотурбинных двигателей с применением аддитивных технологий. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета)*. 2014, № 5 (47), с. 190–196.
2. Smelov V.S., Agapovichev A.V., Balaykin A.V. Production technology of the internal combustion engine crankcase using additive technologies. *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no 4, pp. 335–343.
3. Smelov V.S., Agapovichev A.V., Balaykin A.V., Agapovichev A.V. Application of additive technologies in the production of aircraft engine parts. *Modern Applied Science*. 2015, vol. 9, no 4, pp. 151–159.
4. Smelov V.G., Sotov A.V., Kosirev S.A. Development of process optimization technology for laser cladding of GTE compressor blades. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014, vol. 9, no 10, October 2014.

УДК 65.015.13

## **Группирование деталей на основе оценок подобия маршрутных технологических процессов их изготовления для формирования поддетально-специализированных участков в цехе**

© Акиншин Руслан Николаевич

Россия, г. Королев, ЗАО «Завод экспериментального машиностроения»  
Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королева

[ruller003@mail.ru](mailto:ruller003@mail.ru)

*Рассмотрены проблемы синтеза структуры производственных подразделений на предприятиях единичного, мелко- и среднесерийного типов производства. Так как основой формирования участков в цехе является анализ номенклатуры изготавливаемых деталей и их группирование, разобраны достоинства и недостатки способов разделения деталей на группы. Подробно описан метод группирования деталей на основе оценок подобия маршрутных технологических процессов их изготовления как наиболее эффективный при формировании поддетально-специализированных участков в ходе реконструкции машиностроительных предприятий.*

**Ключевые слова:** структура производственных подразделений, специализация производственных подразделений, группирование деталей, оценка подобия, деталь-представитель.

При проектировании нового цеха, а также при реконструкции существующих цехов важным этапом является синтез их структуры, т. е. обоснованный выбор состава отделений и участков.

Различают следующие формы специализации производственных подразделений [1]:

1) технологическая, при которой в подразделении осуществляется изготовление заготовок, деталей или сборочных единиц, характеризующихся общностью выполняемых технологических процессов и операций;

2) предметная, при которой в подразделении сосредотачивается все оборудование необходимое для полного изготовления изделий, имеющих признаки конструктивно-технологической общности;

3) поддетальная, представляющая собой разновидность предметной, при которой в подразделении обрабатываются заготовки деталей, характеризующихся общностью конструктивно-технологических признаков;

4) смешанная, сочетающая в разных пропорциях черты перечисленных видов структуры.

Как показывают производственные исследования, наиболее эффективной организационной формой цеха является поддетальная (предметная) специализация, характерная для цехов массового и крупносерийного типов производства. Для цехов среднесерийного, мелкосерийного и единичного типов производства обширная номенклатура деталей и

изделий предопределяет технологическую специализацию участков с использованием однотипного оборудования (токарный, фрезерный, шлифовальный участки и т. д.) [1].

В настоящее время большая часть предприятий машиностроительного комплекса как в нашей стране, так и за рубежом относится к серийному типу производства [2]. Поэтому разработка методики синтеза структуры подетально-специализированных подразделений среднесерийного производства, обеспечивающей повышение эффективности функционирования предприятия, является важной задачей.

Основа формирования подетально-специализированных участков — анализ номенклатуры изготавливаемых в цехе деталей и их группирование. Серийное производство характеризуется большой номенклатурой выпускаемых изделий, разделение которых на группы вручную длительно и трудоемко, а качество полученного результата во многом зависит от опыта исполнителя.

Целью данной работы является разработка методики группирования деталей для формирования подетально-специализированных участков в цехе.

При синтезе структуры производственных подразделений для разделения деталей, изготавливаемых в технологическом комплексе, на определенные группы используются методы, основанные на классификации и кодировании изделий [2]:

- 1) формирование групп деталей на основе ранжирования критериев;
- 2) формирование групп деталей на основе комплексного аддитивного критерия;
- 3) формирование групп деталей на основе искусственных нейронных сетей.

Основной недостаток первых двух методов состоит в низкой эффективности систем кодирования вследствие ее высокой субъективности. Сущность группирования деталей с помощью искусственной нейронной сети подробно описана в [3]. Основным недостатком этого метода — необходимость обучения искусственной нейронной сети.

Во всех трех описанных методах построение технологической системы начинается с анализа конструктивно-технологической общности деталей. В начале 80-х годов был предложен метод, ориентированный на разделение в первую очередь оборудования на участки, а затем — группирование деталей. Метод получил общее название: кластеризация станков с использованием меры близости [2]. Недостатком этого метода является большое количество методов расчета меры близости станков.

Таким образом, все из перечисленных методов группирования деталей для формирования подетально-специализированных участков в цехе обладают существенными недостатками:

- субъективность полученных решений в случае участия в процессе эксперта.
- необходимость использования сложного математического аппарата, не гарантирующего получение качественного решения.

Рассмотрим еще один метод группирования деталей, которую можно применять для синтеза структуры технологических комплексов — разделение деталей на группы на основе оценок подобия маршрутных технологических процессов их изготовления [4]. Исходными данными для этого метода является перечень деталей и их маршрутные технологические процессы, по которым для всех деталей попарно рассчитывается коэффициент подобия состава операций:

$$S_{ij} = \frac{2m}{a + b}, \quad (1)$$

где  $m$  — число одинаковых операций в маршрутных технологических процессах изготовления  $i$ -й и  $j$ -й деталей;  $a$  — общее число операций в технологическом процессе  $i$ -й детали;  $b$  — общее число операций в технологическом процессе  $j$ -й детали.

Полученные значения оценок подобия заносятся в матрицу. Затем среди множества деталей выделяется деталь-представитель по определенному критерию. В группу к детали-представителю добавляются все детали, оценки подобия которых больше некоторого граничного значения  $S_{гр}$ . После формирования первой группы среди не вошедших в группу деталей снова выбирается деталь-представитель и описанным выше способом происходит создание второй группы. Процесс повторяется до тех пор, пока все детали не будут распределены по группам.

Рассмотренный метод также обладает рядом недостатков и для его практического применения необходимо провести анализ критериев выбора деталей-представителей, граничных значений оценок подобия и разработать программу, реализующую алгоритм разделения деталей на группы.

Критерием выбора детали-представителя группы может быть следующие:

- 1) максимум станкоемкости обработки годового объема выпуска изделия;
- 2) максимум суммы оценок подобия детали, претендующей на роль представителя, с остальными деталями.

Однозначно определить, какой из критериев предпочтительнее использовать, сложно, поэтому целесообразно выполнять группирование деталей с помощью обоих критериев, а затем среди полученных вариантов выбрать наилучший.

Согласно методике после выбора детали-представителя к ней в группу добавляются детали, оценки подобия которых больше некоторого граничного значения. Данные детали исключаются из дальнейшего процесса формирования групп, чтобы не допустить присутствия одной детали в нескольких группах. При этом не гарантируется, что деталь окажется в группе, где она имеет наибольшее значение оценки подобия. Чтобы избежать подобной ситуации, и тем самым повысить качество полученного решения, предлагается не удалять деталь из общего списка после ее попадания в какую-либо группу, что позволит ей и дальше участвовать в процессе группирования, а после его завершения для деталей, имеющих неоднозначное положение, провести поиск группы, в которой они имеют максимальное значение оценки подобия.

Таким образом, в рамках рассматриваемого подхода можно выделить четыре метода, отличающихся критериями выбора детали-представителей и способом формирования групп:

*метод № 1:* критерий выбора детали-представителя — максимум станкоемкости годового объема выпуска детали; добавление деталей в группу к представителю сопровождается их исключением из дальнейшего процесса формирования групп;

*метод № 2:* критерий выбора детали-представителя — максимум суммы оценок подобия. Добавление деталей в группу к представителю сопровождается их исключением из дальнейшего процесса формирования групп;

*метод № 3:* критерий выбора детали-представителя — максимум станкоемкости годового объема выпуска детали. Распределение деталей по группам сопровождается поиском положения детали с наибольшим значением оценки подобия;

*метод № 4:* критерий выбора детали-представителя — максимум суммы оценок подобия. Распределение деталей по группам сопровождается поиском положения детали с наибольшим значением оценки подобия.

Важный элемент методики — условия сравнимости деталей, в качестве которых могут выступать их объем выпуска, материал, масса, габаритные размеры и ряд других характеристик. В случае, когда указанные условия не соблюдаются, детали не объединяются в одну группу даже, если они имеют высокую оценку подобия.



Габаритные размеры детали определяют параметры рабочей зоны станка и, как следствие, его габаритную группу. Группирование деталей с применением в качестве условия сравнимости их геометрических характеристик способствует формированию участков из оборудования одной габаритной группы, что повышает эффективность использования как рабочего пространства станка, так и производственной площади цеха в целом. Поэтому в качестве условия сравнимости деталей при их группировании примем один из габаритных размеров: для деталей типа тело вращения — диаметр; для плоских и корпусных деталей — максимальный размер (длину).

Для получения окончательного решения, на основе которого будет разработана структура цеха, необходимо определить граничное значение оценки подобия  $S_{гр}$ . В [4] минимально допустимым считается  $S_{гр} = 0,50$ .

Полученное количество групп изделий, как правило, значительно превышает возможное количество участков в цехе, поэтому необходимо дополнительно провести объединение указанных групп для окончательного синтеза структуры цеха на основе сведений о существующей структуре цеха, конструктивных характеристиках деталей, типах и количестве оборудования, требуемого для их изготовления.

Для реализации алгоритма распределения деталей по участкам описанными способами предлагается использовать язык программирования Visual Basic for Applications, входящий в состав Microsoft Excel или Open Office Calc, так как указанные программы являются широко распространенными и общедоступными.

Наиболее целесообразно применять описанный подход при реконструкции действующих цехов, поскольку исходными данными являются маршрутные технологические процессы изготовления деталей, которые отсутствуют при строительстве нового предприятия.

На основе проделанной работы и выявленных в ее ходе особенностей методики предлагается использовать следующий алгоритм формирования участков с помощью оценок подобия изделий:

- 1) расчет коэффициентов подобия для всех деталей и запись их в матрицу;
- 2) разделение множества деталей на группы четверья (одним, двумя, тремя) описанными ранее методами с разными граничными значениями оценок подобия, используя в качестве условия сравнимости деталей их габаритные размеры;
- 3) сокращение возможных вариантов группирования за счет введения ограничений на среднее значение оценки подобия и количество полученных групп;
- 4) создание участков на основе сформированных групп деталей с обеспечением наилучшей загрузки оборудования, необходимого для изготовления деталей группы (участка).

Автоматизация разделения номенклатуры изготавливаемых изделий на группы, результаты которого возможно использовать для формирования структуры подразделений предприятия, разработки типовых и групповых технологических процессов и оптимизации планировок технологического оборудования, способствует снижению трудоемкости проектных работ, сокращению сроков технологической подготовки производства и повышению качества принимаемых решений, что особенно актуально в современных условиях, характеризующихся частой сменой выпускаемой продукции и требующих постоянного совершенствования производства. Поэтому использование теории подобия в процессе проектирования технологических комплексов имеет важное производственное значение.

## Литературы

- [1] Мельников Г.Н., Вороненко В.П. *Проектирование механосборочных цехов*. Москва, Машиностроение, 1990, 352 с.
- [2] Лобуз В.В. *Формирование технологически ориентированных структур оборудования в пространстве цеха*. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2008, 170 с.
- [3] Иванова М.В. *Нейросетевой метод многокритериальной оптимизации планировок технологического оборудования в машиностроении*. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2000, 240 с.
- [4] Кондаков А.И. *САПР технологических процессов*. Москва, Академия, 2008. 272 с.

УДК 621.313

## Электромагнитный подшипник, активный магнитный подвес

© Аль-Шахейти Ареф Мохаммед Ахмед, Евдокимов Юрий Кириллович

Россия, г. Казань, Казанский национальный  
исследовательский технический университет

[arefalshahethi@mail.ru](mailto:arefalshahethi@mail.ru)

*Представлено описание электромагнитного подшипника, принцип его действия и возможности и объекты применения. Показаны основные особенности и преимущества использования электромагнитных подшипников.*

**Ключевые слова:** *электромагнитный подшипник, принцип действия.*

Активные магнитные подшипники находят все большее применение во многих отраслях промышленности, бесконтактные активные магнитные подшипники используются для улучшения стабилизации вращения роторных машин.

Электромагнитные подшипники (ЭМП) состоят из статора с установленными в двух осях четырьмя электромагнитами. Принцип действия ЭМП основан на эффекте левитации в магнитном поле. Для поддержания, центрирования и контролирования положения вала-ротора устройства применяются индуктивные датчики перемещения (измерение перемещений положения ротора). Индуктивные датчики положения устанавливают полную левитацию ротора.

Электромагнитные подшипники применяются в нефтегазовых турбинах, высокооборотных энергетических машинах, а также в компрессорной технике.

Роторы высокооборотных электрических машин с постоянными магнитами обеспечивают их стойкость и достаточно высокую надежность при больших скоростях вращения.

Главным преимуществом ЭМП по сравнению с традиционными подшипниками является отсутствие полного механического трения, что позволяет отказаться от масла, используемого для повышения вязкости устройства вала-ротора. Отсутствия масла позволяет достичь высочайшей надежности также и за счет отсутствия износа уз-

лов машины. Важной особенностью электромагнитных подвесов является не только обеспечение свободной левитации взвешиваемых тел, но и способность выдавать точную информацию об их смещениях и действующих на них силах [1, 2].

### Литература

- [1] Изосимова Т.А., Евдокимов Ю.К. *Адаптивное управление динамикой высокоэнергетических роторных машин с активным магнитным подвесом*. Нелинейный мир, 2014, т. 12, № 10, с. 37–42.
- [2] Осокин Ю.А., Герди В.Н., Майков К.А., Станкевич Н.Н. *Теория и применение электромагнитных подвесов*. Москва, Машиностроение, 1980, 288 с.

УДК 621.9

## Поисковая система технологической оснастки

© Арзыбаев Алмазбек Момунович, Базров Борис Мухтарбекович

Россия, г. Москва, Институт машиноведения имени А.А. Благонравова  
Российской академии наук

[is\\_arzybaev@mail.ru](mailto:is_arzybaev@mail.ru)

*Предложено решение поиска и отбора приспособлений-аналогов в архиве предприятия и в других источниках информации. Рассмотрены методы идентификации технологической документации, раскрыто понятие «классификатор станочного приспособления».*

**Ключевые слова:** *приспособление-аналог, оснастка, информационная поисковая система, классификатор.*

Основную группу технологической оснастки составляют приспособления механосборочного производства. Приспособлениями в машиностроении называют вспомогательные устройства к технологическому оборудованию, используемые при выполнении операций обработки, сборки и контроля.

Частая смена объектов производства, обусловленная нарастанием темпов технического прогресса, требует создания конструкций приспособлений, методов их расчета, проектирования и изготовления, обеспечивающих неуклонное сокращение сроков подготовки производства.

Затраты на изготовление технологической оснастки составляют 15...20 % от затрат на оборудование для технологического процесса обработки деталей машин или 10...24 % стоимости машины. Станочные приспособления занимают наибольший удельный вес по стоимости и трудоемкости изготовления в общем количестве различных типов технологической оснастки [1].

Станочные приспособления проектируются, как правило, по следующей схеме: формулирование технического задания — разработка конструктивных вариантов приспособлений — сравнительный анализ вариантов — принятие решения.

Большая помощь в разработке приспособлений является ознакомление с чертежами аналогичных приспособлений, хранящихся в архиве предприятия. Однако поиск чертежей приспособлений затруднен из-за несовершенства методов идентификации документации в архиве. Если раньше их недостатки компенсировались в некоторой степени с помощью конструкторов работающих на предприятии 30–40 лет, то в настоящее время таких специалистов практически не осталось и находить аналоги в архиве стало практически невозможно.

В связи с изложенным, создание единого автоматизированной информационно-поисковой системы приспособлений имеет большое практическое значение [2]. Такая система была создана в Институте Машиноведения РАН. При ее разработке был предложен оригинальный классификатор приспособлений, который включает классификационные признаки, описывающие как постановку задачи, так и признаки, отражающие конструкцию приспособлений [3].

В основе системы лежит база данных, содержащая на каждое приспособление в архиве его цифровой код и инвентарный номер, присвоенный ему в архиве.

Конструктор при поиске приспособления-аналога задает первую часть кода, описывающего постановку задачи (габариты заготовки, комплект технологических баз и др.), по которой устанавливается наличие чертежей приспособлений.

Если такое приспособление имеется в архиве, то на экране компьютера высвечивается код этого приспособления и его инвентарный номер, по которому в архиве находят чертежи приспособления.

Формирование базы данных осуществляется на основе кодирования чертежей приспособлений, имеющихся в архиве, а также кодирования новых приспособлений одновременно с присвоением им инвентарных номеров.

Работа с системой ведется в диалоговой форме, что делает ее предельно простой для пользователей. Использование системы создает условия компетентного, качественного и оперативного отбора самим конструктором ряда альтернативных вариантов станочных приспособлений при сокращении затрат времени на традиционные рутинные процедуры проектирования.

## Литература

- [1] Схиртладзе А.Г. *Станочные приспособления*. Москва, Машиностроение, 2010.
- [2] Арзыбаев А.М. Автоматизированная информационно-поисковая система конструкторской документации приспособлений. *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении*. Москва, ИМАШ РАН, 13–15 мая 2014. Москва, 2014, с. 95–98.
- [3] Арзыбаев А.М. Единая информационно-поисковая система технологической оснастки: сб. тр. XXVI Междунар. инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов «МИКМУС 2014». Москва, ИШАШ РАН, 17–19 декабря 2014, с. 14–15.

УДК 620.1

## Экспериментальное исследование температурного поля в очаге резания при фрезеровании сплава ВТ-6

© Афонин Александр Викторович, Носова Екатерина Александровна

Россия, г. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)

[afonin.alecksander@yandex.ru](mailto:afonin.alecksander@yandex.ru)

*Обработка материалов резанием до настоящего времени является основным способом изготовления изделий машиностроения. В результате научных исследований в различных областях обработки материалов резанием повышается эффективность процесса резания. Описан эксперимент исследования температурного поля в очаге резания при фрезеровании сплава ВТ-6. На основании полученных данных построена зависимость максимальной температуры нагрева сплава в очаге резания для каждого прохода фрезы. Установлено, что с увеличением числа проходов фрезы по поверхности заготовки повышается максимальная температура нагрева в очаге.*

**Ключевые слова:** обработка материалов, резание, температурное поле, очаг резания.

Главная задача современного машиностроительного производства — создание высококачественной, конкурентоспособной техники. Качество изготавливаемых деталей, входящих в состав изделий, при требуемых показателях производительности и экономичности в большинстве случаев обеспечивается за счет использования операций механической обработки резанием. Несмотря на значительные достижения в использовании методов литья и обработки металлов давлением, обработка материалов резанием до настоящего времени является основным способом изготовления продукции машиностроения. В результате такой обработки обеспечивается заданная точность геометрических параметров, формы и расположения поверхностей, требуемое состояние поверхностного слоя. Поэтому дальнейшее повышение эффективности процесса резания, особенно в условиях автоматизированного производства, является актуальной задачей. Важный вклад в повышение эффективности процесса резания вносят научные исследования в различных областях обработки материалов резанием. Изучение температурного поля в очаге резания позволяет сопоставить компьютерные модели процесса механической обработки, а также установить наиболее благоприятный режим подачи СОЖ.

В качестве материала обработки при проведении исследования применяли сплав ВТ-6, химический состав которого представлен ниже:

### Массовая доля элементов в исследуемом сплаве (ГОСТ)

	Ti	Al	V	C	Fe	Si	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Сумма прочих смесей
Основа	5,5–7,0	4,2–6,0	≤0,10	≤0,30	≤0,15	≤0,20	≤0,05	≤0,015	≤0,015	≤0,30

Зарубежные аналоги титанового сплава ВТ-6 приведены ниже:

США	Германия	Япония	Франция	Англия
—	DIN, WNr	JIS	AFNOR	BS
Al-4V rade5	3.7164 3.7165	SAT-64 Ti-6Al-4V	T-A6V Ti-P.63	Ti-Al-V

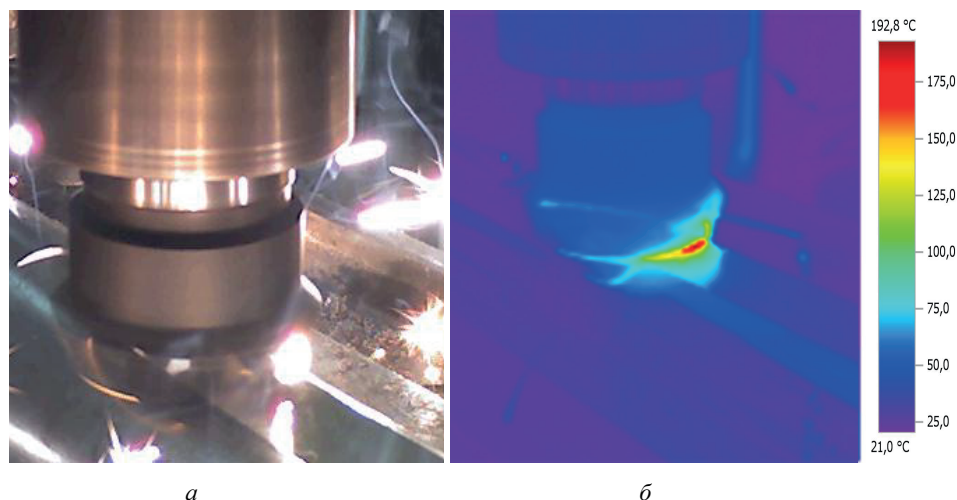
В качестве заготовки использовали горячекатаный прутком диаметром 60 мм длиной 1 м. Заготовка закреплялась на рабочей поверхности фрезерного станка. Далее на заготовке была сформирована горизонтальная плоскость для проведения последующего фрезерования. Затем торцевая фреза диаметром 100 мм, заняв исходное положение, совершала полный проход вперед, снимая слой материала толщиной 0,5...1,0 мм. После чего без отрыва от заготовки совершалось обратное движение в исходное положение.

Режимы резания были выбраны исходя из рекомендаций по фрезерованию титанового сплава ВТ-6 [1]. Поскольку титан, как правило, обрабатывается при высоких оборотах шпинделя, скорость последнего была установлена экспериментальным путем так, чтобы исключить самопроизвольное возгорание титана. Подача также была определена экспериментальным путем и составляла 20...25 мм/мин.

Температуру в очаге измеряли с помощью тепловизора марки Teslo 875-2.

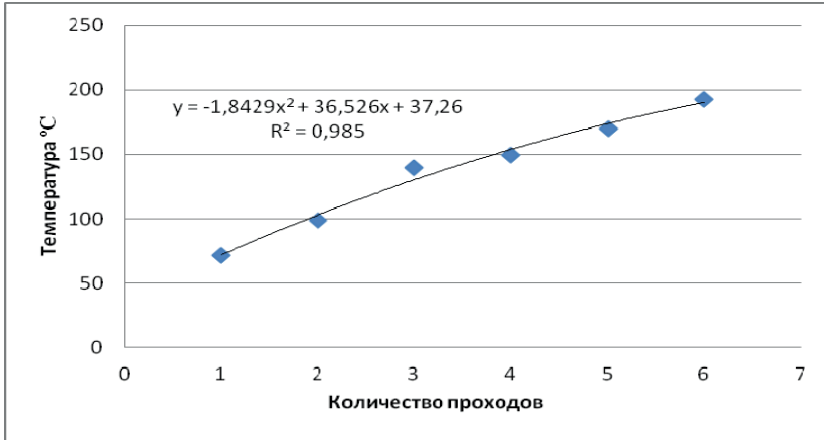
Дальнейшее исследование температуры в зоне резания проводили методом структурного анализа. При смешивании стружки с эпоксилином был получен микрошлиф для исследования его микроструктуры под микроскопом. Аналогичным образом был получен микрошлиф части необработанного материала путем заливки в эпоксидную смолу.

Результаты съемки очага резания, полученные с помощью тепловизора, представлены на рис. 1. На рисунке видно, что температурное поле в очаге неравномерно и имеет максимальную температуру 192,8 °С. Аналогичные картины распределений температуры были получены для предыдущих проходов.



**Рис. 1.** Изображение очага резания на шестом проходе фрезы:  
а — съемка обычной камерой; б — съемка с помощью тепловизора

На основании этих данных был построен график изменения максимальной температуры в очаге резания для каждого прохода фрезы (рис. 2).

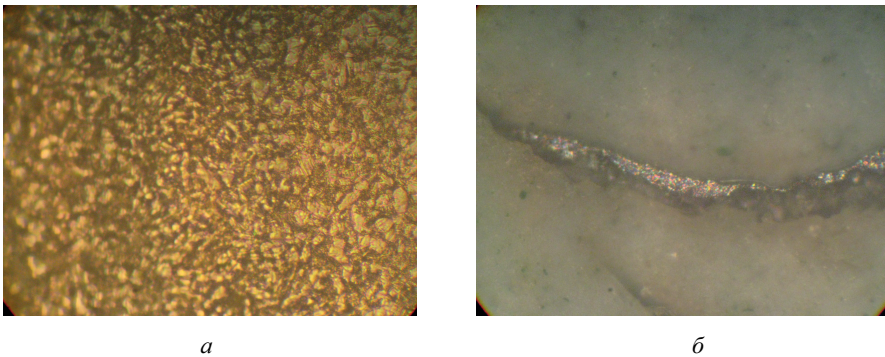


**Рис. 2.** Изменение максимальной температуры нагрева сплава в очаге резания в зависимости от цикла обработки

На рисунке видно, что с увеличением числа проходов фрезы по поверхности заготовки повышается максимальная температура нагрева в очаге.

Методом наименьших квадратов была выбрана параболическая зависимость, имеющая наименьшее расхождение с экспериментальными точками (см. рис. 2). С помощью математического анализа полученной функции установлено, что ее максимум достигается при количестве проходов  $n = 10$  и температуре  $218\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Реальный эксперимент показал, что в интервале температур  $200\text{...}250\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит самовозгорание стружки металла, что неблагоприятно влияет на условия обработки. Таким образом, максимальное значение выбранной функции находится в интервале температур возгорания сплава.

Были проанализированы микроструктуры микрошлифов стружки (рис. 3) и необработанной части материала.



**Рис. 3.** Изображение микроструктуры образцов ( $\times 500$ ):  
*а* — микроструктура исходного материала; *б* — микроструктура стружки

На рисунке видно, что микроструктура исходного материала заметно измельчилась, что свидетельствует о структурном превращении в обрабатываемом материале.

### Литература

- [1] Ткаченко, П.В. Локтик А.В. *Исследование чистового торцового фрезерования титанового сплава BT* [Электрон. ресурс], 2006, № 5. URL: [http://www.kdu.edu.ua/statti/2006-5-1\(40\)/69.pdf](http://www.kdu.edu.ua/statti/2006-5-1(40)/69.pdf) (дата обращения 18.09.2015).
- [2] Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. Москва, МИСИС, 1999, 416 с.
- [3] Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. *Титановые сплавы: справ.* Москва, ВИЛС – МАТИ, 2009, 520 с.
- [4] Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. *Обработка резанием титановых сплавов*. Москва, Машиностроение, 1970, 180 с.

УДК 621.7

## Исследование изменения температуры в рабочем зазоре магнитожидкостных герметизаторов с применением программы ANSYS

© Власов Алексей Михайлович, Полетаев Владимир Алексеевич

Россия, г. Иваново, Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

[leshka.vlasov@gmail.com](mailto:leshka.vlasov@gmail.com)

*В процессе работы магнитожидкостного герметизатора в результате нагрева ухудшаются магнитные свойства жидкости и могут возникать течения под зубцами полюса. Для исследования влияния температуры на изменение моментов трения в рабочем зазоре магнито-жидкостных уплотнений была спроектирована и изготовлена установка. С помощью программы ANSYS выполнен тепловой анализ, позволяющий проанализировать процессы, происходящие в магнитожидкостном герметизаторе при его эксплуатации, а также оптимизировать его конструкцию.*

**Ключевые слова:** магнитожидкостный герметизатор, температурный режим, теплопроводность, рабочий зазор, момент трения.

В процессе работы магнитожидкостного герметизатора в нем выделяется тепловая энергия за счет вязкостного трения слоев магнитной жидкости (МЖ). Нагрев МЖ существенно влияет на работоспособность герметизатора. Вследствие нагрева ухудшаются магнитные свойства жидкости и могут возникать течения под зубцами полюса. При создании тяжело нагруженных уплотнений (большие линейные скорости и



магнитные поля, высокие температуры, плохая теплоотдача) в рабочем зазоре могут создаваться температуры, существенно влияющие на свойства МЖ и ее поведение в зазоре герметизатора.

Для исследования влияния температуры на изменение моментов трения в рабочем зазоре магнитно-жидкостных уплотнений была спроектирована и изготовлена установка [1]. В целях проведения теплового анализа для таких задач, как стационарная теплопроводность, неустановившийся температурный режим, расчет температурных напряжений и деформаций [2], выбран программный комплекс ANSYS, разработанный для решения прикладных задач численными методами [3].

В процессе работы уплотнение нагревается до 60 °С. Для решения задачи распределения температуры приняты следующие условия: начальная температура нагрева уплотнения 60 °С, температура окружающей среды 22 °С, время охлаждения 30 мин. Расчетная геометрическая модель уплотнения представлена на рис 1.

После проведения настройки программы ANSYS для решения задачи теплораспределения в рабочем зазоре магнитно-жидкостных уплотнений рассчитано распределение температуры (рис. 2).

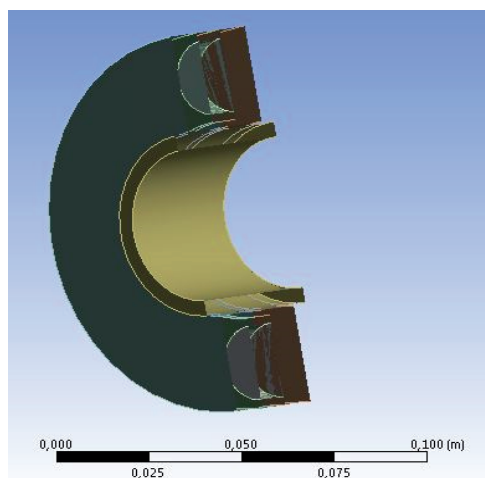


Рис. 1. Геометрическая модель магнитно-жидкостного уплотнения

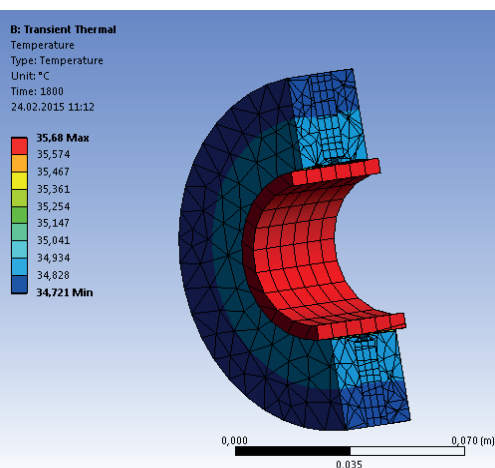


Рис. 2. Распределение температуры в магнитно-жидкостном уплотнении

Общая картина распределения температуры позволяет более подробно проанализировать процессы, происходящие в магнитножидкостном герметизаторе при его эксплуатации, а также оптимизировать его конструкцию.

### Литература

- [1] Власов А.М., Полетаев В.А. Исследование влияния температуры на изменение моментов трения в рабочем зазоре магнитожидкостных устройств. *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологий. Материалы международной научно-технической конференции (XVIII Бенардосовские чтения)*. Иваново, 2015, с. 319–322.

- [2] Власов А.М., Полетаев В.А. Расчет моментов трения в магнитожидкостных устройствах при гидродинамической (жидкостной) смазке. *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии Материалы международной научно-технической конференции (XVIII Бенардосовские чтения)*. Иваново, 2015, с. 288–290.
- [3] Власов А.М., Голяс А.А., Полетаев В.А. Применение программы ANSYS для теплового анализа магнитожидкостного герметизатора. *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии Материалы международной научно-технической конференции (XVIII Бенардосовские чтения)*. Иваново, 2015, с. 337–341.

УДК 622.232

## **К вопросу определения положения выходного звена шахтного манипулятора с учетом внецентренного приложения нагрузки**

© Гальченко Константин Викторович, Лукиенко Леонид Викторович

Россия, г. Новомосковск, Новомосковский институт (филиал)  
Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

[lukienko\\_lv@mail.ru](mailto:lukienko_lv@mail.ru)

*Рассмотрены вопросы внедрения в состав щитового проходческого комплекса манипулятора для крепления выработки, обладающего повышенной точностью позиционирования доставляемого груза и расширенной зоной обслуживания при необходимой и достаточной металлоемкости и повышенной надежности.*

**Ключевые слова:** *манипулятор, нагрузка, кинематические параметры, щитовой тоннелепроходческий комплекс.*

В связи со значительным увеличением транспортных потоков в современных городах резко возрастает необходимость развития подземного транспорта. Строительство дополнительных линий метро способствует решению данной проблемы. Только по программе развития московского метрополитена до 2020 г., планируется построить 160 км линий метро и 78 новых станций согласно постановлению правительства Москвы от 4 мая 2012 г. № 194-ПП «Об утверждении Перечня объектов перспективного строительства московского метрополитена в 2012–2020 годах». Строительство осуществляется при помощи щитовых проходческих комплексов [1].

Одной из основных операций, которые выполняет щитовой проходческий комплекс, является механизированное крепление проводимых горных выработок. В настоящее время для выполнения данной операции не разработано единого конструктивного решения, позволяющего механизировать эту операцию, повысить эффективность работы и снизить трудозатраты обслуживающего персонала.

Для устранения этих недостатков необходимо внедрение в состав щитового проходческого комплекса манипулятора для крепления выработки, обладающего повышенной точностью позиционирования доставляемого груза и расширенной зоной

обслуживания при необходимой и достаточной металлоемкости и повышенной надежности.

Анализ геометрических параметров шахтного манипулятора [2] показал, что необходимо вывести уравнение движения выходного звена с целью определения основных кинематических параметров работы манипулятора.

Положение выходной точки манипулятора ( $D$ ) математически может быть описано двумя координатами: длиной отрезка  $d$  и значением угла  $\gamma$  (полярная система координат).

Расчетная схема манипулятора (рис. 1) состоит из захвата, трех рычажных звеньев ( $a$ ,  $b$  и  $c$ ), взаимное положение которых определяется гидроцилиндрами  $g$  и  $k$ , базовой плиты (точка  $A$ ) [3].

С помощью математических преобразований используя геометрические законы, получим уравнение отрезка  $d$ :

$$d = \frac{2a \cos \gamma \pm \sqrt{4a^2 \cos^2 \gamma - 4(a^2 - b^2 - c^2 + 2bc \cos \beta)}}{2},$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — длина звеньев манипулятора;  $\beta$  — угол между звеньями  $b$  и  $c$ ;  $\gamma$  — угол между звеньями  $a$  и  $d$ .

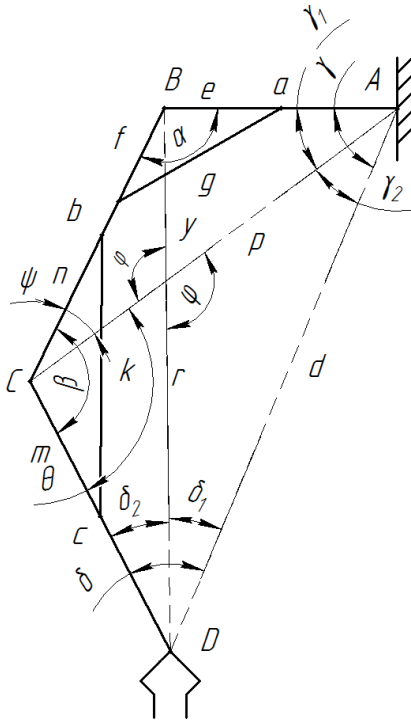


Рис. 1. Расчетная схема манипулятора

При нахождении углов  $\beta$  и  $\gamma$  необходимо учитывать, что движение осуществляется посредством гидроцилиндров, для этого вводим  $\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{e^2 + f^2 - g^2}{2fe}\right)$  — угол

между звеном  $a$  и  $b$ ;  $\beta = \cos^{-1}\left(\frac{k^2 - n^2 - m^2}{2nm}\right)$  — угол между звеном  $b$  и  $c$ ;  $e, f, n, m$  —

расстояние от соединения звеньев манипулятора до крепления гидроцилиндров (постоянная величина);  $g, k$  — длина гидроцилиндра, зависящая от положения штока (переменная величина).

Представленные результаты будут использованы при проведении дальнейших исследований и построения математической модели движения шахтного манипулятора для крепления горных выработок щитового тоннелепроходческого комплекса.

### Литература

- [1] Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щеголевский М.М., Поляков Ал.В., Поляков Ан.В. *Щитовые проходческие комплексы*. Москва, Горная книга, 2009, 447 с.
- [2] Червяков Г.Г. Основы автоматизации технологических процессов. *Международный журнал фундаментальных и прикладных исследований*, 2012, № 9, с. 96.
- [3] Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Жмуров В.В. Оценка продольной жесткости гидроцилиндра. *Научный журнал Братского государственного университета*, 2011, № 1 (9), с. 31–35.

УДК 621.833

## Современные методы исследования наследственной природы технологических остаточных напряжений зубьев спирально-конических шестерен

© Горбунов Александр Сергеевич, Макаров Владимир Федорович

Россия, г. Пермь, ОАО «Редуктор-ПМ»

[gorbunov-as@reductor-pm.com](mailto:gorbunov-as@reductor-pm.com)

*Рассмотрена задача проектирования такого технологического процесса, при котором создаются геометрические, физико-механические и химические свойства поверхностного слоя, обладающего максимально положительными эксплуатационными свойствами в рабочих условиях. Для выявления наследственной природы возникновения остаточных технологических напряжений проведены сравнительные экспериментальные исследования методами разрушающего и неразрушающего (рентгеноструктурный анализ) контроля.*

**Ключевые слова:** свойства поверхностного слоя, остаточные технологические нагружения, метод разрушающего контроля, метод неразрушающего контроля.

Надежность авиационного двигателя во многом зависит от эксплуатационных свойств зубчатых передач коробки приводов, которые работают в тяжелых условиях агрессивных сред, повышенных температур и знакопеременных нагрузок. Эти условия работы способствуют образованию поверхностных микротрещин, развитию в дальнейшем усталостных трещин и возможному разрушению зубчатых колес в эксплуатации.

Известно, что усталостное разрушение детали чаще всего начинается с поверхностного слоя, поэтому качеству поверхностного слоя зубчатых колес необходимо уделять особое внимание в процессе их изготовления [1]. Основные параметры качества поверхностного слоя деталей формируются последовательно на всех стадиях и операциях технологического процесса. На каждой технологической операции происходит изменение этих параметров. Явление переноса качественных характеристик поверхностного слоя с операции на операцию, которое сказывается в дальнейшем на эксплуатационные характеристики, называется технологической наследственностью [2]. Изменение свойств и структуры поверхностного слоя при проведении технологических операций может иметь положительный или отрицательный характер. Поэтому ставится задача проектирования такого технологического процесса, при котором создаются геометрические, физико-механические и химические свойства поверхностного слоя, обладающего максимально положительными эксплуатационными свойствами в рабочих условиях.

В работе [3] установлено, что в процессе эксплуатации спирально-конических шестерен максимальные рабочие напряжения, приводящие к усталостному разрушению зубьев, сосредоточены в переходной зоне на стыке двух поверхностей: впадины и боковой поверхности зуба, имеющих разную технологическую последовательность операций.

Предложено для снижения воздействия отрицательных факторов технологической наследственности ввести дополнительную операцию дробеструйной обработки (ППД) этой переходной зоны. Основным эффектом предполагается в том, что образующиеся в поверхностном слое металла микротрещины при пластической деформации сжимаются и поверхность становится более однородной и цельной. Поверхностная пластическая деформация позволит выровнять физико-механические свойства в смежных зонах поверхностей, обработанных по разным технологическим процессам. Таким образом, остаточные напряжения сжатия, целенаправленно закладываемые при дробеструйной обработке в поверхности впадин зубьев, снизят вероятность образования усталостных трещин на стыке двух поверхностей, и как следствие повысят предел выносливости зубьев.

Для выявления наследственной природы возникновения остаточных технологических напряжений были проведены сравнительные экспериментальные исследования методами разрушающего (Н.Н. Давиденкова) и неразрушающего (рентгеноструктурный анализ) контроля. Дополнительно для выявления взаимосвязи остаточных напряжений и сопротивления усталости определен предел выносливости зубьев спирально-конических шестерен на вибрационном электродинамическом стенде.

Для определения остаточных напряжений (ОН) спроектированы и вырезаны специальные образцы из впадины конического зубчатого колеса (рис. 1). Образцы вырезались последовательно после выполнения каждой из операций на электроэрозионном станке.

Методом Давиденкова получены остаточные напряжения на глубине до 200 мкм. Данный метод позволяет выявить полную картину распределения оста-

точных напряжений в поверхностном слое по знаку, величине и глубине залегания напряжений.

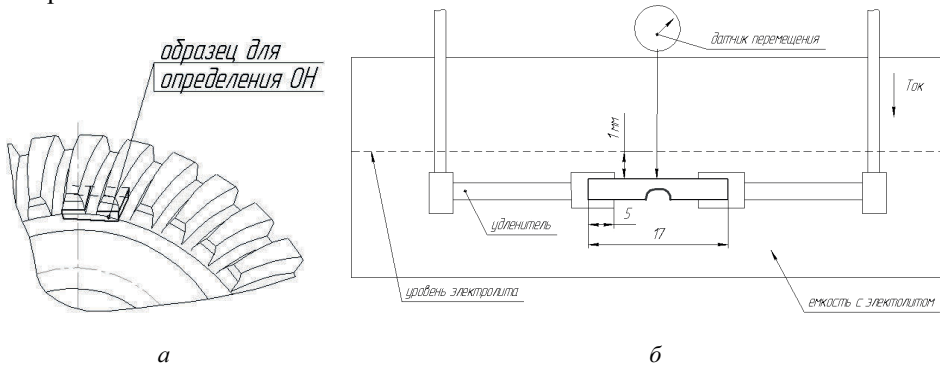


Рис. 1. Фото образца из впадины зуба (а) и схема определения ОН (б)

Результаты измерений характера изменения остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  во впадине спирально-конического зубчатого венца по глубине поверхностного слоя  $h$  по-сле различных видов обработки приведены на рис. 2.

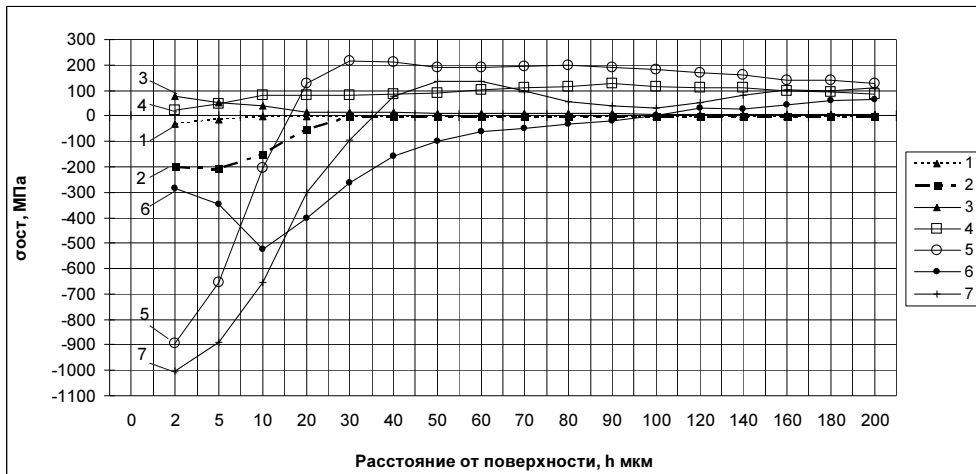


Рис. 2. Характер распределения остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  на дне впадины при различной обработке

Образцы исследовались после проведения следующих операций:

- 1) зубонарезание;
- 2) зубонарезание → полирование;
- 3) зубонарезание → полирование → нитроцементация;
- 4) зубонарезание → полирование → нитроцементация → закалка;
- 5) зубонарезание → полирование → нитроцементация → закалка → обдувка песком;
- 6) зубонарезание → полирование → нитроцементация → закалка → ППД;

7) зубонарезание → полирование → нитроцементация → закалка → обдувка песком → ППД.

По результатам анализа измерения остаточных напряжений методом Давиденкова установлено, что наиболее благоприятная картина распределения сжимающих остаточных напряжений наблюдается после выполнения операции закалки с последующим упрочнением впадины зуба микрошариками.

Остаточные напряжения определялись методом рентгеноструктурного анализа (неразрушающий метод) с помощью роботизированного анализатора напряжений XStress Robot (рис. 3). Метод основан на технологии рентгеновской дифракции, которая использует межатомное расстояние в качестве основной измерительной базы. Для данного метода применялись аналогичные образцы. Рентгеноструктурный анализ обеспечивает высокую точность и позволяет измерять поверхностные остаточные напряжения на глубине до 10 мкм без разрушения детали. Поэтому сравнительный анализ остаточных напряжений, полученных двумя методами, выполнен для глубины  $h = 10$  мкм и представлен в виде гистограммы на рис. 4.

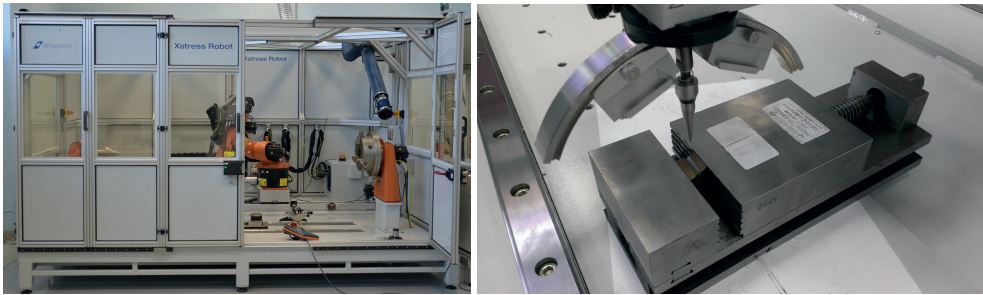


Рис. 3. Роботизированный комплекс XStress Robot

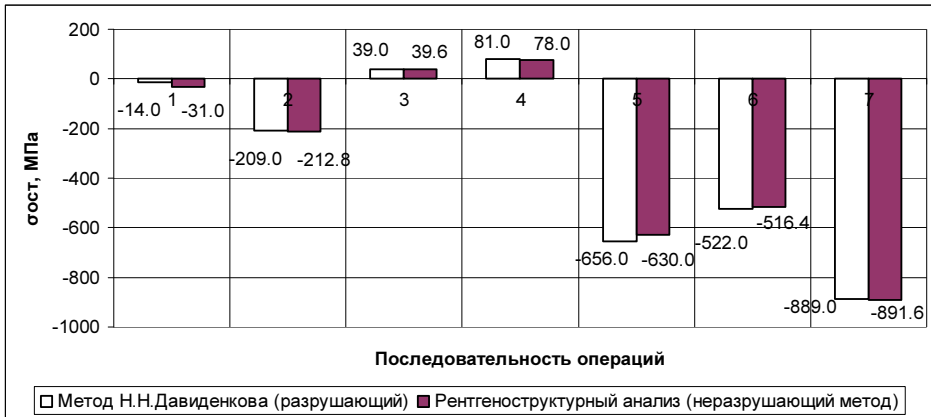


Рис. 4. Результаты сравнительных исследований остаточных напряжений во впадинах спирально-конических шестерен

Достоверность результатов технологических остаточных напряжений, полученных разрушающим методом Давиденкова, подтверждается близкими значениями напряжений, полученных неразрушающим методом рентгеноструктурного анализа.

Для определения влияния последовательности выполнения технологических операций на усталостную прочность были проведены испытания образцов, вырезанных из зубьев спирально-конических шестерен, изготовленных по трем разным технологическим процессам.

Для сравнительной оценки сопротивления усталости по трем вариантам использовался метод «ступенчато увеличивающейся нагрузки» [4]. База сравнительных испытаний 20 млн циклов, частота 625 Гц. В каждой серии испытано по 10 образцов.

По результатам усталостных испытаний (рис. 5) установлено, что наибольший предел выносливости  $\sigma_{-1} = 41$  кгс/мм<sup>2</sup> имеют образцы № 3 с применением упрочнения дробью, что выше на 15 % по сравнению с серийным маршрутом обработки.

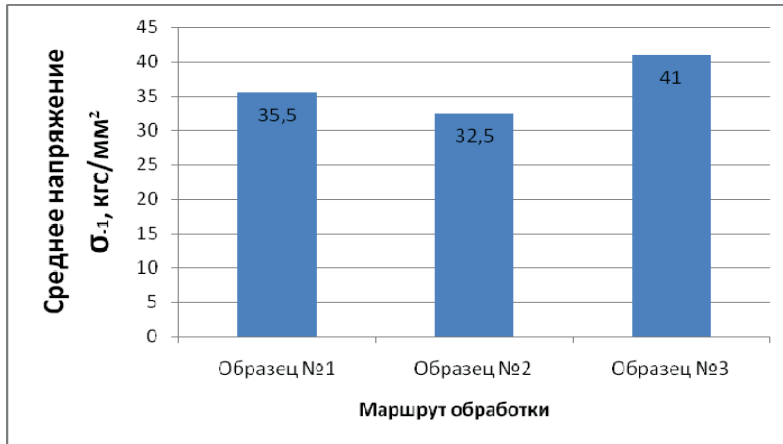


Рис. 5. Гистограмма влияния маршрута обработки на усталостную прочность

Анализ экспериментальных данных показал:

1) остаточные напряжения имеют наследственную природу. Пришедшая с предыдущей операции совокупность параметров качества поверхностного слоя проявляются в настоящем, требуя учета в особенностях функционирования технологических систем;

2) управлять величиной и характером распределения остаточных напряжений возможно путем введения ППД после определенной последовательности операций. Остаточные напряжения сжатия, закладываемые дробеструйной обработкой, для устранения негативного влияния технологической наследственности, повышают предел выносливости зубьев на изгиб на 20 %.

### Литература

- [1] Макаров В.Ф., Горбунов А.С. Повышение качества и надежности зубьев спирально-конических шестерен технологическими методами. *Вестник УГАТУ*, 2012, № 4, с. 8–12.
- [2] Дальский А.М., ред. *Технологическая наследственность в машиностроительном производстве*. Москва, Изд-во МАИ, 2000, 364 с.
- [3] Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Повышение ресурса и надежности работы спирально-конических шестерен путем применения упрочняющей обработки с учетом влияния техно-



логической наследственности. *Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Современные наукоемкие технологии и инструменты в машиностроении»*. Санкт-Петербург, 2014, с. 369–378.

- [4] Макаров В.Ф., Горбунов А.С. Исследование влияния технологической наследственности при обработке зубьев шестерен на качество поверхностного слоя и усталостную прочность. *Надежность и качество*, 2013.

УДК 621.002

## **Реализация алгоритма вариативно-ситуационного формирования маршрутных процессов ремонта деталей**

© Золотарев Алексей Владимирович, Кондаков Александр Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[zolotaryov\\_av@mail.ru](mailto:zolotaryov_av@mail.ru)

*Рассмотрен методический подход к решению задачи ситуационного управления ресурсами при ремонте деталей металлургического оборудования. Представлен концептуальный алгоритм вариативно-ситуационного формирования маршрутных процессов ремонта деталей. Выполнена методическая и программная реализация работы алгоритма. Проведен расчет затрат на выполнение операций и транспортировку, определены оценки качества.*

**Ключевые слова:** ремонт оборудования, ситуационное управление, управление ресурсами.

Для ремонтного комплекса (РК) металлургического оборудования характерны ситуации, при которых возникает необходимость проведения срочных внеплановых ремонтов. На ремонт поступают детали повторяющейся номенклатуры, имеющие различные дефекты ограниченного перечня [1, 2]. На основании данной информации можно сформировать список типовых дефектов, характерных для заданной номенклатуры ремонтируемых деталей.

Текущая производственная ситуация в РК определяется загрузкой имеющихся в наличии средств технологического оснащения и их состоянием. При срочном ремонте использование типовых маршрутно-технологических процессов (МТП) обуславливает нерациональное использование производственных ресурсов.

Задача ситуационного управления ресурсами при ремонте деталей металлургического оборудования в РК может быть сформулирована следующим образом: для каждой детали, имеющей уникальный набор типовых дефектов, поступающей на ремонт, сформировать МТП ремонта, обеспечивающий устранение всех выявленных дефектов с заданной надежностью и являющийся наиболее предпочтительным среди возможных процессов ремонта по заданному критерию качества. Методический подход к решению задачи рассмотрен в [3].

В процессе работы над решением задачи был сформулирован концептуальный алгоритм вариативно-ситуационного формирования МТП ремонта деталей (рис. 1).

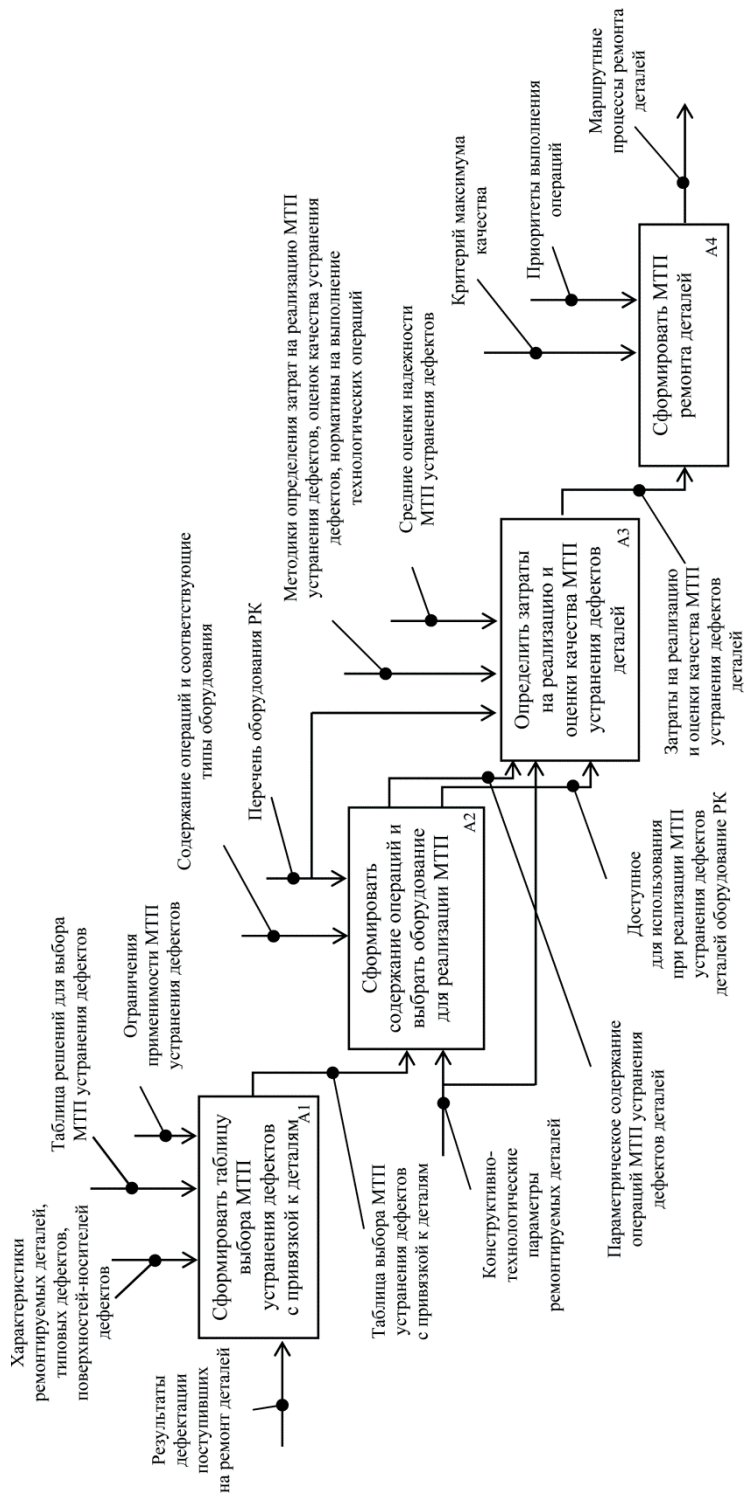


Рис. 1. Концептуальный алгоритм вариативно-ситуационного формирования МТП ремонта деталей

Программная реализация работы алгоритма выполнена на базе Windows-приложения МТР.exe, разработанного с помощью языка программирования Pascal в среде Borland Delphi 7. В программе определяются затраты на реализацию альтернативных МТП устранения дефектов деталей, оценки качества, и оптимальные маршруты движения по РК. Результатом работы программы являются маршрутные процессы ремонта деталей. Таким образом, в результате формирования альтернативных МТП устранения дефектов деталей и их селекции впоследствии возможно синтезировать оптимальный с точки зрения производительности и временных затрат МТП ремонта. Это эффективно при необходимости интенсификации процессов ремонта и повышения их вариативности.

Залогом практической реализации данного подхода является предварительное создание баз знаний ремонтируемых деталей, возможных типовых дефектов, МТП их устранения, оборудования РК с информацией о доступности в текущий момент, что возможно при автоматизированной подготовке производства в РК.

Ситуационное управление ресурсами должно обеспечивать их минимальное расходование, достаточное для гарантированного достижения заданного качества ремонта деталей фиксированной номенклатуры.

#### Литература

- [1] Мазур Н.В. *Повышение стойкости роликов МНЛЗ на основе результатов исследования и моделирования процессов при их изготовлении, восстановлении и эксплуатации*. Дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2009, 162 с.
- [2] Тимошенко Ю.Г. *Разработка метода формирования параметров долговечности элементов технологического комплекса непрерывного литья заготовок*. Дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк, 2006, 188 с.
- [3] Кондаков А.И., Золотарев А.В. Автоматизация управления ресурсами при ремонте деталей металлургического оборудования: справочник. *Инженерный журнал с приложением*. 2013, № 7 (196), с. 35–39.

УДК 65.015.12

### **Повышение эффективности современных машиностроительных предприятий по программе технического перевооружения (на примере АО «ВНИИ “Сигнал”»)**

**© Клеветова Елена Михайловна, Клеветов Денис Викторович,  
Гаврилова Вероника Сергеевна**

Россия, Владимирская обл., г. Ковров,  
АО «Всероссийский научно-исследовательский институт “Сигнал”»

[denis\\_klevetov@list.ru](mailto:denis_klevetov@list.ru)

*В настоящее время множество отечественных предприятий сталкиваются с проблемой нехватки производственных мощностей и большой долей имеющегося универсального станкопарка. При условии положительной динамики экономического*

роста предприятия и увеличения загрузки производства одним из подходов к повышению эффективности является программа технического перевооружения. Проанализирована ситуация на примере отечественного предприятия в части производственного сектора. Показано, что в структуре выручки услуги производственного характера являются существенными. Исследована стратегия развития предприятия и его нынешнее состояние. При этом выявлено, что при проведении технического перевооружения эффект от проводимых мероприятий будет более значимым. Даны рекомендации по подбору оборудования для реализации программы и повышения эффективности деятельности.

**Ключевые слова:** техническое перевооружение, производственный сектор, выручка, эффективность, повышение эффективности деятельности.

Значительное влияние на качество образа жизни оказывает материальная среда – качество товаров и услуг. Поэтому проблема качества продукции и услуг была и остается актуальной. Она является стратегической проблемой, от решения которой зависит стабильность экономики нашего государства. Процесс улучшения качества, объединяющий деятельность многих производств, коллективов конструкторов, сферы услуг, необходим не только для получения прибыли при сбыте товаров и услуг, но главное — обществу в целом и его интересам.

В настоящее время многие машиностроительные предприятия с годовыми оборотами 10...15 млрд руб. ощущают острую нехватку прогрессивных технологий производства и выпуска качественной продукции из-за большой доли универсального (без ЧПУ) и морально устаревшего оборудования. Существующие производственные мощности с трудом позволяют поддерживать заявленное качество выпускаемой продукции. Вариантами решения данной проблемы может стать как модернизация существующего оборудования, в том числе и капитальный ремонт, так и комплексные программы технического перевооружения.

Предложенные мероприятия должны повлиять не только на увеличение скорости выпуска продукции, но и на качественное изменение ведения технологических процессов. В целом прогнозируемый эффект от проведения мероприятия составляет 15...20 %. Проанализируем повышение эффективности произведем на примере предприятия ОА «ВНИИ «Сигнал» (г. Ковров, Владимирская обл.). Данное предприятие специализируется на работах в области машиностроительного комплекса.

Рассматривая производственные мощности ОА «ВНИИ «Сигнал»», можно выделить в составе опытного производства отдельные участки механообработки. Участки механообработки, которые выполняют все основные виды обработки на универсальных станках и станках с ЧПУ, обеспечивают изготовление из черных и цветных металлов детали-сборочных единиц (ДСЕ) с габаритами до 1 м, до 5–6 квалитета точности и высокими требованиями по отклонениям форм и расположений поверхностей. Характер производства в основном многоменклатурный, мелкосерийный и штучный, в том числе с большим количеством ДСЕ на новые опытные изделия.

Для определения возможностей внедрения предложенных мероприятий по техническому перевооружению проведем анализ технико-экономических показателей предприятия — системы измерителей, характеризующей материально-производственную базу предприятий и комплексных ресурсов. Эти показатели применяются для планирования и анализа организации производства и труда, уровня техники, качества продукции использования основных и оборотных фондов, являются основой для установления технико-экономических норм и нормативов [1]. При

проведении финансового анализа использовались данные бухгалтерской отчетности организации (бухгалтерский баланс и отчет о прибылях и убытках) в период 2011–2014 года [2]. Динамика основных показателей деятельности предприятия представлена в таблице.

Динамика показателей деятельности предприятия

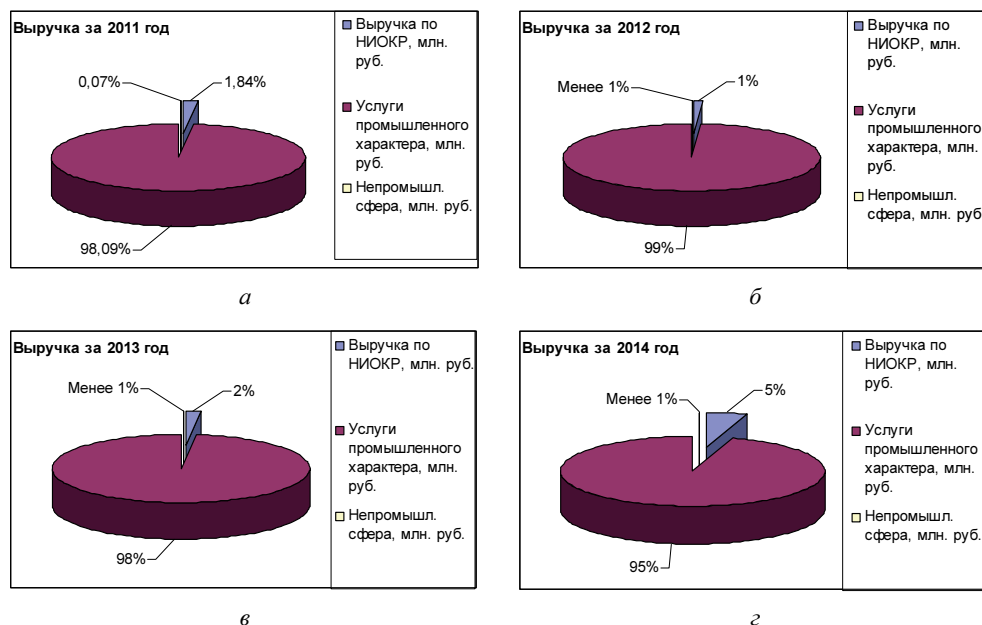
Экономический показатель предприятия	Единицы измерения	Отчетный период			
		2011	2012	2013	2014
Выручка от реализации	млн руб.	9 696,8	11 155,28	6 893,85	6 553,51
Выработка на 1 сотрудника по выручке	млн руб.	5,2	6,0	3,69	3,40
Средняя численность работающих	чел.	1 848	1 858	1 870	1925
Прибыль от продаж	млн руб.	3 222,0	4 203,8	1 470,22	962,72
Прибыль от продаж на 1 сотрудника	млн руб.	1,74	2,26	0,79	0,50
Чистая прибыль	млн руб.	2 544,1	3 529,3	1 494,09	3 156,93
Рентабельность по чистой прибыли	%	26,2	31,6	21,7	48,2
Среднемесячная заработная плата	тыс. руб.	29,4	32,0	36,4	38,0
Чистые активы	млн руб.	3 521,88	7 177,81	8 941,41	11 140,13
Коэффициент текущей ликвидности		1,23	2,92	2,55	3,42

В 2011–2012 годах наблюдалась положительная тенденция роста выручки от реализации продукции: темп роста составлял 115 % по сравнению с 2011 г. В 2013 г. выручка от реализации продукции уменьшилась на 38,2 %. В 2014 г. также отмечается снижение выручки от реализации продукции на 4,94 %, что вызвано временным снижением объема заказов. Одновременно следует отметить и качественное изменение — в части роста объема чистой прибыли. Она увеличилась в 2,11 раза в 2014 г. относительно 2013 г. и составила 3 156,93 млн руб. Однако проведение программы технического перевооружения позволяет не только обновить производственные мощности, но и получить новые возможности для привлечения дополнительных объемов заказов наряду с проведением новых НИОКР и овладение новыми технологическими возможностями для их реализации.

Для сохранения темпа развития и сохранения притока денежных средств в бюджет предприятия необходима диверсификация поступления денежных потоков. Для комплексного анализа рассмотрим структуру формирования выручки за 2011–2014 годы и представим полученные данные в виде диаграмм (рис. 1), на которых наглядно видно процентное соотношение доли выбранного сегмента в общем объеме выручки за рассматриваемые периоды.

Анализируя данные, предоставляется возможность, выделить доминирующий сегмент из общей выручки предприятия — услуги промышленного характера. Однако, рассмотрев динамику долевого распределения отобранных показателей, выявляется тенденция возрастания доли выручки и от НИОКР — до 5 % в 2014 г. Очевидно, что улучшая ситуацию в промышленном секторе предприятия, возможно получение явного видимого эффекта от проведения мероприятий по повышению эффективно-

сти. При этом очевидно постоянное увеличение размера чистых активов: темп роста в 2014 г. составил 124,6 %, что также является положительной тенденцией деятельности предприятия.



**Рис. 1.** Выручка предприятия, %:  
 а — 2011 г.; б — 2012 г.; в — 2013 г.; г — 2014 г.

В 2012 г. коэффициент текущей ликвидности увеличился на 1,69, и составил 2,92. В 2013 г. произошло снижение на 0,37 пунктов. В 2014 г. наблюдалось увеличение коэффициента текущей ликвидности на 0,87 пунктов до значения 3,42. При этом коэффициент за весь анализируемый период оставался в диапазоне нормативного значения (более 2), что свидетельствует о платежеспособности предприятия. Рост чистых активов и поддержания объема чистой выручки свидетельствует об устойчивом и динамичном развитии предприятия. Однако при этом следует отметить необходимость принятия мер по снижению затрат по накладным расходам. Настоящие требования возможно достичь путем более широкого внедрения современных средств автоматизации проектирования испытаний и исследований, применения новых технологий изготовления продукции. Одним из вариантов реализации данных мероприятий и, как следствие, повышения эффективности является проведение комплексных проектов технического перевооружения, позволяющих совершить качественный и количественный скачок.

Проведение проектов технического перевооружения – одна из программ собственного развития предприятия, позволяющая выйти на более качественный уровень [3]. Проанализировав перспективу развития предприятия до 2020 г. (рис. 2) видно, что произойдет рост по объему производства и общего числа заказов, что, несомненно, отразится на увеличении нагрузки вспомогательных подразделений.

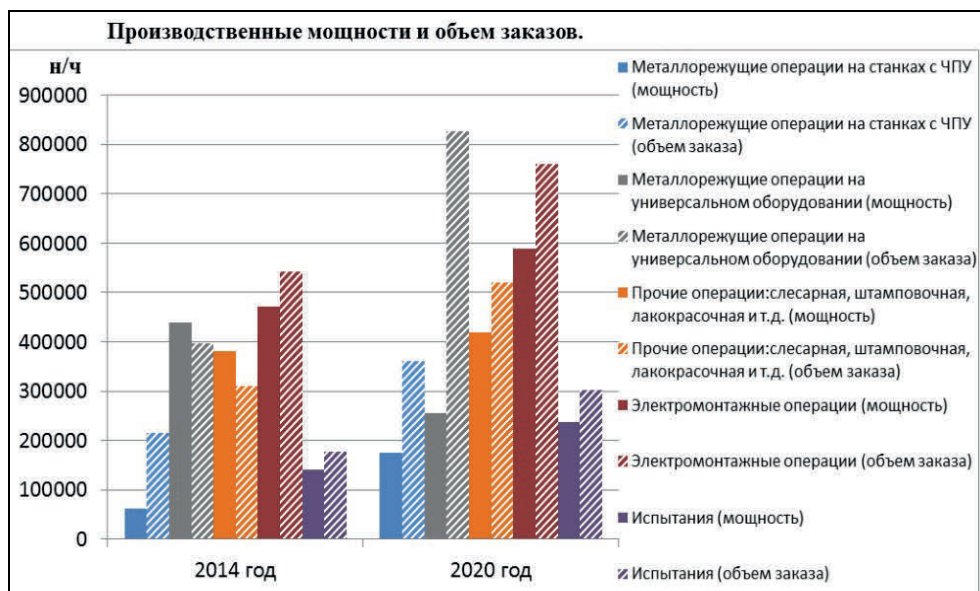


Рис. 2. Перспективный план роста объемов загрузки производственных мощностей

Исходя из анализа производственных мощностей на 2014 г. можно отметить, что «узким местом» по механообработке пока остаются металлорежущие операции на станках с ЧПУ. Исходя из объемов перспективной загрузки, увеличение работ по механообработке к 2020 г. составит + 562 114 н/ч (или +91,4 % к объемам 2014 г.).

Проводя качественный и количественный анализ технологического оборудования в сфере механообработки, можно констатировать, что средняя степень износа оборудования по состоянию на 2013 г. — 68 %, при этом максимальная степень износа у групп универсального оборудования, составляющих пока основную производственную инфраструктуру рассматриваемого предприятия.

Согласно проведенному анализу состояния производственных мощностей, финансового состояния и перспектив развития предприятия можно сделать вывод, что программы технического перевооружения однозначно позволят не только повысить эффективность деятельности предприятия, но и справиться с перспективными планами загрузки. С учетом малой серийности и значительной номенклатуры ДСЕ предпочтительно приобретать многофункциональные обрабатывающие центры с ЧПУ и объединять их в группах по технологическому признаку (токарные, токарно-фрезерные, фрезерные и т. д.) с учетом возможности взаимозаменяемости по технологической оснастке. Это позволит сократить затраты на технологическую оснастку и более гибко управлять загрузкой оборудования и движением деталей в процессе изготовления.

На рассматриваемом предприятии программа технического перевооружения проводится с 2011 г. Анализ оборудования, заложенного к приобретению по данной программе, показал, что оно полностью отвечает выявленным требованиям, а реализация проекта технического перевооружения подтверждает правильность выработанных рекомендаций.

## Литература

- [1] Ковалев А.И., Привалов В.П. *Анализ финансового состояния предприятия*. Москва, Центр экономики и маркетинга, 2000, с. 215.
- [2] *Центр раскрытия корпоративной информации. Бухгалтерская отчетность АО «ВНИИ “Сигнал”*. URL: <http://e-disclosure.ru/portal/files.aspx?id=26810&type=3> (дата обращения 28.05.2015).
- [3] Шайхулова А.Ф. Методы управления инновационными проектами технического перевооружения производства в машиностроении с использованием средств функционального и динамического моделирования. *Мат. VI Всерос. науч.-практ. конф. «Машиностроение — традиции и инновации» (МТИ – 2013). Сб. докл.* Москва, МГТУ «Станкин», 2013, 313 с.

УДК 621.833.52

## Особенности формообразования зубьев зубчатых колес на заготовке вида однополостной гиперболоид вращения

© Кротов Антон Олегович, Печенкин Михаил Владимирович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[anton1krotov@gmail.com](mailto:anton1krotov@gmail.com)

*Показано, что существенное изменение профиля зуба по сечениям, перпендикулярным оси вращения гиперболоидного зубчатого колеса, наличие выпуклых и вогнутых участков существенно затрудняет обработку традиционными методами зубонарезания. Анализ кинематики формообразования с использованием традиционных схем зубонарезания зубчатых колес обуславливает интерферирование инструмента и заготовки в месте резкого изменения кривизны боковой поверхности зуба. Формообразование боковой поверхности зубчатых колес на основе однополостного гиперболоида вращения можно выполнить концевой фрезой с использованием 5-координатных станков с ЧПУ. При формировании управляющей программы необходимо вводить алгоритм управления ориентацией инструмента при обработке боковой поверхности зубьев, что повысит производительность зубонарезания.*

**Ключевые слова:** гиперболоидные зубчатые колеса, кинематика формообразования зубьев колес, обработка на станках с ЧПУ.

Решение задач формообразования, как правило, начинается с описания исходных поверхностей образующими и направляющими линиями, которые рассматриваются как их производящие линии или криволинейные координаты [1].

Образующая линия зубчатой передачи на заготовке вида однополостной гиперболоид вращения, как правило, представляет собой прямую линию, но может быть и криволинейной (дугой окружности, эллипса, эвольвентой) [2, 3]. При использовании прямолинейной образующей линии ее параметры могут быть рассчитаны с учетом



параметров зубчатого колеса (модуль, межосевое расстояние, число зубьев и т. д.). Наиболее сложной задачей формообразования зубьев является определение и практическая реализация направляющей линии. Сложность заключается в том, что направляющая по длине зуба изменяет свое положение как по высоте зуба, так и по его длине, переменными являются и окружной модуль и окружной шаг зубьев, поэтому переменна и толщина зуба [3]. В работе [3] такие зубчатые колеса названы гиперболоидными зубчатыми колесами с зубьями двойной переменной кривизны. Указанные выше сложности определения направляющей линии зуба предопределили и технологические сложности — такие зубчатые передачи невозможно полностью изготовить методом копирования или обката. Именно поэтому гиперболоидные зубчатые колеса не изготавливаются в промышленности, а форма начальных и делительных поверхностей заменяется на приближенную (коническую, цилиндрическую и т. д.), что приводит к кинематическим погрешностям формообразования [4]. Для формообразования зубьев возможно сочетание методов — предварительная прорезка впадины одним из методов обработки зубьев и последующая чистовая обработка. Чистовая обработка из-за переменности окружного шага и модуля зубьев в настоящее время возможна только методом построчного снятия припуска после предварительной обработки на многокоординатных станках с ЧПУ. Для написания управляющей программы с помощью САМ-систем, как известно, необходима твердотельная геометрическая модель как зубчатого колеса, так и заготовки. Параметры заготовки могут быть подсчитаны по формулам, указанным в работе [3], а положение образующих линий зуба по его длине по зависимостям, приведенным в работе [5].

Однако построенные объемные геометрические модели заготовки и зубчатого колеса не позволяют эффективно обрабатывать такие зубья, так как по умолчанию обработка будет вестись построчно, в результате чего образуются межстрочные гребни [6]. Кроме того, боковая поверхность обработанных построчно зубьев может не удовлетворять предъявляемым к боковой поверхности зубьев требованиям по шероховатости поверхности, нормам бокового зазора зубьев. Производительность обработки можно существенно повысить, осуществляя обработку торцем концевой фрезы, однако, необходимо управление ориентацией фрезы двух ее угловых координат. При этом вследствие особенностей зубчатого колеса обработка возможна только на 5-координатных станках с ЧПУ, при 4-координатной обработке на участках боковой поверхности зубьев, удаленных от горловой части зубчатого колеса будут происходить «зарезы» боковой поверхности зуба из-за необходимости в еще одной управляемой координате станка.

Управление ориентацией инструмента можно производить по зависимостям, приведенным в работе [7]. При этом сначала рассчитывают положение годографа инструмента, а потом в управляющую программу Siemens NX в виде сплайна подставляют траекторию движения инструмента и осуществляют обработку зубьев. Следует отметить, что наиболее трудоемкой задачей в подготовке управляющей программы является ручной подсчет годографа инструмента, который, впрочем, может быть упрощен написанием специального макроса и интегрированием его в программу подготовки управляющих программ.

## Литература

- [1] Горбачев В.О. *Развитие моделей и алгоритмов формообразования сложных инструментальных и технологических поверхностей*. Дис. ... канд. техн. наук, Саратов, 2014,

- URL: <http://www.sstu.ru/upload/iblock/924/dissertatsiya-gorbacheva-v.o..pdf> (дата обращения 28.06.2015).
- [2] Печенкин М.В. Профильная модификация зубьев гиперболоидной передачи. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, 2007, № 2, с. 29–32.
- [3] Печенкин М.В. Моделирование многокоординатного формообразования фрезерованием зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны. Дис. ... канд. техн. наук, Казань, 2015, URL: [http://www.kai.ru/science/disser/files/file\\_97/text\\_diss.pdf](http://www.kai.ru/science/disser/files/file_97/text_diss.pdf) (дата обращения 28.06.2015).
- [4] Курылев Д.В., Лунев А.Н. Снижение кинематической погрешности при механической обработке межлопаточных каналов моноколеса кольцевым режущим инструментом. *Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности» (АКТО-2014)*, 5–8 августа 2014, с. 393–395.
- [5] Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Расчет положения производящих линий при формообразовании боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи. *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 6. URL: <http://www.science-education.ru/120-16410>.
- [6] Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Курылев Д.В. Моделирование глубинного фрезерования пространственно-сложных поверхностей деталей из условия обеспечения заданной высоты межстрочных гребешков в CAD/CAM системе Siemens NX. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, № 2, 2014, с. 108–111.
- [7] Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Кинематика формообразования боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи концевым инструментом. *Фундаментальные исследования*, 2014, № 12 (часть 11), с. 2310–2314, URL: <http://www.rae.ru/fs/pdf/2014/12-11/36686.pdf>.

УДК 621.385.6

## Оптимизация процессов механической обработки молибдена

© Курочкин Алексей Алексеевич

Россия, г. Фрязино, АО «Научно-производственное предприятие “Исток”  
имени А.И. Шокина»

[Truce-Envoy@mail.ru](mailto:Truce-Envoy@mail.ru)

*Приведены выводы проведенных исследований влияния материала режущего инструмента и его геометрии на процесс механической обработки молибдена и формирование стружки в процессе резания. Представлены результаты испытаний токарной обработки молибдена подобранным инструментом. Определены основные критерии по оптимальному выбору смазочно-охлаждающей жидкости для обработки молибдена. Приведены результаты апробации СОЖ, принятой за аналог трихлорэтилена, на различных токарных операциях.*

**Ключевые слова:** токарная обработка, молибден, трихлорэтилен, геометрия режущего инструмента.

АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина» — ведущее предприятие России по разработке и производству изделий вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники.

Одной из актуальных технологических задач при изготовлении деталей для вакуумных СВЧ приборов является обработка молибдена. При этом 70 % деталей из данного материала представляет собой тела вращения.

По физико-механическим свойствам молибден оптимально подходит для ряда деталей электровакуумных СВЧ приборов. Молибден является тугоплавким металлом с кубической объемно-центрированной решеткой, обладает хорошей формоустойчивостью при высоких эксплуатационных температурах. В зависимости от способа получения заготовок на выходе молибден получается с рядом взаимосвязанных параметров. Механическая обработка данного материала затруднительна, сопровождается сколами и расслоением материала вследствие крупнозернистой структуры, в зоне резания выделяется большое количество тепла. При обработке молибдена в качестве смазочно-охлаждающей технической среды (СОТС) используется трихлорэтилен (бесцветная, летучая жидкость), очень вредный для человека.

Инструмент, которым обычно проводится механическая обработка, быстро изнашивается вследствие большого выделения тепла в зоне резания. Вследствие этого сложно добиться требуемых линейных размеров. Инструмент часто перетачивается, что отрицательно влияет на производительность. Из-за скоротечного износа инструмента минимизировать отклонения формы детали не представляется возможным, поэтому повторяемость в серии невелика, трудозатратна и напрямую зависит от квалификации рабочего.

Вследствие переточек, геометрия инструмента не постоянна. Угол заострения обычно бывает максимально возможным для увеличения стойкости резца, что пагубно сказывается на формообразовании стружки. При точении формируется стружка надлома (отрицательно влияет на шероховатость поверхности), которая не удаляется из зоны резания, что также отрицательно влияет на качество обрабатываемой поверхности.

В качестве СОЖ применяется трихлорэтилен. В зависимости от выполняемой операции дополнительно используется черное масло (хлор парафин). Трихлорэтилен является обезжиривателем, за счет своей малой температуры кипения хорошо отводит тепло из зоны резания, но не способствует снижению сил трения на переднем и заднем углах резца в процессе точения. Доставка СОЖ осуществляется капельным методом локально по средствам нанесения на обрабатываемую поверхность кисточкой. Применение данной СОТС возможно исключительно на станках оборудованных специальными мощными вытяжками.

Для повышения качества токарной обработки молибдена и исключения негативных факторов, сопровождающих процесс его обработки, была проведена исследовательская работа, состоящая из двух этапов: 1) определение оптимального режущего инструмента для обработки молибдена; 2) подбор аналога трихлорэтилену в качестве СОТС, не обладающего вредоносными факторами для человека.

Был проведен анализ факторов, оказывающих влияние на качество получаемой поверхности детали, на поддержание постоянных геометрических параметров, таких как отклонение формы и поддержание линейных размеров в требуемом поле допуска. В результате проведенного анализа были выделены критерии, по которым подбирался оптимальный режущий инструмент.

По результатам анализа материалов, применяемых для изготовления режущего инструмента, был сделан выбор мелкодисперсного твердого сплава IC20. По сравне-

нию с керамикой и поликристаллическим алмазом, твердый сплав удовлетворяет ряду требований. Инструмент из мелкодисперсного твердого сплава хорошо воспринимает ударную нагрузку (заготовка многоугольного сечения), позволяет вести работы с применением СОЖ (переносимость термоудара), работает в относительно большом диапазоне по величине съема материала. Инструменту из подобного материала можно задать различную геометрию. При соблюдении рекомендаций по дисперсности порошка (0,2 мкм) и твердости (HRA 92,4 твердость по Роквеллу шкала А) сплава, из которого будет изготавливаться режущий инструмент, должно наблюдаться повышение стойкости режущей кромки, а выкрашивание свестись к минимуму.

Повышенная стойкость инструмента позволяет достичь требуемого линейного размера с минимальным отклонением формы обрабатываемой детали и повысить повторяемость изготавливаемых деталей.

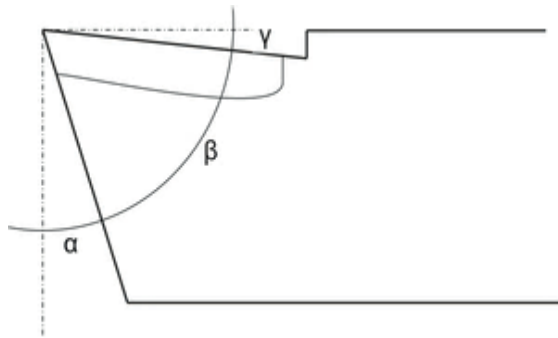


Рис. 1. Главная секущая плоскость

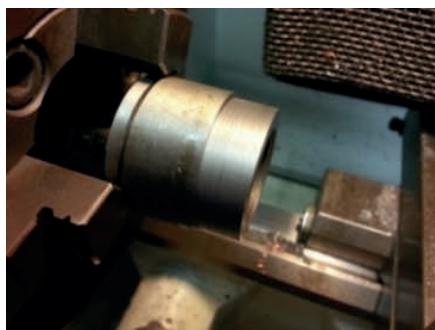
Главная секущая плоскость показана на рис. 1. Главный передний угол  $\gamma$  оказывает влияние на формирование стружки. Главный задний угол  $\alpha$  оказывает влияние на шероховатость обрабатываемой поверхности. Угол заострения  $\beta$  влияет на прочность.

Передняя поверхность направлена вниз от главной режущей кромки, передний угол  $\gamma$  в этом случае считается положительным.

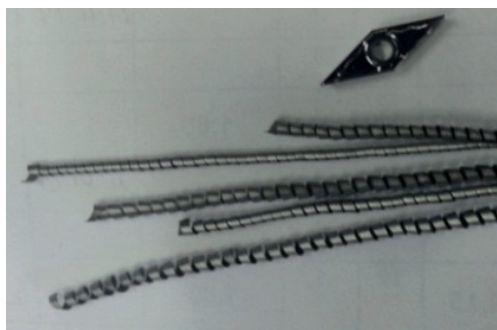
При анализе геометрии реза установлено, что оптимальные значения главного переднего угла  $\gamma$  составляет  $20^\circ$ , а главного заднего угла  $\alpha$  —  $7^\circ$ . Углы  $\gamma$  и  $\alpha$  характерны для обработки мягких материалов.

Была проведена апробация инструмента, выбранного по определенным выше признакам, результатом которой стало внедрение резцов со сменными пластинами из мелкодисперсного твердого сплава с геометрией режущей части, не свойственной принятой за основу ранее для обработки молибдена. Обработка велась с применением обычной синтетической СОЖ Mobil Cut из 230 серии.

При использовании инструмента из мелкодисперсного твердого слоя отмечено образование сливной стружки, полное ее удаление из зоны резания в процессе обработки (рис. 2). Также отмечено снижение шероховатости обрабатываемой поверхности ( $Ra$  1,25) и повышение стойкости режущей кромки, по сравнению с ранее используемым инструментом.



а



б

**Рис. 2.** Обрабатываемая заготовка (а) и вид стружки, сформированной в процессе обработки (б)

При следовании выше описанным рекомендациям при выборе режущего инструмента для обработки молибдена, возможно на ряде операций повысить качество обрабатываемых деталей, увеличить производительность без использования трихлорэтилена.

Критерии выбора СОЖ свелись к следующим необходимым характеристикам:

- 1) эффективный теплоотвод — обладать высоким коэффициентом теплопроводности, максимально возможной температурой кипения;
- 2) смазочные свойства — эффективно влиять на снижение коэффициента силы трения между контактируемыми материалами;
- 3) смачиваемость — обладать хорошей смачиваемостью по отношению к молибдену либо к материалу режущего инструмента. Для обеспечения постоянного наличия СОЖ в зоне резания при вращении детали;
- 4) вязкость — для снижения эффекта разбрызгивания с вращающейся поверхности, СОЖ должна обладать достаточной вязкостью с учетом требований по текучести;
- 5) химическая чистота обрабатываемой поверхности — не должна вступать в химическую реакцию с молибденом;
- 6) требования безопасности жизнедеятельности — соответствовать нормам безопасности.

Экспериментально были апробированы СОЖ для обработки жаропрочных материалов следующих производителей: MobilCut, Blazer, Quaker, Cimtech. Наилучшие результаты при обработке молибдена при таких же условиях, что и при обработке с трихлорэтиленом, получены с использованием синтетической СОЖ Cimtech A31. При сравнении результатов обработки деталей таким же инструментом с применением трихлорэтилена полученные значения выходных параметров в процессе апробации Cimtech A31 были значительно выше.

Таким образом, в ходе исследования была проведена апробация выбранного инструмента, результатом которой стало внедрение резцов со сменными пластинами из мелкодисперсного твердого сплава IC20, со следующей геометрией режущей части:  $\gamma \approx 20^\circ$ ;  $\alpha \approx 7^\circ$ ;  $\beta \approx 63^\circ$ . Данный инструмент имеет следующие преимущества:

- 1) в процессе точения формируется сливная стружка, вместо стружки скола;
- 2) стойкость режущих пластин значительно превосходит ранее используемый инструмент;

3) повысилось качество обрабатываемой поверхности, повысилась точность выполняемых размеров, увеличилась повторяемость деталей;

4) при его использовании применяется смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) на основе синтетики.

Были определены критерии подбора СОЖ. Наилучший результат получен с использованием синтетической СОЖ Cimtech. В эксперименте использовался стандартный инструмент из ВК8 для более точного определения эффективности Cimtech. Для различных видов токарной обработки был проведен анализ по режимам резания для достижения оптимального результата. СОЖ Cimtech A31 позволила:

1) повысить качество изготавливаемых деталей;

2) повысить ресурс режущего инструмента до 30 раз на ряде операций;

3) вести обработку деталей из молибдена на станках не оборудованных специальными вытяжками;

4) полностью исключить применение трихлорэтилена при механической обработки молибдена.

### Литература

- [1] Голант М. Б. и др. *Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов*. Москва, Советское радио, 1969, с. 73–77.
- [2] Дальский А. М. и др. *Технология конструкционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1977.
- [3] Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. *Металлорежущие инструменты*. Томск, Изд-во Томского ун-та, 2003.
- [4] Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. *Резание материалов*. Москва, Машиностроение, 2007.

УДК 620.174.22

## Влияние внутреннего трения на изгибную жесткость длинномерных валов

© Нгуен Ван Хуан, Зайдес Семен Азикович

Россия, г. Иркутск, Иркутский национальный исследовательский  
технический университет

[nguyenvanhuan.istu@gmail.com](mailto:nguyenvanhuan.istu@gmail.com), [zsa@istu.edu](mailto:zsa@istu.edu)

*Представлены результаты компьютерного моделирования изгибной жесткости длинномерных деталей типа валов. Рассмотрено влияние внутреннего трения в металлах на максимальный прогиб стержневых деталей. Установлено, что увеличение внутреннего трения в поверхностных слоях оказывает положительное влияние на повышения жесткости валов.*

**Ключевые слова:** внутреннее трение, максимальный прогиб, поверхностный слой, изгибная жесткость.

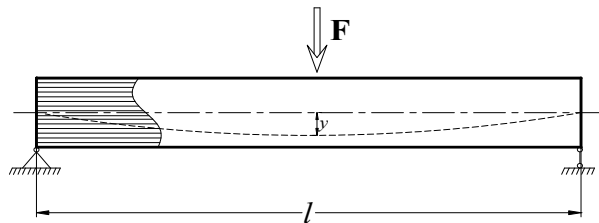
Длинномерные валы обычно используются для передачи крутящих моментов на достаточно большие расстояния в пределах конструкции. Стремлением производителей и потребителей металлопродукции — экономия металла и получение изделий с меньшей массой. Снижение материалоемкости осуществляется в основном за счет уменьшения поперечного сечения детали. Однако тонкий и длинный стержень имеет низкую устойчивость при действии продольной силы и малую жесткость при действии поперечной нагрузки. Поэтому задача технологического повышения жесткости и устойчивости стержневых деталей является, несомненно, актуальной. К маложестким относятся такие валы, у которых длина в 10 и более раз превышает их диаметр [1]. Такие валы широко применяются в транспортной и сельскохозяйственной технике, в водных судах и металлорежущих станках, в разнообразных механизмах горнорудной и текстильной техники.

Жесткость длинномерных деталей зависит от условий нагружения, геометрии изделия и физико-механических свойств материала. В данной работе использовано влияние внутреннего трения на жесткости стержневых деталей.

Работы многих ученых указывают на то, что и для металла можно ввести представление о внутреннем трении. Коэффициент трения, если о таком можно говорить, должен быть весьма велик. Так, некоторые ученые объясняют явление упругого последействия внутренним трением в деформированном теле [2]. Особенно тесную связь с внутренним трением имеет явление загущания, наблюдаемое при колебаниях упругих тел.

Попытки измерить коэффициент внутреннего трения твердых тел пока еще не привели к ясным и определенным результатам. Ряд методов основан на наблюдении постепенного изменения формы тела под влиянием постоянной, деформирующей силы. Американский ученый Вегус исследовал сталь и нашел коэффициент внутреннего трения в диапазоне  $n = 0,1 \cdot 10^8 \dots 0,6 \cdot 10^8$  [3]. Сущность силы трения с точки зрения физики объясняется электромагнитной силой между атомами, молекулами и кристаллами. Эта сила во внутренних слоях металла имеет большую величину, поэтому коэффициент внутреннего трения в металлах должен быть весьма велик. В данной работе определена зависимость прогиба длинномерных валов от коэффициента внутреннего трения.

Исследуем изгибную деформацию стального гладкого длинномерного вала длиной  $l$ , диаметром  $d$  под действием поперечной нагрузки  $F$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема для определения влияния внутреннего трения на жесткость вала

Максимальный прогиб такого вала можно определить по формуле [4]

$$y_{\max} = -\frac{Fl^3}{48EI_x}. \quad (1)$$

Отсюда следует, что изменить жесткость конкретного вала можно только за счет модуля упругости первого рода  $E$ . Из литературных источников [4, 5] следует, что значение  $E$  существенно зависит от температурного воздействия. В холодном состоянии модуль  $E$  можно изменить только на очень малую величину.

Для моделирования внутреннего трения принята геометрическая модель вала, состоящая из тонкостенных трубок, по поверхности которых действуют касательные напряжения. Толщина стенки трубок равна 0,1 мм. По изменению значения силы трения между трубками определена жесткость вала при поперечном нагружении.

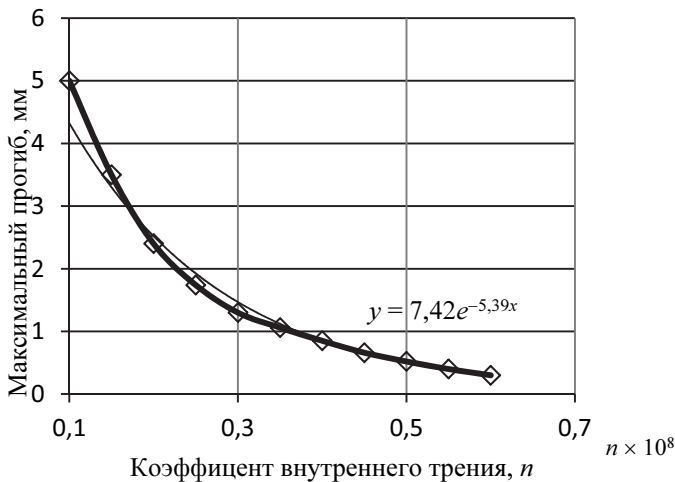
Максимальный прогиб валов для данной схемы нагружения с учетом внутреннего трения рассчитывается по формуле

$$y'_{\max} = -\frac{Fl^3}{48EI_x} K_T, \quad (2)$$

где  $K_T$  — коэффициент уменьшения прогиба валов — отношение максимального прогиба вала с учетом коэффициента внутреннего трения на прогиб, определенный аналитическим расчетом (1),

$$K_T = \frac{y'_{\max}}{y_{\max}}. \quad (3)$$

Для проверки изменения прогиба вала в зависимости от коэффициента внутреннего трения использован пакет программ Ansys Workbench. Расчет прогиба стержневых деталей в среде Ansys Workbench выполнен помощью функции Static Structural. По аналитическому расчету (формула (1)) получаем максимальный прогиб вала (ст. 35) диаметром 16 мм и длиной 500 мм при нагружении сосредоточенной силой  $F$ , величиной 250 Н, равен 1,01 мм.



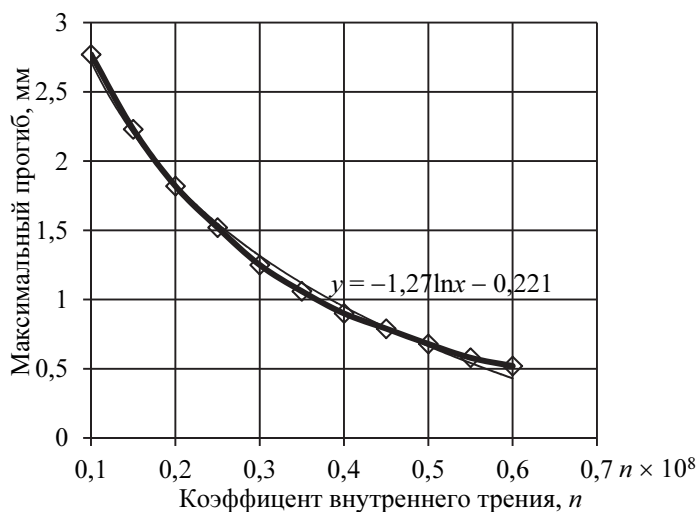
**Рис. 2.** Зависимость максимального прогиба от коэффициента внутреннего трения

Зависимость максимального прогиба данного вала от коэффициента внутреннего трения в диапазоне  $n = 0,1 \cdot 10^8 \dots 0,6 \cdot 10^8$  показана на рис. 2. При увеличении коэф-



коэффициента внутреннего трения максимальный прогиб монотонно снижается. Повышение коэффициента внутреннего трения вала позволяет уменьшать величину прогиба. По сравнению с аналитическим расчетом, который не учитывает внутреннего трения, значение максимального прогиба вала с учетом трения может снижаться в 2–3 раза (см. рис. 2).

Рассмотрим случай, когда внутреннее трение меняется только в поверхностном слое (толщина 1,2 мм [6]), а в остальных слоях остается постоянным ( $n = 0,35 \cdot 10^8$ ). Результаты расчетов представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость максимального прогиба от коэффициента внутреннего трения в поверхностном слое

При увеличении коэффициента внутреннего трения в поверхностном слое максимальный прогиб может снижаться до 2 раза ( $n = 0,6 \cdot 10^8$ ). Повышение коэффициента внутреннего трения вала только в поверхностном слое позволяет уменьшать величину прогиба. Этот результат поясняет влияние поверхностного упрочнения на повышение жесткости длинномерных валов.

По результатам моделирования в системе Autodesk Inventor можно сделать следующие выводы:

- 1) прогиб мало жестких валов нелинейно зависит от коэффициента внутреннего трения. С увеличением коэффициента трения, жесткость валов повышается;
- 2) для реальной геометрии вала изменить величину прогиба можно за счет изменения коэффициента внутреннего трения только в поверхностном слое.

### Литература

- [1] Зайдес С.А., Климова Л.Г. Управление технологическими остаточными напряжениями в мало жестких валах охватываемым деформированием. *Вестник ИрГТУ*, 2006, № 4 (28), с. 58–61.
- [2] Блантер М.С., Пигузов Ю.В., Амарин Г.М. *Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях: Справ. изд.* Москва, Металлургия, 1991, 248 с.

- [3] Хвольсон О.Д. *Курс физики*. Т. 1. Ленинград — Москва, Государственное технико-теоретическое издательство, 1963, 656 с.
- [4] Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. *Справочник по сопротивлению материалов*. Киев, Наукова думка, 1988, 736 с.
- [5] Лурье А.И. *Теория упругости*. Москва, Наука, 1970, 940 с.
- [6] Нгуен Ван Хуан, Зайдес С.А. *Моделирование изгибной жесткости валов в зависимости от геометрических параметров и модуля упругости материала. Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): мат. докл. V Всерос. с международным участием науч.-техн. конф.* Иркутск, 27–30 апреля, 2015 г. Иркутск, Изд-во ИРННТУ, 2015, с. 344–350.

УДК 621.914

## **Коррекция положения инструмента при обеспечении качества изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ**

© Носов Михаил Валентинович, Кондаков Александр Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

[mihail\\_nosov@mail.ru](mailto:mihail_nosov@mail.ru)

*Изготовление корпусных деталей современных машин и приборов точной механики часто вызывает затруднения, особенно при мелкосерийном производстве из-за их сложной конфигурации и наличия поверхностей с точностью, например, диаметральных размеров, соответствующей IT5, IT6. Возможности современных многоцелевых станков с ЧПУ позволяют обеспечить качество изготовления таких поверхностей, но лишь при использовании нетривиальных технологических решений и приемов. Предложена методика коррекции положения инструмента, позволяющая обеспечивать качество изготовления прецизионных поверхностей корпусных деталей лезвийной обработкой на многоцелевых станках с ЧПУ в мелкосерийном производстве. Методика предусматривает выполнение рабочих ходов чистовой (окончательной) обработки с постоянной глубиной резания и коррекцией положения инструмента по результатам измерения выдерживаемого размера. Применение методики обеспечивает точность диаметральных размеров поверхностей деталей из конструкционных сталей, магнито-мягких материалов, титановых и алюминий-во-магниевого сплавов, соответствующую IT5, IT6. Формализованный характер методики позволяет автоматизировать определение необходимой коррекции.*

**Ключевые слова:** деталь, прецизионная поверхность, точность, станок с ЧПУ, инструмент, положение, коррекция, качество.

Конструкции корпусных деталей современных машин и приборов точной механики часто включают наружные и внутренние цилиндрические поверхности, точность диаметральных размеров которых соответствует 5–6 квалитетам ISO. Возмож-

ности современных многоцелевых станков с ЧПУ позволяют обеспечить качество изготовления таких поверхностей, но лишь при использовании нетривиальных технологических решений и приемов [1, 2].

Стабильное обеспечение качества прецизионных, в том числе – термически обработанных, поверхностей на многоцелевых станках с ЧПУ [3] позволяет принципиально изменить построение процессов изготовления корпусных деталей даже из труднообрабатываемых материалов.

Обеспечить заданную точность изготовления деталей на станках с ЧПУ можно за счет коррекции (предискажения) траектории относительного перемещения или положения инструмента и обрабатываемой заготовки. Коррекция может выполняться на основании предварительных расчетов или измерений [4–6]. Возможность проведения измерений непосредственно на станке при выполнении операции и использования их результатов для коррекции положения инструмента повысило надежность обеспечения точности изготовления прецизионных поверхностей, методика которого приведена в [3].

Суть предложенной методики рассмотрим на примере изготовления отверстия с точностью диаметрального размера по *H6* растачиванием на фрезерно-токарном станке с ЧПУ. Исходим из следующих основных положений и допущений:

1) доминирующее влияние на точность диаметрального размера изготавливаемого отверстия оказывает погрешность, вызванная упругими деформациями технологической системы под действиями сил резания;

2) действует закон копирования погрешностей в упругой технологической системе;

3) жесткость технологической системы переменна по образующей растачиваемого отверстия, но в каждом сечении, перпендикулярном оси отверстия, изменяется незначительно;

4) значения сил резания при растачивании прямо пропорциональны значениям глубины резания (припуска, снимаемого за один рабочий ход) [7];

5) на каждом из отдельных этапов изготовления отверстия параметры режима резания неизменны, за исключением глубины резания;

6) точность отверстия обеспечена, если погрешность диаметрального размера и погрешность формы отверстия находятся в пределах допуска.

Предварительными исследованиями установлено, что отверстия, расточенные на фрезерно-токарном станке с ЧПУ с точностью диаметрального размера *H9*, имеют комбинированное отклонение — конусность с меньшим основанием со стороны входа инструмента и бочкообразность (рис. 1).

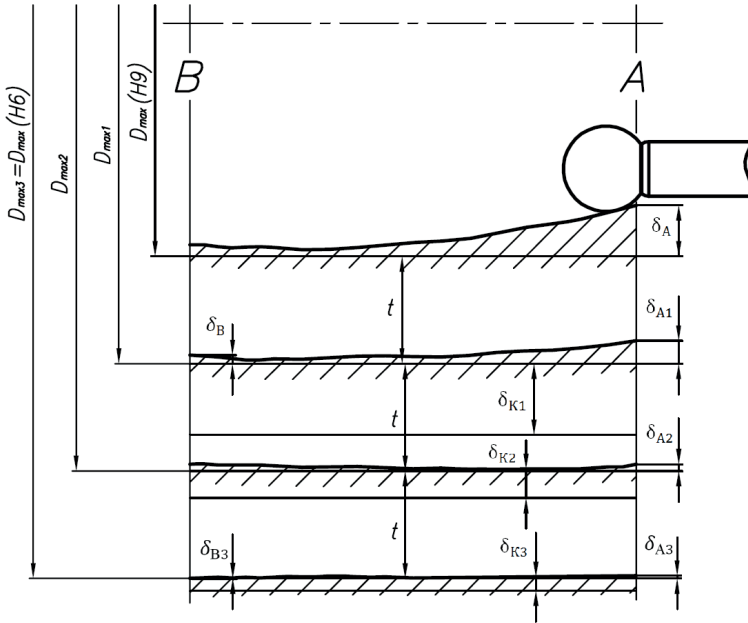
Конусность является доминирующим отклонением формы, погрешность формы в продольном сечении отверстия можно определить по формуле

$$\Delta_{\phi} = [D_{\max}(H9) - 2\delta_B] - [D_{\max}(H9) - 2\delta_A], \quad (1)$$

где  $D_{\max}(H9)$  — максимальный диаметр отверстия с допуском по *H9*;  $2\delta_B$ ,  $2\delta_A$  — отклонения размеров радиусов изготавливаемого отверстия, измеренные на торцах *A* и *B* соответственно (см. рис. 1),

$$\Delta_{\phi} \leq k[\Delta_D], \quad (2)$$

Здесь  $k$  — доля погрешности формы в допуске  $[\Delta_D]$  на выдерживаемый диаметральный размер. Для допуска *H9*  $k=0,5$  для допуска *H6*  $k = 0,2...0,25$ .



**Рис. 1.** Схема обеспечения точности диаметрального размера растачиваемого отверстия по *H6* коррекцией положения инструмента:  $D_{\max}(H6)$ ,  $D_{\max}(H9)$  — максимальный диаметр отверстия с точностью, соответствующей *H6* и *H9*;  $D_{\max1} - D_{\max3}$  — максимальный диаметр обрабатываемого отверстия после корректирующих рабочих ходов 1–3 соответственно;  $t$  — номинальная глубина резания на каждом корректирующем рабочем ходе;  $\delta_A$ ,  $\delta_{A1}$ ,  $\delta_{A2}$ ,  $\delta_{A3}$  — отклонение радиуса изготавливаемого отверстия, измеренное на торце *A*, соответственно исходное и после корректирующих рабочих ходов 1–3;  $\delta_B$  — отклонение радиуса изготавливаемого отверстия, измеренное на торце *B*, исходное

С учетом (1) и (2) получим

$$\delta_A - \delta_B \leq 0,25[\Delta_D(H9)], \quad (3)$$

где  $\Delta_D(H9)$  — допуск *H9* на выдерживаемый диаметральный размер. Аналогично, для допуска *H6* (см. рис. 1)

$$\delta_{A3} - \delta_{B3} \leq (0,1 \dots 0,125)[\Delta_D(H6)]. \quad (4)$$

Ограничение (3) является условием возможности применения коррекции положения инструмента для достижения заданного качества отверстия. Ограничение (4), наряду с допуском на соответствующий диаметральный размер — условие обеспечения качества изготовления отверстия.

Общий (суммарный) припуск на чистовую (окончательную) обработку для рассматриваемого примера определяют по формуле

$$z = \frac{D_{\max}(H6) - D_{\max}(H9)}{2},$$

Здесь  $D_{\max}(H6)$  — максимальный диаметр отверстия с допуском по  $H6$  (см. рис. 1) Общий припуск удаляют за  $i$  рабочих ходов чистовой (отделочной) обработки — корректирующих рабочих ходов. Тогда

$$z = ti, \quad (5)$$

где  $t$  — номинальная глубина резания на каждом корректирующем рабочем ходе,  $t = z/i$ .

В рассматриваемом примере (см. рис. 1) выполнено три корректирующих рабочих хода.

Перед выполнением первого корректирующего рабочего хода измеряют фактический диаметральный размер обрабатываемой поверхности в трех плоскостях, перпендикулярных оси отверстия. Измерение выполняют с помощью контактного датчика, например Renishaw MP40. Полученное значение сравнивают со значением размера  $D_{\max}(H9)$ . Определяют значения отклонений размеров радиусов  $2\delta_B$ ,  $2\delta_A$  вблизи торцов  $A$  и  $B$ , а также в середине образующей отверстия. Проверяют соблюдение условий (3). Определяют максимальное значение отклонения фактического диаметрального размера от значения  $D_{\max}(H9)$ . В рассматриваемом примере это отклонение равно  $2\delta_A$ , соответствующее торцу  $A$  отверстия (см. рис. 1).

Кроме номинальной глубины резания  $t$  перед выполнением первого корректирующего рабочего хода проводят коррекцию положения инструмента — смещают вершину инструмента относительно номинального размера  $D_{\max1}$  (см. рис. 1) на величину  $\delta_{к1}$  в «тело» заготовки. В примере

$$\delta_{к1} = \delta_A.$$

Предполагают, что корректирующее смещение в значительной мере обеспечит компенсацию погрешностей, вызываемых упругими деформациями технологической системы под действием сил резания. Коррекцию вводят с пульта устройства ЧПУ станка.

Перед вторым корректирующим рабочим ходом фактический диаметральный размер отверстия измеряют лишь в одной плоскости (вблизи торца  $A$ ). Величина коррекции положения инструмента:

$$\delta_{к2} = \delta_{A1}.$$

Аналогичные действия выполняют перед третьим корректирующим рабочим ходом. Величина коррекции положения инструмента:

$$\delta_{к3} = \delta_{A2}.$$

Значение  $\delta_{A3}$  используют для оценки качества изготовления отверстия.

Глубина резания в каждом корректирующем рабочем ходе отличается от глубины резания предыдущего хода на величину введенной коррекции. В остальном же для каждого рабочего хода стремятся в наибольшей мере сохранить одинаковые с другими ходами условия его выполнения, тем самым стабилизируя влияние элементарных погрешностей обработки на точность выдерживаемого размера и минимизируя его вводимой коррекцией.

При априори неизвестной ожидаемой погрешности формы изготавливаемого отверстия в продольном сечении измерение фактического диаметрального размера сле-

дует выполнять в трех плоскостях по длине образующей отверстия, а величину и знак коррекции положения инструмента устанавливать по максимальному отклонению.

При неизменности упругих свойств технологической системы и ее элементов, в частности — свойств материала заготовки, могут быть оценены ожидаемые значения максимального отклонения выдерживаемого размера после каждого из корректирующих рабочих ходов.

Максимальная глубина резания при выполнении первого корректирующего рабочего хода на торце  $A$  изготавливаемого отверстия составит (см. рис. 1):

$$t_{A1} = t + \delta_A + \delta_{к1} = t + \delta_A + \delta_A = t + 2\delta_A.$$

Считая отклонение радиуса изготавливаемого отверстия прямо пропорциональным упругой деформации технологической системы под действием сил резания и пренебрегая действием иных факторов, после первого корректирующего рабочего хода получим:

$$\delta_{A1} \approx \delta_A \frac{t + 2\delta_A}{t_0}, \quad (6)$$

где  $t_0$  — глубина резания при выполнении последнего рабочего хода, обеспечивающего диаметральный размер  $D_{\max}(H9)$ . Другие параметры режима резания для рассматриваемых рабочих ходов приняты одинаковыми. Величина  $(t + 2\delta_A)/t_0$  является коэффициентом уточнения отклонения радиуса изготавливаемого отверстия. Аналогично, после второго корректирующего рабочего хода

$$\delta_{A2} \approx \delta_{A1} \frac{t + 2\delta_{A1}}{t + 2\delta_A}. \quad (7)$$

Значения отклонений радиусов изготавливаемого отверстия, получаемые после каждого  $i$ -го корректирующего рабочего хода, рекуррентно связаны:

$$\delta_{Ai} \approx \delta_{A(i-1)} \frac{t + 2\delta_{A(i-1)}}{t + 2\delta_{A(i-2)}}. \quad (8)$$

Здесь индексами  $i$ ,  $i-1$ ,  $i-2$  помечены значения указанных отклонений после выполнения соответствующих корректирующих рабочих ходов. Рекуррентный характер полученных зависимостей позволяет выразить значения отклонений, образуемых после каждого рабочего хода, через их первичные значения. В частности, подставив в (7) значение  $\delta_{A1}$ , выраженное из (6), получим

$$\delta_{A2} = \delta_A \frac{t + 2\delta_A \frac{t + 2\delta_A}{t_0}}{t_0}. \quad (9)$$

Выразив значение отклонения радиуса изготавливаемого отверстия после выполнения  $i$ -го корректирующего рабочего хода  $\delta_{Ai}$  аналогично (9) и учитывая, что погрешность формы в поперечном сечении ограничена (2), пренебрегая величинами второго порядка малости, получим выражение для определения глубины резания  $t$  на каждом корректирующем рабочем ходе. Для рассматриваемого примера

$$t \leq \frac{t_0 k [\Delta_D(H6)]}{[\Delta_D(H9)]}, \quad (10)$$

где значение  $k$  принимают в соответствии с (2). Задавшись максимальным значением  $t$  и зная общий (суммарный) припуск на чистовую (окончательную) обработку из (5) можно определить число корректирующих рабочих ходов  $i$ .

Если перед чистовой (отделочной) обработкой выполнялось химико-термическое упрочнение материала заготовки, то его свойства изменяются и (6) может не выполняться. Измерение отклонений выдерживаемого диаметрального размера от заданного следует выполнять в трех плоскостях перед каждым корректирующим рабочим ходом и вводить коррекцию положения инструмента в зависимости от знака максимального отклонения. Первый корректирующий рабочий ход (после химико-термической обработки) целесообразно выполнять без ввода коррекции положения инструмента и при минимальной глубине резания. Это позволит оценить влияние свойств материала на упругие деформации технологической системы и впоследствии учитывать соотношения, аналогичные (7)–(10) при расчете коррекции.

Разработанная методика коррекции положения инструмента прошла практическую апробацию [3] и успешно применяется при обеспечении качества изготовления отверстий в корпусных деталях из конструкционных сталей, магнито-мягких материалов, титановых и алюминиевых сплавов в мелкосерийном производстве.

Таким образом, предложенная методика коррекции положения инструмента позволяет обеспечить изготовление отверстий с точностью диаметрального размера IT5, IT6 в корпусных деталях лезвийной обработкой на многоцелевых станках с ЧПУ в многосерийном производстве. В ней предусмотрено выполнение рабочих ходов чистовой (окончательной) обработки отверстия с постоянной глубиной резания и коррекцией положения инструмента по результатам измерения выдерживаемого размера. Предложены зависимости, позволяющие определять глубину резания в каждом корректирующем рабочем ходе и необходимое число последних.

Применение методики обеспечивает стабилизацию влияния элементарных погрешностей обработки на точность выдерживаемого размера и минимизирует его вводимой коррекцией. Формализованный характер предложенной методики позволяет автоматизировать определение величины необходимой коррекции положения инструмента и выполнять ее при минимальных финансовых затратах.

### Литература

- [1] Штриплинг Л.О., Попов М.Г. Применение высокоскоростного фрезерования точных отверстий для совершенствования технологии производства корпусных деталей из алюминия. *Омский научный вестник*, 2010, № 3 (93), с. 63–67.
- [2] Ahmed A. D. Sarhan, Hassan M. A., Atsushi Matsubara, Hamdi M. High-Precision Machining by Measuring and Compensating the Error Motion of Spindle's Axis of Rotation in Radial Direction. *Engineering Letters*, 19:4, EL\_19\_4\_06.
- [3] Носов М.В., Кондаков А.И. Обеспечение качества изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 6 (651), с. 56–60.
- [4] Аверченков В.И., Филиппова Л.Б., Пугач Л.И. Программный комплекс определения величины коррекции на инструмент для обрабатывающих центров с датчиками активного контроля. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2013, вып. 7, ч. 1, с. 71–78.

- [5] Eichner T., Hohmann M., Linder I. Taktil oder berührungslos in-Process-messen? *Werkstatt + Betrieb*, 2012, no 12.
- [6] Hennecke K. BAZ-Tuning für jedermann. *Werkstatt + Betrieb*, 2012, no 11.
- [7] Сулова А.Г., Косиловой А.Г., Мещеряков Р.К., ред. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 2. Москва, Машиностроение-1, 2001, 944 с.

УДК 621.923

## Моделирование тепловых процессов при профильном глубинном шлифовании

© Полуглазкова Надежда Владимировна, Волков Дмитрий Иванович

Россия, г. Рыбинск, Рыбинский государственный авиационный  
технический университет имени П.А. Соловьева

[poluglazkova@mail.ru](mailto:poluglazkova@mail.ru), [rmsi@rsatu.ru](mailto:rmsi@rsatu.ru)

*Рассмотрены особенности тепловых процессов при глубинном шлифовании деталей газотурбинных двигателей малой длины с программным регулированием скорости продольной подачи стола. Наибольший интерес при глубинном шлифовании представляет обработка с максимальной производительностью. Проведены теоретические исследования и получены графические зависимости температуры на поверхности детали от координаты z и различных значениях критерия  $F_0$  при постоянной и изменяющейся скорости продольной подачи.*

**Ключевые слова:** тепловые процессы, детали газотурбинных двигателей, профильное глубинное шлифование.

Детали газотурбинных двигателей, при обработке которых процесс глубинного шлифования является наиболее эффективным, в большинстве своем имеют небольшую длину, соизмеримую с протяженностью дуги контакта круга и детали. Участки врезания и выхода составляют свыше 50 % общей длины обработки и являются менее теплонапряженными, так как глубина шлифования на них меньше и постоянно изменяется.

Разработан способ программного регулирования плоского глубинного шлифования периферией круга [1], включающий регулирование усилия резания путем изменения скорости продольной подачи. Управление реализуется при поддержании на постоянном уровне секундного съема металла. При этом скорость продольной подачи на участке врезания и выхода шлифовального круга изменяют пропорционально отношению максимальной глубины шлифования на участке врезания или выхода к фактической глубине в начале текущего отрезка.

Температурное поле шлифуемого клина в области, близкой к ребру, может существенно отличаться от температурного поля массивной детали, что нередко приводит к дефектам на лопатках газотурбинных двигателей. Поэтому актуальной становится задача обеспечения бездефектного шлифования путем управления данным процессом на основе теплофизической модели, устанавливающей взаимосвязь между технологиче-



скими управляемыми параметрами (подача стола), силовыми характеристиками (сила резания) и возникающей под их воздействием температурой шлифования.

Глубинное шлифование детали малой длины можно рассматривать как процесс шлифования клиновидного тела с углом клина  $\alpha = 90^\circ$  или близких к нему значений [2]. Шлифование производится с принудительным охлаждением. Тепловой режим при глубинном шлифовании с изменяющейся скоростью продольной подачи на участках врезания и выхода является неустановившимся.

При расчете теплового поля детали необходимо определить закон распределения плотности теплового потока, направленного в деталь в пределах зоны контакта. При глубинном шлифовании геометрия продольного сечения среза единичного зерна, несмотря на случайный характер взаимодействия, имеет характерную особенность: форма продольного сечения среза треугольная текущая толщина среза  $a_z$  возрастает пропорционально расстоянию от точки вступления зерна в контакт до окончания взаимодействия [3]. Тепловая энергия, выделяемая в зоне шлифования, пропорциональна тангенциальной составляющей силы шлифования, следовательно, плотность общего теплового потока распределена в пределах зоны контакта по линейному закону согласно зависимости

$$q(z) = \frac{q_{\max}}{2l_k} (2l_k - z),$$

где  $q_{\max}$  — наибольшее значение плотности теплового потока;  $l_k$  — половина длины дуги контакта круга с деталью;  $z$  — текущая координата.

Условие задачи формулируется ставиться следующим образом: по одной из граней бесконечно длинного клина в отрицательном направлении оси  $Oz$  движется со скоростью продольной подачи  $v_d$  нормально ориентированный к ребру клина полосовой источник шириной  $2l_k$  (рис. 1). За начало системы координат  $zOy$  принята граница детали, соответствующая окончанию обработки.

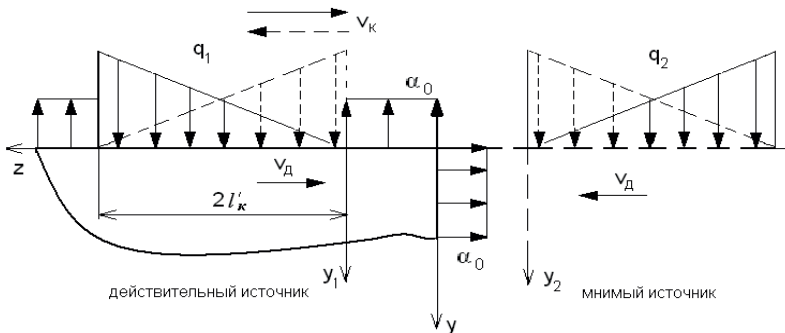


Рис. 1. Схема расчета температурных полей:

— — — — — встречное; - - - - - попутное

Решение задачи определения теплового поля в поверхности детали от движущегося источника тепла сводится к решению уравнения теплопроводности [21]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_m \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + v_d \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

с граничными условиями

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{\substack{y=0 \\ z \in (0, 2l)}} = \frac{q_1}{\lambda_m} \left( 1 - \frac{z}{2l_k} \right);$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{\alpha_0}{\lambda_m} (\theta - \theta_c) \Big|_{y=0};$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{\alpha_0}{\lambda_m} (\theta - \theta_c) \Big|_{z=0},$$

где  $a_m$  — коэффициент температуропроводности материала детали;  $\alpha_0$  — коэффициент теплообмена на свободной поверхности;  $\lambda_m$  — коэффициент теплопроводности материала детали.

В результате решения уравнения теплопроводности было получено выражение в критериальном виде

$$\theta_\delta = \frac{qPe}{2c\rho_m \sqrt{\pi v_d}} \int_0^{Fo} \frac{1}{\sqrt{F_0}} \exp\left(-\frac{Y^2}{4Pe^2 F_0}\right) \times$$

$$\times \left( \operatorname{erf}\left(\frac{Z+L}{2Pe\sqrt{F_0}} - \frac{Pe\sqrt{F_0}}{2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{Z-L}{2Pe\sqrt{F_0}} - \frac{Pe\sqrt{F_0}}{2}\right) \right) +$$

$$+ \operatorname{erf}\left(\frac{Z+L}{2Pe\sqrt{F_0}} + \frac{Pe\sqrt{F_0}}{2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{Z-L}{2Pe\sqrt{F_0}} + \frac{Pe\sqrt{F_0}}{2}\right) \times$$

$$\times \left[ 1 - \operatorname{Bi}\sqrt{\pi F_0} \exp\left[\left(\frac{Y}{2Pe\sqrt{F_0}} + \operatorname{Bi}\sqrt{F_0}\right)^2\right] \operatorname{erfc}\left(\frac{Y}{2Pe\sqrt{F_0}} + \operatorname{Bi}\sqrt{F_0}\right) \right] dF_0,$$

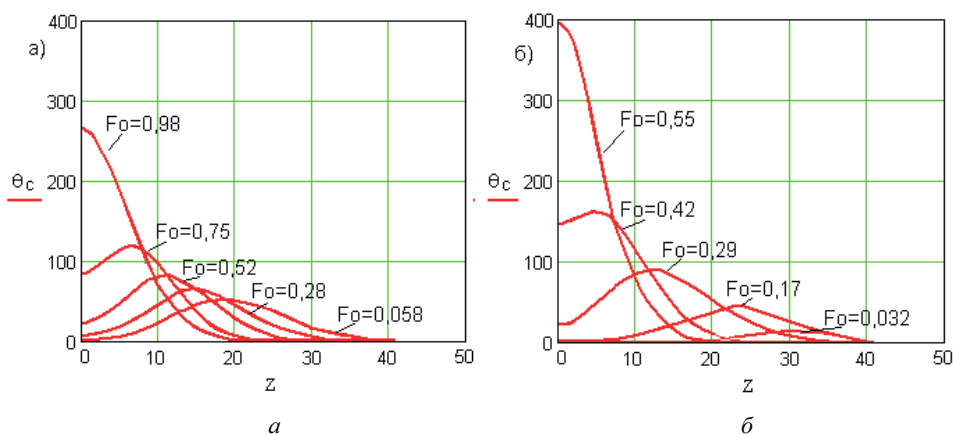
где  $F_0 = \frac{a_m(\tau - \tau')}{l_k'^2}$  — критерий Фурье, характеризующий время теплового процесса;

$Pe = \frac{v_d l_k'}{a_m}$  — критерий Пекле, характеризующий скорость движения источника тепла;

$Bi = \frac{\alpha_0 l_k'}{\lambda_m}$  — критерий Био, характеризующий теплообмен на поверхности тела;

$Y = \frac{v_d y}{a_m}$ ,  $Z = \frac{v_d z}{a_m}$  — безразмерные координаты;  $L = \frac{v_d l_k'}{a_m}$  — безразмерная полуширина зоны контакта;  $l_k'$  — половина длины контакта.

Расчеты показывают (рис. 2), что при обработке с программным регулированием скорости продольной подачи температура детали в зависимости от режимов шлифования превышает температуру детали при обработке с постоянной скоростью продольной подачи на 5...15 %, что составляет 40...120 °С и может быть компенсировано известными методами (изменение интенсивности охлаждения, подбор соответствующих характеристик абразивного инструмента), а увеличение производительности процессов абразивной обработки за счет изменения скорости продольной подачи на этапах врезания и выхода круга в деталь может составлять до 2 раз.



**Рис 2.** Зависимость температуры детали от координаты  $z$  и различных значениях критерия  $F_0$ ;  $y = 0$  мкм;  $v_d = 80$  мм/мин;  $\alpha_0 = 2 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup> · К):  
 а — при постоянной скорости продольной подачи; б — при работе системы программного регулирования скорости продольной подачи

### Литература

- [1] Волков Д.И., Полуглазкова Н.В. Оптимизация процесса глубинного шлифования при обработке деталей ГТД. *Вестник УГАТУ, тематическое приложение к серии «Машиностроение»*, 2009, т. 12, № 4, с. 56–60.
- [2] Волков Д.И., Рыкунов Н.С., Полуглазкова Н.В. Некоторые особенности процесса глубинного шлифования. *Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева*, Рыбинск, № 1 (11), 2007. с. 266–268.
- [3] Сипайлов В.А. *Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности*. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.

УДК 621.923.01

## Проектирование оптимальных циклов внутришлифовальной обработки в многомерном пространстве управляющих параметров

© Попова Александра Викторовна, Переверзев Павел Петрович

Россия, г. Кыштым, филиал ФГБОУ ВПО  
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) в г. Кыштыме

[popowa\\_aw@mail.ru](mailto:popowa_aw@mail.ru)

*Рассмотрена впервые разработанная методика проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки в многомерном пространстве управляющих параметров: скорость осевой подачи, радиальной подачи и др. Данная методика*

позволяет учитывать комплекс технологических ограничений (по допустимой погрешности размеров, по допустимой глубине прижога и др.). Основой разработанной методики является метод динамического программирования, позволяющий заменить полный перебор вариантов решений целенаправленным, тем самым сократив расходы и время, затрачиваемые на производстве на подбор оптимальных значений режимов обработки.

**Ключевые слова:** *внутришлифовальная обработка, управляющие параметры, динамическое программирование.*

Один из основных методов получения точных отверстий — внутреннее шлифование. Оно позволяет получать отверстия 6–7 качества с высоким качеством обрабатываемой поверхности. Существенным преимуществом внутреннего шлифования является возможность обработки отверстия в тех случаях, когда развертывание и растачивание применить невозможно, например, при обработке точных отверстий больших диаметров и отверстий в закаленных, высокотвердых деталях и т. п. Благодаря своей универсальности, внутреннее шлифование охватывает все типы производства: от обработки единичной продукции в ремонтно-механическом цехе (единичное производство) до обработки гильз цилиндров внутреннего сгорания, посадочных отверстий для подшипников и зубчатых колес, отверстий корпусных деталей, колес шарико- и роликоподшипников (крупносерийное, массовое производства).

Появление современных станков с ЧПУ, производящих обработку с повышенными скоростями и по заданным циклам, выявило в отечественном машиностроении следующую проблему: отсутствие нормативов и методик, позволяющих спроектировать высокопроизводительный цикл для заданных условий обработки, обеспечивающий чертежные требования к обрабатываемой поверхности. Имеющаяся на машиностроительных предприятиях нормативно-справочная литература издана преимущественно в 1970–1980-х годах и разработана для универсальных станков на основании статистических данных тех лет. Основное назначение этой литературы — нормирование времени обработки. В условиях современного производства она непригодна.

В существующих в настоящее время методиках расчета режимов обработки [1–3] до сих пор не используются математические методы оптимизации, т. е. не обеспечивается максимальная производительность цикла при выполнении всех технологических ограничений (по точности, качеству обрабатываемой поверхности и др.) из-за отсутствия расчетных параметров оптимальной структуры цикла шлифования (количество ступеней цикла, распределение снимаемого припуска по ступеням, программные значения поперечной и продольной подач для каждой ступени цикла, а также достоверное значение времени цикла обработки заготовки). Существенными недостатками данных методик так же являются: отсутствие модели ограничения производительности операции по точности обработки; отсутствие учета изменения условий обработки (степени затупления и износа круга, исходного биения заготовки и др.); значительные затраты по времени на расчет (до 2–4 недель); отсутствие учета фактически-снятого припуска, и как следствие неверный расчет времени обработки и количества ходов (оборотов), необходимых для снятия заданной величины припуска и др. В результате на предприятиях вынуждены подбирать режимы резания путем обработки ряда пробных заготовок, что неприемлемо для единичного и серийного типа производства. При этом существенно занижаются параметры режимов резания и производительность операции (до 2–5 раз), чтобы гарантированно получить заданную точность и качество обрабатываемой поверхности отверстия.

Для решения данной проблемы разработана теория и методика расчета оптимальных циклов внутришлифовальной обработки, базирующаяся на моделировании съема металла с  $b$ -го радиуса на  $i$ -м ходе круга  $z$ -й ступени цикла при заданных режимах обработки, с учетом упругих деформаций и особенностей кинематики резания. Разработанная модель позволяет накладывать ограничения по допустимой погрешности диаметральных размеров обрабатываемой поверхности. По всей длине обрабатываемого отверстия выделяется три сечения — начальное, среднее и конечное. Для учета исходного биения заготовки форма сечения обрабатываемой поверхности принимается в виде эллипса. Каждое сечение описывается массивом радиус-векторов, текущие значения которых рассчитываются для каждого сечения в течение всего цикла обработки на основании методики, представленной в [4]. Погрешности обработки рассчитываются на основании данных о значениях радиусов для каждого сечения. Необходимо также отметить, что модель съема металла позволяет рассчитать количество ходов (время обработки), необходимые для обработки, удовлетворяющей требованиям чертежа детали по качеству и точности.

В качестве метода оптимизации выбран метод динамического программирования, не требующий предварительного построения области допустимых значений управляющих параметров, нечувствительный к характеру целевой функции и ее ограничениям [5]. Что, в свою очередь, позволяет наложить на процесс ограничения, определение которых возможно только в конце цикла (ограничения по точности, шероховатости, безприжоговости). Использование данного метода позволяет в значительной мере сократить время обработки данных (полный перебор вариантов решений заменяется целенаправленным).

Пространственное представление управляющей программы трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки в трехмерном пространстве: «радиальная подача  $S_{\text{рад}}$  (мм/ход), скорость осевой подачи  $V_{\text{ос}}$  (мм/мин) и припуск  $\Pi$  (мм)» показано на рис. 1. Траектория управляющей программы цикла показана штриховой линией в виде пространственного ступенчатого изменения радиальной и осевой подач (задаваемых с пульта управления станком) в зависимости от снимаемой части припуска. Оптимизация цикла шлифования состоит в подборе оптимального сочетания таких значений подач (радиальной и осевой) и снимаемой части припуска на всех ступенях цикла, при которых основное время минимально при условии обеспечения заданной точности и качества обрабатываемой поверхности. Изменения величины фактически снятого припуска из-за упругих деформаций технологической системы показано штрихпунктирной линией. Различные технологические ограничения, накладываемые на пространственную область допустимых значений фактически снятого припуска, показаны на рис. 1 в виде криволинейных поверхностей, разграниченных разноструктурными линиями.

Для упрощения визуализации взаимосвязи подач, технологических ограничений и припуска со ступенчатой структурой цикла внутреннего шлифования, на рис. 2 приведена их проекция на плоскость радиальная подача  $S_{\text{рад}}$  (мм/ход) — припуск  $\Pi$  (мм). На рис. 2 видно, что на протяжении всего цикла шлифования текущее значение фактически снятого припуска ограничивается комплексом технологических ограничений (требуемая точность получаемого размера, шероховатость, безприжоговость обрабатываемой поверхности, осыпаемость круга и др.). Границы областей этих ограничений для разных деталей с различными параметрами поверхности отверстия заготовки (по точности, исходному радиальному биению) и готовой детали (по точности диаметрального размера, безприжоговости и шероховатости обрабатываемой поверхности) могут иметь самое разнообразное взаиморасположение и разные очертания [6].

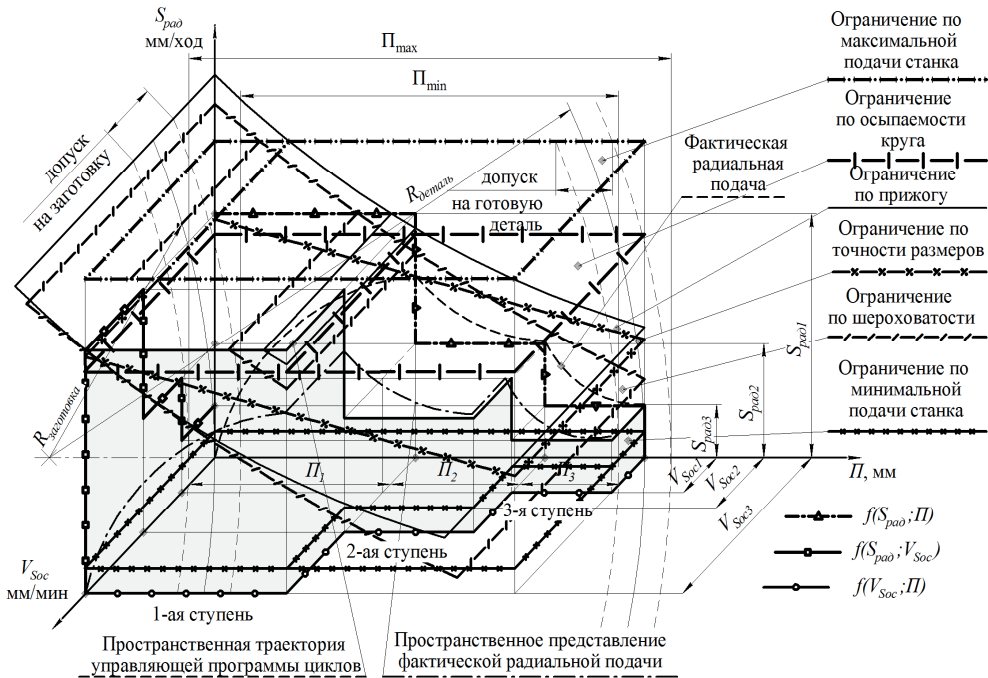


Рис. 1. Пространственное представление трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки с наложением областей ограничений

Максимальные значения фактически снятого припуска зависят от разных ограничений, например: ограничение по осыпаемости круга работает на первой ступени цикла, влияют на максимально допустимое значение фактически снятого припуска; ограничение по шероховатости — на последней ступени цикла, лимитируя значение конечной подачи (выхаживание); ограничение по требуемой точности обработки действует на всех ступенях цикла, снижая фактически снятый припуск до значений, удовлетворяющих требованиям чертежа по точности детали [7, 8]. При проектировании цикла шлифования для обеспечения максимальной производительности операции необходимо стремиться к тому, чтобы на протяжении всего цикла шлифования текущее значение фактически снятого припуска (фактическое значение радиальной подачи) было максимально допустимым на протяжении всей обработки. Для этого следует использовать ближайшее к области ограничений значение фактически снятого припуска. В этом случае значение фактически снятого припуска будет наибольшим, а цикл производительней. Такое приближение осуществляется ступенчатым изменением радиальной и осевой подач.

Разработка методики оптимизации цикла внутреннего шлифования позволяет заменить полный перебор вариантов циклов обработки, занимающего недопустимо длительное время (измеряемое годами), направленным перебором с отсечением недопустимых по ограничениям и неперспективных (длительных по времени) вариантов. Что, в свою очередь, в значительной мере снижает время, затрачиваемое на производстве на подбор оптимальных значений режимов обработки.

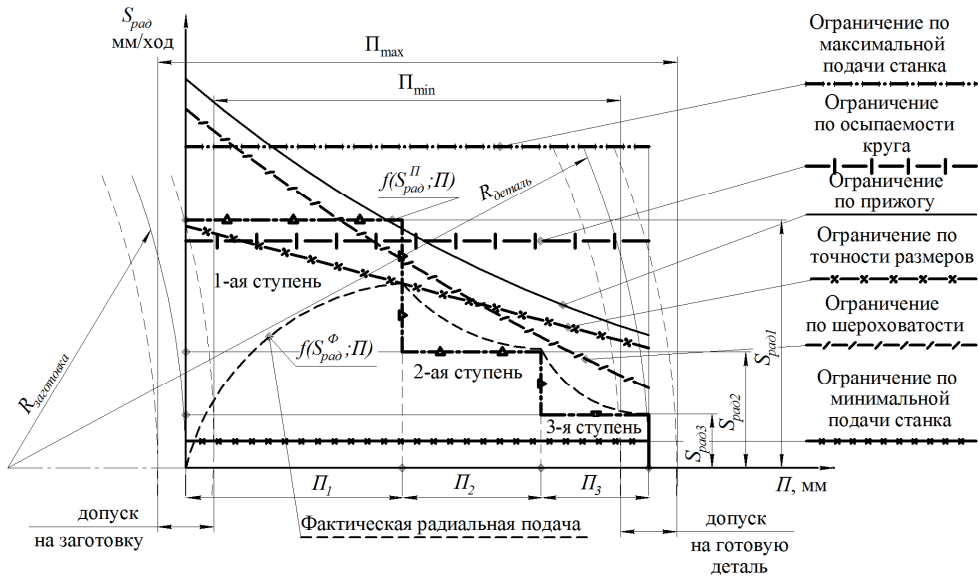


Рис. 2. Двухмерное представление трехступенчатого цикла внутришлифовальной обработки с наложением областей ограничений

**Литература**

- [1] D'yakonov A.A., Shipulin L.V. Selecting the cutting conditions for plain grinding by the periphery of wheel. *Russian Engineering Research, Allerton Press, Inc.* 2014, vol. 34, no 12, pp. 804–816.
- [2] Новоселов Ю.К. *Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке.* Севастополь, СевНТУ, 2012, 286 с.
- [3] Nathan, R.D., Vijayaraghavan L., Krishnamurthy R. Intelligent estimation of burning limits to aid in cylindrical grinding cycle planning. *Heavy Vehicle Systems*, 2001, vol. 8, iss. 1, p. 48–59.
- [4] Переверзев П.П., Попова А.В., Пименов Д.Ю. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с упругими деформациями технологической системы. *СТИН*, 2014, № 9, с. 23–27.
- [5] Беллман Р. *Динамическое программирование.* Москва, Издательство иностранной литературы, 1960, 400 с.
- [6] Переверзев П.П. Моделирование и оптимизация управляющих программ в автоматизированном машиностроительном производстве. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение*, 2012, № 12 (271), с. 152–157.
- [7] Попова А.В. Принципы проектирования высокопроизводительных циклов на примере внутреннего шлифовании. *СТИН*, 2014, № 6, с. 17–22.
- [8] Переверзев П.П., Попова А.В. Разработка методики оптимизации циклов внутришлифовальной обработки в многомерном пространстве. *Современные проблемы теории машин*, 2015, № 3, с. 22–25.

УДК 621.9.1

## Управление параметрами механической обработки на основе нейросетевых моделей

© Степанов Андрей Александрович, Хаймович Александр Исаакович

Россия, г. Самара, АО РКЦ «Прогресс»

[pochta201002@mail.ru](mailto:pochta201002@mail.ru)

*Рассмотрена методика управления режимами протягивания и точения деталей авиационной техники на основе математических моделей определения конструкторско-технологических параметров инструмента и детали (эквивалентного напряжения  $\sigma$ , максимального касательного напряжения  $i$ , смещения  $p$  зубьев, коэффициента  $K_u$  усадки стружки, шероховатости  $Rz$ , износа  $h$ ), а также параметров процесса их высокоскоростного протягивания. Представлены схемы управления конструкторско-технологическими параметрами процессов механической обработки с возможностью прогнозирования их значений при изменении условий обработки на многоцелевых станках с программным управлением и марок инструментальных и обрабатываемых материалов.*

**Ключевые слова:** прогнозирование параметров, режимы протягивания и точения, протяжка, многоцелевые станки с программным управлением.

При механической обработке деталей авиационной техники один из актуальных вопросов — назначение рациональных технологических режимов резания и обеспечение высокой точности обработки за счет использования адаптивных систем управления, способных компенсировать действие параметрических возмущений [1]. Основными факторами, снижающими точность механической обработки, являются усиленный износ и поломка режущей кромки, а также повышенная упругая деформация кромки из-за изменения нагрузки в процессе обработки, что приводит к браку вследствие нарушения геометрии обрабатываемых деталей. Современные методы компьютерного моделирования технологических процессов [2, 3] позволяют количественно оценить эти факторы, в связи с чем актуальной является методика разработки адаптивной системы управления (АдСУ) процессами механической обработки с учетом изменяющихся требований к изделиям, свойствам обрабатываемых материалов, геометрии режущей кромки инструмента в условиях нестационарности высокоскоростной обработки.

При исследовании предварительно моделировался процесс резания в статическом режиме (разработаны нелинейные регрессионные модели оцениваемых параметров, характеризующих процесс резания), затем рассматривался динамический режим по линеаризованным статическим моделям. Для программной и аппаратной реализации элементов АдСУ необходимо использовать программируемые логические контроллеры, которые отработают управляющие (входные) и выходные воздействия по заданному алгоритму. На рис. 1 видно, что фактическое эквивалентное напряжение  $\sigma$  не превышает допускаемого значения  $[\sigma] = 35$  МПа. Для повышения качества работы АдСУ выполнено нейросетевое моделирование элементов системы



на выборках экспериментальных данных. Преимущество нейросетевого моделирования состоит в высокой точности прогнозирования значений параметров, возможности обучения в процессе работы системы управления и выбора наилучшего значения параметра в автоматическом режиме. Виды поверхностей отклика в нейронной сети для разных параметров приведены на рис. 2–4.

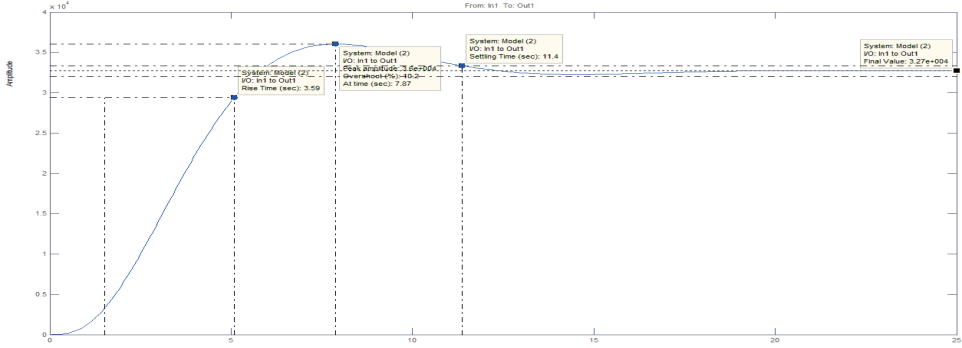


Рис. 1. Зависимость выходного эквивалентного напряжения  $\sigma$  по алгоритму, заданному в контроллере

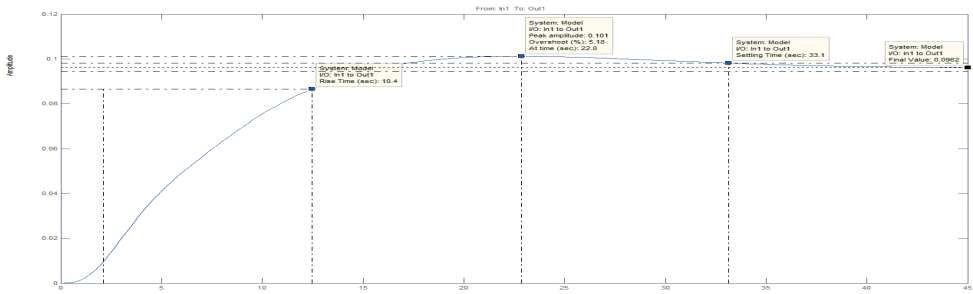


Рис. 2. Зависимость смещения  $r$  режущей кромки по алгоритму, заданному в контроллере

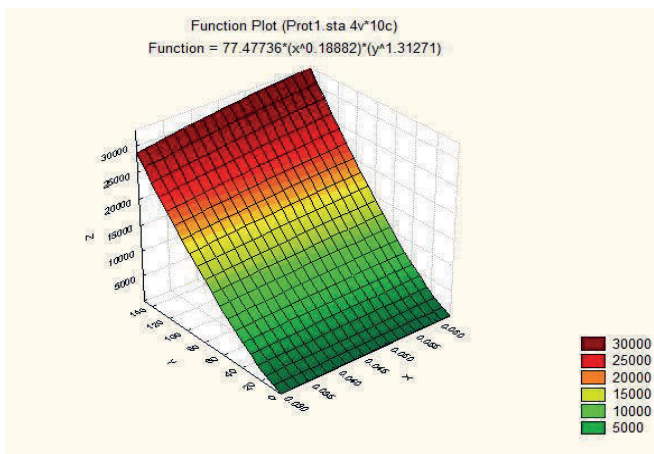


Рис. 3. Зависимость напряжения  $\sigma$  от скорости  $V$  резания и подачи  $S_z$

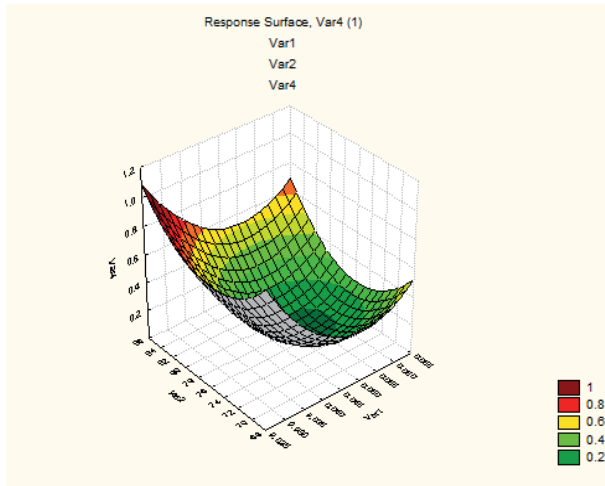


Рис. 4. Зависимость смещения  $p$  режущей кромки от угла заострения  $\beta$  и подачи  $S_z$

Таким образом, применение высокоскоростного протягивания в диапазоне  $V = 130 \dots 150$  м/мин обуславливает необходимость проектирования нового протяжного оборудования, реализующего протягивание с указанными скоростями обработки. В настоящее время существует оборудование для протягивания пазов со скоростью  $V = 120$  м/мин, что согласно проведенным исследованиям не соответствует оптимальным режимам протягивания.

С помощью методов планирования экспериментов [4] и нейросетевого моделирования получены регрессионные модели оценочных параметров инструмента и детали в процессе протягивания и точения для условий высокопроизводительной обработки. Достоверность моделей составляет 95 %. Разработан программный комплекс на базе предложенной методики и полученных моделей, предназначенный для оперативного назначения рациональных режимов процесса протягивания и точения в цеховых условиях. Предложена и апробирована методика, позволяющая подобрать параметры АДСУ: значения эквивалентных и касательных напряжений, смещения зубьев протяжки под действием сил резания, коэффициента усадки стружки, износа режущей кромки, шероховатости обработанной поверхности в динамическом режиме. Полученная система устойчива и обрабатывает любые теоретически сколь угодно большие изменения коэффициента передачи объекта управления. Все элементы контура адаптации физически реализуемы.

## Литература

- [1] Зориктуев В.Ц., Буткин Н.С., Схиртладзе А.Г. *Основы автоматизации и управления технологическими процессами в машиностроении*. Уфа, УГАТУ, 2000, 406 с.
- [2] Аллик, Р.А., ред. *Системы автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов в машиностроении*. Ленинград, Машиностроение, 1986, 319 с.
- [3] Норенков, И.П. *Основы автоматизированного проектирования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 448 с.
- [4] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва, Наука, 1976, 279 с.

## Определение натяга в прессовых соединениях узлов ГТД с одновременным учетом шероховатости и степени наклепа поверхностей соединяемых деталей

© Чугуевская Светлана Валерьевна, Безъязычный Вячеслав Феоктистович

Россия, г. Рыбинск, ОАО «Научно-производственное объединение “Сатурн”»

[svetlana.chuguevskaya@npo-saturn.ru](mailto:svetlana.chuguevskaya@npo-saturn.ru)

*Проанализировано влияние качества сопрягаемых поверхностей на эксплуатационные характеристики соединений с натягом. Разработан алгоритм расчета крутящего момента и осевой силы с учетом шероховатости и степени наклепа. Представлены расчеты давления на поверхности контакта с учетом шероховатости поверхности и степени наклепа и построены кривые сравнения, на основе которых выявлено влияние наклепа на прочность соединений с натягом в узлах ГТД.*

**Ключевые слова:** качество сопрягаемых поверхностей, шероховатость поверхности, наклеп.

Соединения с натягом получили широкое распространение в различных конструкциях узлов ГТД благодаря их высокой надежности, простоте конструкции и технологии изготовления, а также обеспечения хорошего центрирования.

К показателям качества прессовых соединений относятся: статическая прочность, динамическая прочность, жесткость, несущая способность. В настоящее время улучшение качественных показателей прессовых соединений сдерживается отсутствием научно-обоснованных методик расчета их эксплуатационных свойств, выбора и нормирования параметров качества рабочих поверхностей в зависимости от технологических факторов, воздействующих на соединение.

Прочность соединений с натягом во многом зависит от шероховатости поверхностей соединяемых деталей. При запрессовке детали наблюдается сглаживание микронеровностей, обеспечивающее снижение фактического натяга. В связи с этим уменьшение прочности соединения деталей обнаруживается при более шероховатых поверхностях. Износостойкости поверхностей деталей в значительной степени способствует упрочнение поверхностного слоя — наклеп. Наклеп повышает усталостную прочность. Однако совокупное влияние наклепа и шероховатости соединяемых поверхностей на прочность соединений с натягом не изучено.

Из существующих способов соединения деталей с натягом в качестве объекта исследования были использованы продольно-прессовые соединения (рис. 1), получившие наибольшее распространение благодаря простоте соединения.

Основными критериями, характеризующими прочность посадки с натягом, является осевая сила  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$ , выдерживаемые соединениями, которые определяются по известным формулам [1, 2]:

$$P_0 = \pi d l p f_{ос}; \quad M_{кр} = \frac{\pi d^2 l p f_{кр}}{2},$$

где  $f_{ос}$  и  $f_{кр}$  — коэффициент трения при осевом сдвиге и при кручении;  $p$  — давление на поверхности контакта;  $d$  — номинальный диаметр соединения;  $l$  — длина контакта сопрягаемых поверхностей.

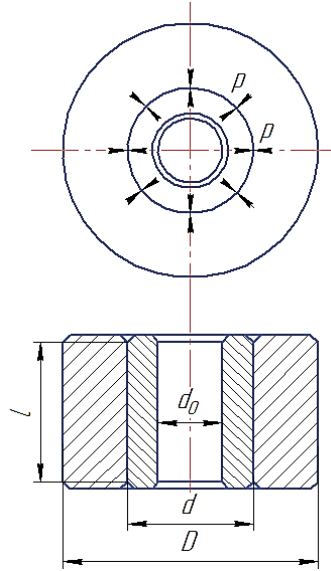


Рис. 1. Схема продольно-прессового соединения

Для определения давления на поверхности контакта с учетом высоты неровностей сопрягаемых поверхностей и степени наклепа поверхностей была выведена формула:

$$p = \frac{1}{d} \frac{\delta_n - 1, 2(Rz_1 + Rz_2)}{\left[ \frac{C_1 W_1}{2(1 + \mu_1) \left( \frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1} \right)^2} + \frac{C_2 W_2}{2(1 + \mu_2) \left( \frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2} \right)^2} \right]}, \quad (1)$$

где  $\delta_n$  — номинальный натяг, выбираемый из таблицы для конкретного соединения или задаваемый на чертеже изделия;  $C_1$  и  $C_2$  — безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств материалов;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей;  $Rz_1$  и  $Rz_2$ ,  $W_1$  и  $W_2$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ,  $N_1$  и  $N_2$ ,  $\sigma'_{0,2}$  и  $\sigma''_{0,2}$  — соответственно значения высоты неровностей сопрягаемых поверхностей, накопленной энергии, параметра междислокационного воздействия, степени наклепа и условного предела текучести для материалов первой и второй сопрягаемых деталей.

Особенностью формулы (1) является то, что в ней кроме геометрических размеров соединения (длины, диаметра соединения), высоты неровностей соединяемых поверхностей также учитываются физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала, геометрические параметры режущей части инструмента.

Тогда, с учетом выведенной формулы (1), совокупного влияния шероховатости и степени наклепа осевая сила  $P_0$  и крутящий момент  $M_{кр}$  с учетом будут определяться по следующим формулам:

$$P_0 = \frac{\pi f_{oc} l [\delta_n - 1, 2(Rz_1 + Rz_2)]}{\frac{C_1 W_1 \alpha_1}{2(1 + \mu_1)(N_1 \sigma'_{0,2})^2} + \frac{C_2 W_2 \alpha_2}{2(1 + \mu_2)(N_2 \sigma''_{0,2})^2}}; \quad (4)$$

$$M_{кр} = \frac{\pi d f_{кр} l [\delta_n - 1, 2(Rz_1 + Rz_2)]}{2 \left[ \frac{C_1 W_1 \alpha_1}{2(1 + \mu_1)(N_1 \sigma'_{0,2})^2} + \frac{C_2 W_2 \alpha_2}{2(1 + \mu_2)(N_2 \sigma''_{0,2})^2} \right]}. \quad (5)$$

Разработан алгоритм расчетов для определения осевой силы  $P_0$  и крутящего момент  $M_{кр}$ , выдерживаемых соединениями с учетом шероховатости и степени наклепа поверхностей соединяемых деталей (рис. 2).

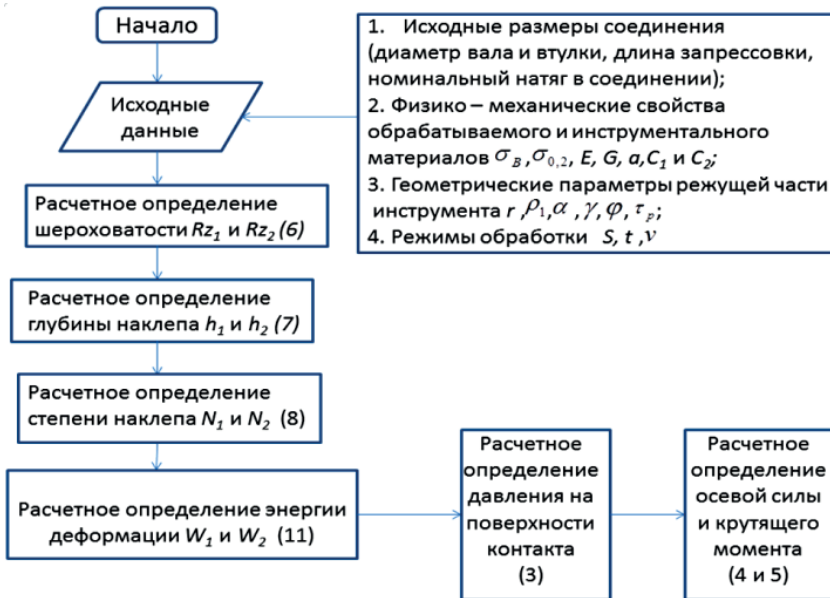


Рис. 2. Алгоритм расчета осевой силы  $P_0$  и крутящего момент  $M_{кр}$ , выдерживаемых соединениями с учетом шероховатости и степени наклепа поверхностей соединяемых деталей

Удельная энергия  $W$ , Дж/мм<sup>3</sup>, определяется по математической зависимости [3]:

$$W = \frac{Q}{\alpha'^2 G} \left( \frac{h_n \sigma_{0,2}}{1, 25(\sigma_B / \sigma_{BЭ})^{0,8}} \right)^2,$$

где  $Q$  — коэффициент пропорциональности,  $Q = 0,5...1,0$ .

По разработанному алгоритму (см. рис. 2) были проведены расчеты давления на поверхности контакта и осевой силы, выдерживаемой соединением для типового продольно-прессового соединения (см. рис. 1). Размеры соединения: диаметр отверстия охватываемой детали  $d_0 = 63$  мм; номинальный диаметр сопрягаемых поверхностей  $d = 68$  мм; диаметр наружной поверхности охватывающей детали  $D = 75$  мм; номинальный натяг в соединении  $\delta_n = 20$  мкм. Детали выполнены из жаропрочных сплавов (ЭИ961 ГОСТ 5949—75 и ЭИ867 ГОСТ 5632—72). Параметры режущего инструмента: глубина резания  $t = 0,5$  мм, главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ , вспомогательный угол в плане  $\varphi_1 = 15^\circ$ , задний угол  $\alpha = 7^\circ$ . Для обеих деталей приняты одинаковые режимы обработки, которые изменяются в диапазоне: подача 0,05, 0,1 и 0,15 мм/об, а скорость резания 20, 30 и 50 м/мин.

Для определения влияния наклепа поверхности также были рассчитаны давление на поверхности контакта, осевая сила  $P_0$  с учетом только шероховатости сопрягаемых поверхностей с использованием следующей формулы [2]:

$$p = \frac{[\delta_n - 1, 2(Rz_1 + Rz_2)] E_1 E_2}{d \left[ E_2 \left( \frac{1 + (d_0/d)^2}{1 - (d_0/d)^2} - \mu_1 \right) + E_1 \left( \frac{1 + (d/D)^2}{1 - (d/D)^2} + \mu_2 \right) \right]}$$

В качестве примера на рис. 3 представлено сравнение давления на поверхности контакта, рассчитанного с учетом шероховатости поверхностей и с учетом совокупного влияния шероховатости и степени наклепа.

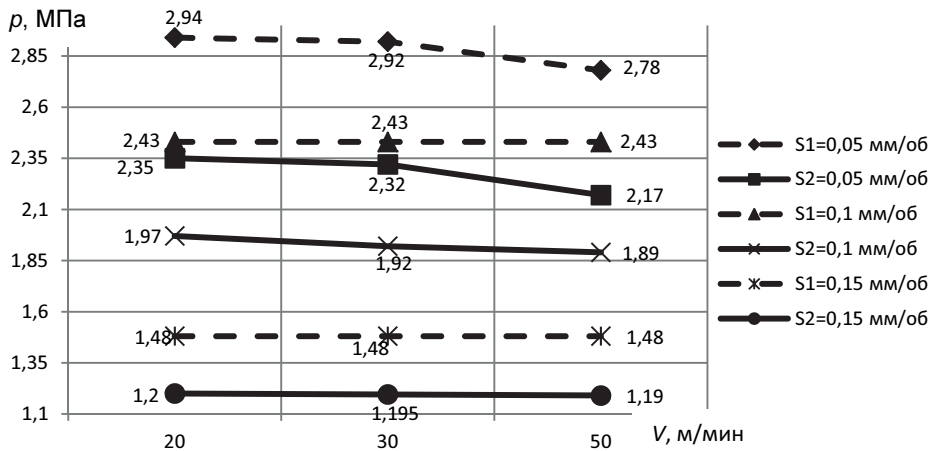


Рис. 3. Сравнение давления на поверхности контакта, рассчитанного с учетом шероховатости сопрягаемых поверхностей (S1) и с учетом совокупного влияния шероховатости и степени наклепа (S2)

Анализ полученных результатов расчетов привел к следующим выводам:

- с увеличением скорости резания  $V$ , м/мин, увеличивается шероховатость поверхности  $Rz$ , уменьшается глубина наклепанного слоя  $h_n$  и снижается давление на поверхности контакта. С увеличением подачи  $S$  увеличивается шероховатость поверхности  $Rz$ , растет глубина наклепанного слоя  $h_n$  и уменьшается давление на поверхности кон-

такта. Давление на поверхности контакта, рассчитанное с учетом совокупного влияния шероховатости поверхности и степени наклепа в среднем на 20 % меньше, чем рассчитанное с учетом только шероховатости соединяемых поверхностей;

• с повышением скорости резания  $V$  значения осевой силы  $P_0$  выдерживаемые соединением уменьшаются. С увеличением подачи  $S$  значения осевой силы  $P_0$  снижаются. Значения осевой силы  $P_0$  выдерживаемые соединением с учетом шероховатости поверхности и степени наклепа, в среднем на 15 % меньше, чем рассчитанное с учетом только шероховатости соединяемых поверхностей.

Таким образом, по представленным результатам расчетов можно сделать вывод, что совокупное влияние шероховатости и степени наклепа соединяемых поверхностей приводит к снижению прочности посадки с натягом. Следовательно, для обоснованного выбора значения посадки с натягом в соединениях деталей узлов ГТД необходимо учитывать именно совокупное влияние шероховатости и степени наклепа соединяемых поверхностей.

### Литература

- [1] Безъязычный В.Ф. *Теория подобия в технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2012, 320 с.
- [2] Федулов В.М. *Исследование методов расчета натяга в прессовых соединениях на основе управления технологическими условиями обработки поверхностей*. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2013.
- [3] Виноградова Н.В. *Определение параметров качества поверхностного слоя после механической обработки с учетом дислокационных и структурно-фазовых превращений*. Дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2003.

УДК 621.833.52

## Особенности геометрического моделирования зубчатых колес на заготовке вида однополостной гиперболоид вращения

© Шамсрахманов Тимур Маратович, Печенкин Михаил Владимирович

Россия, г. Казань, Казанский национальный исследовательский  
технический университет имени А.Н. Туполева

[ololokzn@gmail.com](mailto:ololokzn@gmail.com)

*Приведена последовательность расчета для определения геометрического места производящих линий боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи. Положение производящих линий исследовано графически по расположению линий пересечения производящей линии с плоскостью, перпендикулярной к одной из осей колес. Из-за значительного объема расчет целесообразно проводить с использованием математических пакетов. Расчет участков производящей поверхности выполняют с раз-*

бивкой на стороны и участки из-за различной кривизны. Выбор стороны зуба при расчете осуществляется по значению угла наклона производящих линий. Определение углов поворота производящей поверхности возможно с использованием метода сечений. Расчет используется для 3D моделирования гиперболоидной зубчатой передачи и может служить основой для разработки САПР гиперболоидных зубчатых передач.

**Ключевые слова:** гиперболоидная зубчатая передача, боковая поверхность зубьев, производящая поверхность.

Решение задач геометрического моделирования, как и задачи формообразования, как правило, начинается с описания исходных поверхностей образующими и направляющими линиями, которые рассматриваются как их производящие линии или криволинейные координаты [1]. Геометрическое моделирование зубьев зубчатых колес на заготовке вида однополостной гиперболоид вращения представляет сложную и трудоемкую задачу, которая до недавнего времени так и не была решена. В работе [2] такие зубчатые колеса названы гиперболоидными зубчатыми колесами с зубьями двойной переменной кривизны и предложен математический аппарат, позволяющий моделировать такие зубья и зубчатые колеса в системах автоматизированного проектирования. Такие зубчатые колеса не изготавливаются в промышленности, а форма начальных и делительных поверхностей заменяется приближенной (конической, цилиндрической и т. д.), что приводит к кинематическим погрешностям формообразования [3]. Образующая линия при движении вдоль направляющей линии зуба формирует боковую поверхность зубьев гиперболоидного зубчатого колеса двойной кривизны. Образующая линия гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной переменной кривизны представляет собой прямую линию, но может быть эвольвентой, дугой окружности и эллипса [2, 4]. Исследование движения точки образующей линии при формообразовании боковой поверхности зубьев позволит получить направляющую линию зуба. Поскольку рассматриваем прямолинейную образующую линию, то достаточно определить положение двух крайних точек образующей линии [2, 5]. Уравнение координат точки  $M_1$ , движущейся по гиперболе в подвижной системе координат, связанной с производящим зубчатым колесом определится по зависимости [2, 5]:

$$x_{M_1}^n = a_{M_1} \operatorname{ch}(t); \quad (1)$$

$$y_{M_1}^n = b_{M_1} \operatorname{sh}(t), \quad (2)$$

где  $a_{M_1}$ ,  $b_{M_1}$  — действительная и мнимая полуоси гиперболы, проходящей через точку  $M_1$ .

Аналогично определяют координаты другой крайней точки образующей линии —  $M_2$ .

Уравнения координат точки  $M_1$  при переходе от подвижной системы координат  $O_2x_2y_2z_2$  (связанной с производящим колесом) к неподвижной системе координат  $O_1x_1y_1z_1$  (связанной с заготовкой, на которой моделируются зубья) для единичного передаточного отношения и ортогональной зубчатой передачи после соответствующих преобразований принимают вид [2, 5]:

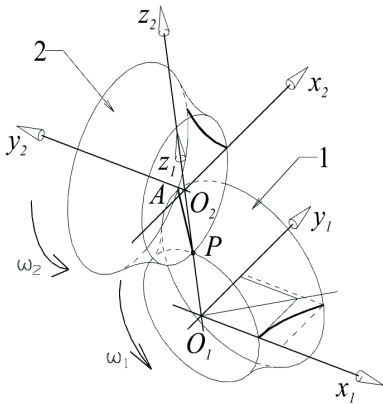
$$x_1(t) = O_1O_2 \sin(\omega t) - y_2 \cos(\omega t) + z_2 \sin(\omega t);$$



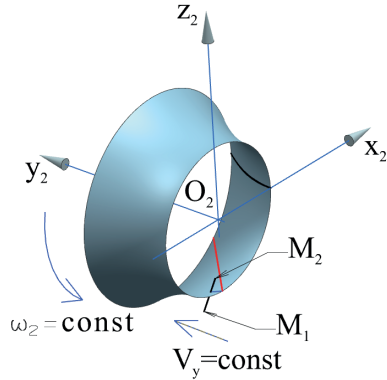
$$y_1(t) = x_2(t) = a_{M_1} \operatorname{ch}(t) \cos(\varphi_{M_0} + \omega t); \quad (3)$$

$$z_1(t) = O_1 O_2 \cos(\omega t) + y_2 \sin(\omega t) + z_2 \cos(\omega t).$$

Здесь  $O_1 O_2$  (рис. 1) — отрезок прямой, соединяющий центры гиперboloидов — их межосевое расстояние;  $x_2, y_2, z_2$  — координаты точки  $M_1$  в системе координат  $O_2 x_2 y_2 z_2$ .



**Рис. 1.** Делительные гиперboloиды передачи: 1 — делительный гиперboloид обрабатываемого зубчатого колеса; 2 — делительный гиперboloид, с которым связана образующая линия;  $\omega_1, \omega_2$  — направление вращения делительных гиперboloидов в процессе формообразования поверхности зуба



**Рис. 2.** Схема к расчету движения образующей линии при формообразовании боковой поверхности зуба:

$M_1$  — точка образующей линии, формирующая ножку зуба;  $M_2$  — точка образующей линии, формирующая головку зуба;  $V_y$  — скорость перемещения точек  $M_1$  и  $M_2$  образующей линии вдоль оси  $y_2$

Полученные в работах [2, 5] зависимости позволяют выполнять геометрическое моделирование в системах геометрического моделирования. Геометрию боковой поверхности зуба гиперboloидных зубчатых колес с зубьями двойной переменной кривизны можно получить также имитационным моделированием механической обработки зубьев с использованием зависимостей, представленных в работе [6].

Геометрическая модель позволяет лишь получить программу обработки зубьев построчно, с образованием межстрочных гребней [7]. Для более эффективной и производительной обработки зубьев кроме геометрической модели зубчатого колеса необходимы дополнительные формообразующие движения инструмента с использованием математического описания кинематики формообразования.

### Литература

- [1] Горбачев В.О. *Развитие моделей и алгоритмов формообразования сложных инструментальных и технологических поверхностей*. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2014. URL: <http://www.sstu.ru/upload/iblock/924/dissertatsiya-gorbacheva-v.o..pdf> (дата обращения: 28.06.2015).
- [2] Печенкин М.В. *Моделирование многокоординатного формообразования фрезерованием зубьев гиперboloидных зубчатых колес двойной кривизны*. Дис. ... канд. техн. наук. Казань,

- 2015, url: [http://www.kai.ru/science/disser/files/file\\_97/text\\_diss.pdf](http://www.kai.ru/science/disser/files/file_97/text_diss.pdf) (дата обращения 28.06.2015).
- [3] Курылев Д.В., Лунев А.Н. Снижение кинематической погрешности при механической обработке межлопаточных каналов моноколеса кольцевым режущим инструментом. *Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности» (АКТО-2014)*, 5–8 августа 2014, с. 393–395.
- [4] Печенкин М.В. Профильная модификация зубьев гиперболоидной передачи. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, 2007, № 2, с. 29–32.
- [5] Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Расчет положения производящих линий при формообразовании боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи. *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 6. URL: <http://www.science-education.ru/120-16410> (дата обращения 28.06.2015).
- [6] Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Кинематика формообразования боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи концевым инструментом. *Фундаментальные исследования*, 2014, № 12 (часть 11), с. 2310–2314. URL: <http://www.rae.ru/fs/pdf/2014/12-11/36686.pdf>.
- [7] Лунев А.Н., Моисеева Л.Т., Курылев Д.В. Моделирование глубинного фрезерования пространственно-сложных поверхностей деталей из условия обеспечения заданной высоты межстрочных гребешков в CAD/CAM системе Siemens NX. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, 2014, № 2, с. 108–111.

УДК 621.923.1

## **Влияние твердости высокопористых нитридных кругов на шероховатость пластин Р9М4К8 при маятниковом шлифовании**

© Шустов Андрей Иванович, Солер Яков Иосифович

Россия, г. Иркутск, Иркутский национальный исследовательский  
технический университет

[a.istu.edu@gmail.com](mailto:a.istu.edu@gmail.com), [solera@istu.irk.ru](mailto:solera@istu.irk.ru)

*Приведены результаты исследования шероховатости быстрорежущих пластин (БП) Р9М4К8 при шлифовании высокопористыми кругами (ВПК) из кубического нитрида бора (КНБ). Для оценки качества шлифованных БП использован параметр среднего арифметического отклонения профиля Ra. Стохастический характер процесса шлифования обусловил использование теоретико-вероятностных подходов. По результатам статистического анализа наблюдений выбран непараметрический метод. Даны рекомендации по выбору твердости ВПК из КНБ.*

**Ключевые слова:** *быстрорежущие пластины, твердость высокопористого круга, шероховатость, шлифование, непараметрический метод.*

Уровень развития промышленности определяется возможностью создания качественных изделий. При этом немаловажную роль играют сборные режущие инстру-

менты с быстрорежущими пластинами (БП), доля которых на машиностроительном предприятии достигает 70 %. Работоспособность БП обеспечивается шлифованием рабочих поверхностей [1]. Микрогеометрия поверхности БП оказывает прямое влияние на эксплуатационные характеристики работы деталей узлов, а также общий ресурс работы агрегата или машины [2]. Наиболее распространенным показателем, характеризующим состояние микрорельефа поверхности, является среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  [3]. Для деталей, работающих в условиях изнашивания, он является одним из наиболее важных [4]. Шлифование БП традиционными абразивами приводило к структурным изменениям и снижению качества их поверхностей [5]. Высокопористые круги (ВПК) из кубического нитрида бора (КНБ) позволяют улучшить качество процесса с увеличением его производительности на 65...70 % [6]. Данное исследование направлено на выбор твердости ВПК из КНБ с учетом мер положения и рассеяния.

В работе использованы теоретико-вероятностные подходы, целесообразность которых обусловлена случайным характером геометрической формы зерен, хаотичным их расположением на режущей поверхности ВПК и разновысотностью в радиальном и осевом направлениях. Следовательно, такие важнейшие показатели процесса резания, как геометрия зерен, толщины среза каждой режущей кромкой и их суммарное количество, участвующее в работе, необходимо рассматривать как случайные величины. Для ускорения рутинных вычислений и снижения риска ошибок использована программа Statistica 6.1.478.0. Привлечение статистики накладывает дополнительные требования к экспериментальным данным, которые необходимо представить в виде множеств  $e = \overline{1, k}$ :

$$\{y_{dev}\}, v = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $v$  – количество параллельных опытов, которое целесообразно проводить с одинаковым  $n$ . Методика интерпретации экспериментальных данных с использованием методов статистики приведена в работах [7–9]. Их анализ показал, что множество наблюдений (1) не удовлетворяют требованиям гомоскедастичности и нормальности распределений. Это предопределяет привлечение непараметрического метода.

Статистические методы позволяют предсказать следующую информацию по одномерному распределению частот (1) [10–13]:

- по мерам положения (опорным значениям):

$$\text{средним } \bar{y}_{de} = y_{de}, \quad (2)$$

$$\text{медианам } \tilde{y}_{de}; \quad (3)$$

- по мерам рассеяния (прецизионности):

$$\text{стандартам отклонений } SD_{de}, \quad (4)$$

$$\text{размахам } R_{de} = (y_{\max} - y_{\min})_{de}, \quad (5)$$

$$\text{квартильным широтам } KШ_{de} = (y_{0,75} - y_{0,25})_{de}. \quad (6)$$

На частотах (2), (4), (5) базируется параметрический метод, а на (3), (6) — ранговые статистики.

Опыты проводились при следующих неизменных условиях: плоскошлифовальный станок модели 3E711B с вращением шпинделя по часовой стрелке; форма и размеры ВПК из КНБ [14] — 1A1 200×20×76; БП из стали P9M4K8 (66–68 HRC); схема шлифования — периферией круга без выхаживающих ходов; скорость резания  $v_k =$

= 28 м/с; продольная подача  $s_{пр} = 6$  м/мин; глубина резания  $t = 0,01$  мм; операционный припуск  $z = 0,1$  мм; СОЖ — 5 %-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845—98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин; число параллельных наблюдений —  $n = 30$  ( $v = \overline{1, 30}$ ); БП представляли собой образцы с размерами  $D \times L = 36 \times 30$  мм, которые крепились непосредственно на магнитном столе станка и подвергались шлифованию по торцу. Выходные параметры процесса (1) свидетельствуют о переменных условиях эксперимента индексом « $de$ ». Здесь  $d = \overline{1, 2}$  — направление расположения микронеровностей: 1 — параллельно вектору поперечной подачи  $s_{п}$ , 2 — параллельно вектору  $s_{пр}$ . Переменная  $e = \overline{1, 3}$  — твердость ВПК: 1 — CBN30 B126 100 L V K27–КФ40, 2 — CBN30 B126 100 M V K27 — КФ40, 3 — CBN30 B126 100 O V K27–КФ40, где за базовый вариант принята твердость  $L$  ( $e = 1$ ) [15]. Параметр  $Ra_{de}$  измерен на профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр». Так как при оценке микрогеометрии регламентирующей является только одна трасса измерения, в данном исследовании параметр  $Ra_{de}$  представлен в двух взаимно перпендикулярных направлениях – поперечном и продольном.

Для оценки режущей способности ВПК из КНБ ( $e = \overline{1, 3}$ ) получены поправочные коэффициенты по ожидаемым аналогам медиан (3) для двух трасс измерения  $d = \overline{1, 2}$ :

$$K_{de} = \left( \frac{m\hat{y}_2}{m\hat{y}_1} \right)_{de}. \quad (7)$$

Количественная оценка стабильности процесса проводилась по коэффициентам  $K_{CTde}$ , в которых использованы различные меры рассеяния:  $SD_{de}$  ( $l = 1$ ),  $R_{de}$  ( $l = 2$ ) и  $KШ_{de}$  ( $l = 3$ ) при варьировании  $e = \overline{1; 3}$  и одноименном  $d = \overline{1; 2}$ :

$$K_{CTde1} = \frac{SD_1}{SD_2}; \quad (8)$$

$$K_{CTde2} = \frac{R_1}{R_2}; \quad (9)$$

$$K_{CTde3} = \frac{KШ_1}{KШ_2}. \quad (10)$$

Если (8)–(10) предсказаны меньше единицы, то прецизионность параметра  $Ra_{de}$  для базового варианта  $e = 1$  оказалась выше, чем для альтернативных, а в противном случае — наоборот.

В таблице представлены ожидаемые опорные значения параметра  $Ra_{de}$  при шлифовании БП кругами  $e = \overline{1, 3}$ , меры рассеяния (4)–(6), поправочный коэффициент (7) и показатели стабильности (8)–(10). В скобках указаны категориальные величины (КВ) по [16]. В числителе информация приведена по трассе измерения, параллельной вектору поперечной подачи  $s_{п}$ , в знаменателе — вектор продольной подачи  $s_{пр}$ . Поперечный параметр  $Ra_{1e}$ , превышающий продольный  $Ra_{2e}$  в 6–9 раз, принят регламентирующим качество поверхности шлифованных БП. Для твердости ВПК  $e = 3$  он предсказан на 1, 2 КВ меньше, чем для  $e = \overline{1, 2}$  соответственно.

Влияние твердости круга на ожидаемые меры положения параметра  $Ra_{de}$  и коэффициенты (8) – (10)

Твердость круга $e$	$Ra_{de}$ , МКМ		$SD_{de}$ (4)	$R_{de}$ (5)	$KШ_{de}$ (6)	$K_{de}$ (7)	$K_{CTde1}$ (8)	$K_{CTde2}$ (9)	$K_{CTde3}$ (10)
	$\hat{y}_e$	$m\hat{y}_e$							
1	$\frac{0,29(0,32)}{0,04(0,04)}$	$\frac{0,28(0,32)}{0,04(0,04)}$	$\frac{0,03}{0,01}$	$\frac{0,12}{0,05}$	$\frac{0,04}{0,02}$	1,00	1,00	1,00	1,00
2	$\frac{0,37(0,40)}{0,04(0,04)}$	$\frac{0,36(0,40)}{0,04(0,04)}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,28}{0,05}$	$\frac{0,12}{0,01}$	$\frac{1,26}{1,00}$	$\frac{0,43}{0,91}$	$\frac{0,44}{0,94}$	$\frac{0,33}{2,00}$
3	$\frac{0,24(0,25)}{0,04(0,04)}$	$\frac{0,24(0,25)}{0,04(0,04)}$	$\frac{0,03}{0,01}$	$\frac{0,14}{0,04}$	$\frac{0,04}{0,02}$	$\frac{0,84}{1,00}$	$\frac{0,99}{1,14}$	$\frac{0,85}{1,25}$	$\frac{1,00}{1,00}$

Примечания: 1. В числителе — поперечный параметр  $Ra_{1e}$ , в знаменателе — продольный параметр  $Ra_{2e}$ ;  
2. Твердость круга  $e$ : 1 — L, 2 — M, 3 — O.

Одномерные распределения частот (2)–(6) для обоих методов статистики, характеризующих условия формирования микрогеометрии, представлены на рис. 1.

С этой целью программа использует систему стандартных обозначений: «квадратом» выделены опытные опорные значения: средних  $\bar{y}_e$  (А) и медиан  $\hat{y}_e$  (Б); остальные идентичные обозначения несут разную смысловую нагрузку. На рис. 1, а «прямоугольник» ограничивает рассеяние стандартов ошибки, а «усики» — стандартов отклонений. На рис. 1, б они характеризуют (5) и (6). Совместно с таблицей рисунок свидетельствует о практически равнозначной стабильности формирования высотного параметра  $Ra_{1e}$  для твердостей ВПК  $e = 1,3$  и об ее уменьшении более чем в 2 раза при  $e = 2$ .

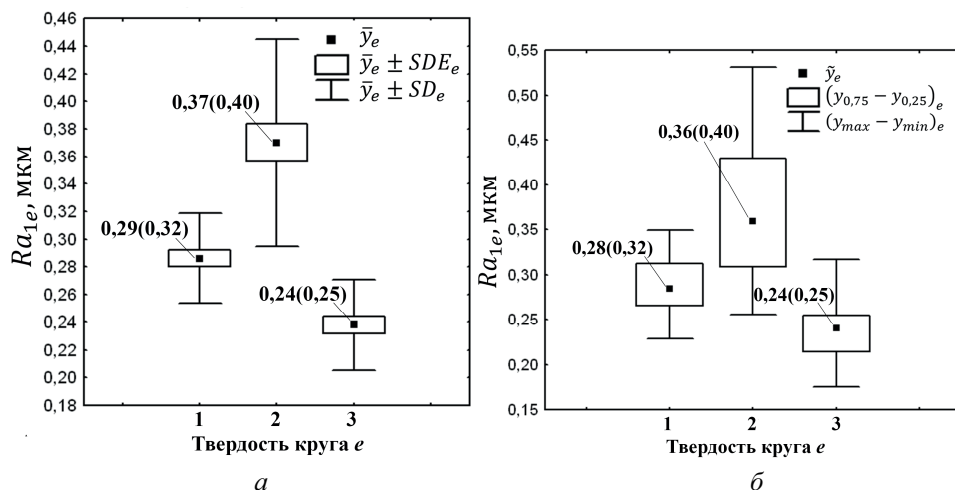


Рис. 1. Влияние твердости кругов на одномерные распределения частот параметра  $Ra_{de}$  для параметрического (а) и непараметрического (б) методов

Полученные результаты могут быть объяснены сложной зависимостью между шероховатостью, твердостью круга и интенсивностью съема металла. При шлифовании сталей различного химического состава с увеличением твердости круга интенсивность съема металла снижается, а качество шлифованной поверхности повышается. Так, при работе кругом с твердостью  $e = 3$  была достигнута наименьшая шероховатость, а для твердости  $e = 2$  обнаружена максимальная интенсивность съема и, как следствие, наименее качественная поверхность [17].

Таким образом, в работе установлено:

- твердость О ВПК из КБН признана лучшей по прогнозируемым мерам положения высотного параметра  $Ra_{13}$ ;
- БП Р9М4К8 рекомендуется шлифовать ВПК СBN30 В126 100 О V К27 – КФ40, который обеспечивает наилучшее качество их рабочих поверхностей с одновременно высокой стабильностью формирования микрогеометрии.

### Литература

- [1] Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. *Технология шлифования в машиностроении*. Санкт-Петербург, Политехника, 2007, 424 с.
- [2] Зубарев Ю.М. *Современные инструментальные материалы*. Санкт-Петербург, Лань, 2008, 224 с.
- [3] ГОСТ 25142—82. *Шероховатость поверхности. Термины и определения*. Введен 01.01.1983. Москва, Изд-во стандартов, 1982, 22 с.
- [4] Дальский А.М., ред. *Технологическая наследственность в машиностроительном производстве* / . Москва, МАИ, 2000, 364 с.
- [5] Геллер Ю.А. *Инструментальные стали*. Москва, Металлургия, 1983, 527 с.
- [6] Старков В.К. *Шлифование высокопористыми кругами*. Москва, Машиностроение, 2007, 688 с.
- [7] Солер Я.И., Прокопьева А.В. Исследование влияния выхаживания на микрорельеф поверхности режущих пластин Р9М4К8 при шлифовании кругами из кубического нитрида бора. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2009, № 1 (42), с. 24–27.
- [8] Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Selecting abrasive wheels for the plane grinding of Airplane Part of the Basic of surface Roughness. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, iss. 3, pp. 251–261.
- [9] Солер Я.И., Шустов А.И. Прогнозирование шероховатости поверхности инструментальных сталей при плоском шлифовании нитридборовыми кругами высокой пористости. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2013. № 10 (17), ч. 2, с. 81–86.
- [10] ГОСТ Р ИСО 5725-2—2002. *Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений*. Введ. 01.11.2002. Москва, Изд-во стандартов, 2002. 58 с.
- [11] Поллард Дж. *Справочник по вычислительным методам статистики* / пер. с англ. Москва, Финансы и статистика, 1982, 344 с.
- [12] Уиллер Д., Чамберс Д. *Статистическое управление процессами* / пер. с англ. Москва, Альпина Бизнес Букс, 2009, 469 с.
- [13] Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods, Second Edition*. Wiley-Interscience, 1999, 787 p.
- [14] ГОСТ Р 53923—2010. *Круги алмазные и из кубического нитрида бора (эльбора) шлифовальные. Технические условия*. Введ. 01.01.2012. Москва, Стандартинформ, 2011, 30 с.
- [15] ГОСТ 52587—2006. *Инструмент абразивный. Обозначения и методы измерения твердости*. Введ. 01.01.2008. Москва, Стандартинформ, 10 с.
- [16] ГОСТ 2789—73. *Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения*. Взамен ГОСТ 2789—59. Введ. 01.01.1975. Москва, Изд-во стандартов, 1973, 6 с.
- [17] Корчак С.Н. *Производительность процесса шлифования стальных деталей*. Москва, Машиностроение, 1974, 280 с.

УДК621.3.088

## Разработка методики оценки показателей достоверности при проведении измерительного контроля тонкопленочных фотоэлектрических модулей

© Богомолова Светлана Анатольевна, Лукашов Юрий Евгеньевич

Россия, Чувашская республика, г. Чебоксары,  
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова

[s\\_bogomolova@mail.ru](mailto:s_bogomolova@mail.ru)

*Рассмотрена методика оценки показателей достоверности контроля тонкопленочных фотоэлектрических модулей по параметрам, характеризующим их энергопроизводительность. Определены показатели достоверности контроля и описана математическая модель для их оценивания. Представлены теоретические и экспериментальные данные, необходимые для моделирования процесса контроля. Получены оценки показателей достоверности в результате моделирования контроля опытной партии тонкопленочных фотоэлектрических модулей. Приведен анализ области применения разработанной методики.*

**Ключевые слова:** *выходной контроль качества, достоверность контроля, неопределенность измерений, тонкопленочный фотоэлектрический модуль, фотоэлектрические параметры.*

В широком смысле контроль заключается в проверке соответствия объекта установленным требованиям [1, 2]. Обычно результат оценки установленного параметра или определенной характеристики изделия сравнивается с заранее определенными допустимыми границами. Если все значения оцененных характеристик изделия лежат в допустимых пределах, изделие считается годным, в противном случае — бракованным.

Выходной контроль качества тонкопленочных фотоэлектрических модулей (ФЭМ), обеспечивающих в настоящее время наибольшую эффективность преобразования солнечной энергии при сравнительно низкой стоимости затрат на их производство [3], проводится с целью проверки соответствия их энергопроизводительности установленным нормативным требованиям. При выходном контроле ФЭМ оценива-

ют значения фотоэлектрических параметров по результатам измерений ВАХ на имитаторе солнечного излучения и устанавливают их соответствие (несоответствие) границам допуска, заданным для параметров «максимальная мощность», «ток короткого замыкания», «напряжение холостого хода». В получении достоверных результатов контроля заинтересованы как потребители, так и изготовители фотоэлектрической продукции. При сортировке ФЭМ в зависимости от значений фотоэлектрических параметров производитель может предлагать изделия более высокого качества, когда их энергетическая эффективность превышает заявленный уровень, по цене изделий из стандартного номенклатурного ряда, что приводит к финансовым потерям (риск изготовителя). Аналогично существует риск получения потребителем низкоэффективных (бракованных) ФЭМ, которые по результатам проверки были признаны производителем годными к поставке конечному пользователю (риск потребителя). В случае предоставления потребителю в качестве кондиционной продукции высокоэффективных модулей, истинные энергетические параметры которых лежат за верхним пределом стандартного номенклатурного ряда, прямые финансовые потери не возникают. Однако в этом случае существует некоторый риск неконтролируемого превышения генерируемой ФЭМ мощности с угрозой повреждения аппаратуры регулирования и преобразования, а также перераспределения мощности при работе модулей в составе солнечной станции.

В данной работе представлена методика оценки показателей достоверности при проведении измерительного контроля тонкопленочных ФЭМ. Методика реализуется в несколько этапов:

- 1) выбор показателей достоверности;
- 2) математическое описание показателей достоверности — построение модели для их оценивания;
- 3) сбор и статистический анализ входных величин в разработанной модели;
- 4) оценивание показателей достоверности.

**Выбор показателей достоверности.** Для оценки показателей достоверности измерительного контроля ФЭМ в [4] рекомендуется использовать:

- $P_{Г-б}$  — вероятность признания годного изделия бракованным (вероятность ошибок 1-го рода);
- $P_{б-Г}$  — вероятность признания бракованного изделия годным (вероятность ошибок 2-го рода).

В случае однопараметрического двухальтернативного контроля величины  $x$  с заданными верхней и нижней границами поля допуска ( $a \leq x \leq b$ ) используются следующие выражения для вычислений  $P_{Г-б}$  и  $P_{б-Г}$ :

$$P_{Г-б} = \int_a^b f(x) \int_{-\infty}^{a-x} \varphi(\xi) d\xi dx + \int_a^b f(x) \int_{b-x}^{\infty} \varphi(\xi) d\xi dx; \quad (1)$$

$$P_{б-Г} = \int_{-\infty}^a f(x) \int_{a-x}^{b-x} \varphi(\xi) d\xi dx + \int_b^{\infty} f(x) \int_{a-x}^{b-x} \varphi(\xi) d\xi dx, \quad (2)$$

где  $f(x)$  — плотность вероятности распределения контролируемой величины;  $\varphi(\xi)$  — плотность вероятности распределения неопределенности (погрешности) контролируемой величины  $x$ .

Следует отметить, что вероятности  $P_{Г-б}$  и  $P_{б-Г}$  не являются независимыми. Вместе с событиями  $P_{Г-Г}$  (вероятностью признания годного изделия годным) и  $P_{б-б}$  (вероятно-



стью признания бракованного изделия бракованным) указанные вероятности составляют полную группу событий:

$$P_{\Gamma-\Gamma} + P_{\Gamma-6} + P_{6-\Gamma} + P_{6-6} = 1. \quad (3)$$

Для вычисления условной вероятности признания годного изделия годным,  $P_{\Gamma-\Gamma}$ , используется выражение

$$P_{\Gamma-\Gamma} = \int_a^b f(x) \int_{a-x}^{b-x} \varphi(\xi) d\xi dx + \int_a^b f(x) \int_{a-x}^{b-x} \varphi(\xi) d\xi dx. \quad (4)$$

**Математическое описание показателей достоверности.** В рассматриваемом случае контроль осуществляется по трем параметрам (трехмерный), поэтому значения вероятностей ошибок 1-го ( $P_{\Gamma-6}^{\Sigma}$ ) и 2-го рода ( $P_{6-\Gamma}^{\Sigma}$ ) определяются из выражений

$$P_{\Gamma-6}^{\Sigma} = P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^V P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} + P_{\Gamma-6}^V P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} + P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^V + P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^V P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} + P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} P_{\Gamma-6}^V + P_{\Gamma-6}^V P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} P_{\Gamma-6}^I + P_{\Gamma-6}^V P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^{P_{\max}}, \quad (5)$$

$$P_{6-\Gamma}^{\Sigma} = P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^V P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} + P_{6-\Gamma}^V P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} + P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^V + P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^V P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} + P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} P_{6-\Gamma}^V + P_{6-\Gamma}^V P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} P_{6-\Gamma}^I + P_{6-\Gamma}^V P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^{P_{\max}}, \quad (6)$$

где  $P_{\Gamma-6}^I$ ,  $P_{\Gamma-6}^V$ ,  $P_{\Gamma-6}^{P_{\max}}$  — вероятность признания не соответствующим установленным требованиям ФЭМ по значению определенного фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он этим требованиям удовлетворяет;  $P_{6-\Gamma}^I$ ,  $P_{6-\Gamma}^V$ ,  $P_{6-\Gamma}^{P_{\max}}$  — вероятность признания соответствующим требованиям ФЭМ по значению определенного фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он этим требованиям не удовлетворяет;  $P_{\Gamma-\Gamma}^I$ ,  $P_{\Gamma-\Gamma}^V$ ,  $P_{\Gamma-\Gamma}^{P_{\max}}$  — вероятность признания соответствующим требованиям ФЭМ по значению определенного фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он удовлетворяет этим требованиям.

Учитывая, что условные вероятности  $P_{\Gamma-6}$  и  $P_{6-\Gamma}$  примерно на два порядка меньше, чем  $P_{\Gamma-\Gamma}$ , слагаемыми после третьего можно пренебречь, то есть использовать для вычислений следующие выражения:

$$P_{\Gamma-6}^{\Sigma} \approx P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^V P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} + P_{\Gamma-6}^V P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} + P_{\Gamma-6}^{P_{\max}} P_{\Gamma-6}^I P_{\Gamma-6}^V, \quad (7)$$

$$P_{6-\Gamma}^{\Sigma} \approx P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^V P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} + P_{6-\Gamma}^V P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} + P_{6-\Gamma}^{P_{\max}} P_{6-\Gamma}^I P_{6-\Gamma}^V. \quad (8)$$

Для вычисления условных вероятностей используются выражения (1), (2), (4), а для их оценки необходимо располагать следующими сведениями:

- 1) математическое описание закона распределения вероятностей контролируемого параметра;
- 2) границы поля допуска контролируемого параметра;
- 3) математическое описание закона распределения вероятностей неопределенности (погрешности) контролируемого параметра.

Ввиду того, что распределения вероятностей контролируемого параметра не всегда точно аппроксимируются стандартными кривыми, для оценки показателей достоверности была сформирована имитационная модель системы контроля, входными величинами которой являются результаты измерений контролируемых параметров, их номинальные значения, характеристики законов распределения вероятностей неопределенностей (погрешностей), величина допуска.

Модель системы контроля реализуется по следующему алгоритму:

- 1) вводятся результаты измерений фотоэлектрических параметров;
- 2) для каждого контролируемого параметра оценивается отклонение результата измерения от номинального значения и сравнивается с величиной допуска;
- 3) для каждого контролируемого параметра генерируются значение неопределенности и величина отклонения результата измерения от номинального значения, скорректированная с учетом неопределенности, сравнивается с величиной допуска;
- 4) при сравнении по каждому параметру ведется учет случаев признать «годный» ФЭМ бракованным ( $N_{г-б}$ ), бракованный ФЭМ годным ( $N_{б-г}$ ), а также количество годных ( $N_g$ ) и бракованных ФЭМ ( $N_b$ );
- 5) оцениваются показатели достоверности контроля в соответствии с выражениями (7), (8).

**Определение значений входных величин в модели системы контроля.** Расчетно-экспериментальным методом были получены оценки суммарных расширенных неопределенностей фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ [5]: для тока короткого замыкания —  $\pm 2,54$  %, для напряжения холостого хода —  $\pm 0,70$  %; для номинальной мощности —  $\pm 2,80$  %. Представленные значения расширенных неопределенностей справедливы при нормальном (Гаусса) законе распределения вероятностей и уровне доверия  $P = 95$  %.

Определение величины допуска для отдельного фотоэлектрического параметра осуществлялось исходя из технических характеристик электrorаспределительной аппаратуры, которая предназначена для преобразования и перераспределения электрической энергии, генерируемой ФЭМ в составе солнечных станций. Величины симметричных допусков для фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ были определены на основании технических характеристик инверторов (указаны в процентах от номинального значения): для тока короткого замыкания —  $\pm 8,3$ ; для напряжения холостого хода —  $\pm 8,2$ ; для номинальной мощности —  $\pm 11,5$ .

**Оценивание показателей достоверности смоделированной системы контроля.** Для моделирования процесса контроля были использованы результаты измерений фотоэлектрических параметров 147 ФЭМ из опытной партии. В результате реализации разработанного алгоритма контроля были получены следующие значения показателей достоверности:  $P_{г-б}^{\Sigma} = 0,0148$ ,  $P_{б-г}^{\Sigma} = 0,0022$ .

Таким образом, сформированная модель системы измерительного контроля тонкопленочных ФЭМ позволила оценить значения показателей достоверности (вероятности ошибок 1-го и 2-го рода) при заданной величине неопределенности (погрешности) контролируемого фотоэлектрического параметра, величине допуска. Данная модель может быть использована для определения значения неопределенности фотоэлектрического параметра при заданном значении показателя достоверности, а также установления границ контрольного допуска для тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимальной мощности. Кроме того, данная модель позволяет решать и обратную задачу — предсказывать вероятности ошибок контроля при заданном значении неопределенности, положении границ контрольного допуска.

Литература

- [1] ГОСТ 16504—81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
- [2] ГОСТ ISO 9000—2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
- [3] Jahn U., Schweiger M., Herrmann W. Comparison of different thin-film technologies — performance characteristics obtained from laboratory and field tests. *Photovoltaic Solar Energy: Proc. 25th European Conf. Valencia (Spain)*, 2010, pp. 3769–3773.
- [4] ГОСТ Р 8.731—2010. ГСИ. Системы допускового контроля. Основные положения.
- [5] Руководство по выражению неопределенности измерения. Санкт-Петербург, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.

УДК 621.317

## Система для измерения параметров электродвигателя

© Ермаков Кирилл Сергеевич, Тумакова Екатерина Владимировна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

*Рассмотрены варианты решения проблем, которые возникают в процессе эксплуатации электродвигателя. Представлен анализ существующих методов и систем диагностики электродвигателей. Проведено математическое моделирование двух причин отказа электродвигателя.*

**Ключевые слова:** электродвигатель, электрические и механические параметры, контроль технического состояния.

В настоящее время основной частью энергопотребителей страны являются асинхронные электродвигатели, они потребляют более 70 % всей энергии. Прошлый опыт показывает, что большое количество отказов происходит из-за аварийных ситуаций при эксплуатации асинхронного электродвигателя. Поломка электродвигателя приносит большой ущерб предприятию. К убыткам добавляется снижение пожаробезопасности и электробезопасности, связанное с возможным коротким замыканием, которое может присутствовать в обмотке статора или ротора поврежденного электродвигателя. Обнаружение дефектов в работающем двигателе предупредит аварийную ситуацию и преждевременную остановку производства или предприятия в результате аварии, что также значительно снизит расходы на ремонт механизма и увеличит срок службы [1].

Объектом исследования в данной работе является двигатель АИР56В2У3 со следующими параметрами:

$P_{н}, Вт$ .....	250
$I_{н}, А$ .....	0,70
$n_{б}, об/мин$ .....	2730
$M_{н}, Н \cdot м$ .....	0,87
КПД, %.....	69
$\cos\phi$ .....	0,86

В данной работе рассматриваются варианты решения проблем, которые возникают в процессе эксплуатации электродвигателя. Проводится анализ существующих методов и систем диагностики электродвигателей [2]. В связи с тем, что механические и электрические параметры являются важными для контроля технического состояния электродвигателя, была разработана схема для контроля электрических и механических параметров асинхронного электродвигателя. В ходе работы были рассмотрены различные датчики и средства измерения для электрических и механических параметров для реализации данной схемы. Планируется разработать систему с использованием математической модели для оценки технического состояния электродвигателя. Данная система будет включать в себя диагностирование электродвигателя в режиме реального времени, что предотвратит преждевременный отказ двигателя [3].

Целью данной работы являлось изучение причин отказов двигателя, разработка системы и схемы для измерения электрических и механических параметров. В результате было проведено математическое моделирование двух причин отказа электродвигателя.

### Литература

- [1] Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, 2013, № 7.
- [2] Пономарев В.А., Суворов И.Ф. *Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей*. Чита, Читинский государственный университет, 2007.
- [3] Алешин С.В., Синопальников В.А., Соколов Е.А., Филатов В.В. Асинхронный трехфазный двигатель привода главного движения станка как датчик контроля состояния инструмента. *Вестник МГТУ Станкин*, 2010, № 13, с. 110–119.

УДК 681.2.083

## **Об оптимизации выбора схем базирования обеспечивающих точность измерений на координатно-измерительных машинах**

© Коленкин Александр Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[alexandr.kolenkin@mail.ru](mailto:alexandr.kolenkin@mail.ru)

*Рассмотрены проблемы базирования деталей и сборочных единиц при измерениях. Особое внимание уделено обобщению практического опыта реализации схем базирования при координатных измерениях.*

**Ключевые слова:** координатно-измерительная машина (КИМ), метод измерений, измерительная база, установочная база.

В условиях современной конкурентной борьбы производитель заинтересован в снижении финансовых издержек.

В существующих экономических условиях необходимо учитывать крайнюю важность бесперебойной работы механизма системы управления качеством для обеспечения конкурентоспособности конечного продукта.

Развитие технологий и средств производства изделия влечет за собой и совершенствование технологий и средств контроля. Существующие методы измерений (например, межосевых расстояний), реализуемые так называемыми универсальными средствами измерений, сменяются более современными средствами измерений, основанными на координатных методах. Из последних наибольшее распространение получили стационарные КИМ.

Применение различных координатных средств измерений, основанных на измерении двух (УИМ, современные измерительные микроскопы и т. д.) либо трех координат (КИМ стационарные, портативные), имеет множество специфических особенностей, в том числе влияющих на достоверность получаемых результатов.

Достоверность результатов используемых на данный момент методов измерений на координатно-измерительных машинах зависит не только от самих машин (их текущих точностных характеристик), но и от применяемых методов измерений конкретных параметров точности. В свою очередь метод измерений зависит от выбора установочных и измерительных баз.

Термин «установочная база» является согласно [1], недопустимым к применению, но повсеместно используется при координатных измерениях. Необходимо отметить некоторое несоответствие расшифровки этого термина в [1] тому, чем в действительности является эта база при координатных измерениях.

За установочные базы принимаются конструктивные элементы (плоскости, отверстия и т. д.), когда их измерение по данной операции не требуется проводить, их размер достаточен для осуществления неподвижного закрепления детали, при этом без деформации детали, их использование позволяет произвести измерение «измерительных баз» и контролируемых по данной операции параметров.

Термин «измерительная база» также имеет некоторые различия в [1] и при координатных измерениях. В некоторых источниках (например, [3]) вместо термина «измерительная база» применяется термин «привязка», при этом не изменяется его смысловая нагрузка.

Важно, что измерительные и установочные базы при координатных измерениях в большинстве случаев не могут совпадать в силу невозможности реализации закрепления и одновременно ощупывания одних и тех же конструктивных элементов.

Выбор измерительных и установочных баз производится специалистом, разрабатывающим технологию измерений. Сама технология измерения представляет собой алгоритм действий (измерений, построений, перемещений) координатно-измерительной машины. Правильность выбора баз зависит от квалификации указанного выше специалиста, а точность результата измерений — от конструктивных особенностей, выбранных в качестве баз конструктивных элементов.

Зависимость точности (в некоторых случаях правильности) измерений от установочных и измерительных баз необходимо учитывать при применении координатных методов измерений (в частности координатно-измерительных машин) в технологическом цикле производства изделий.

## Литература

- [1] ГОСТ 21495—76. *Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения*. Москва, 1976.
- [2] *Технический контроль в машиностроении: справочник проектировщика* / под ред. В.Н. Чупырина, А.Д. Никифорова. Москва, 1987.
- [3] Каталог измерительного инструмента и оборудования 2015–2017 Mitutoyo [Электронный ресурс]. Москва, ООО «Митутойо РУС», URL: [http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/ru\\_ru/index.html?page=590](http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/ru_ru/index.html?page=590) (дата обращения 25.06.2015).
- [4] Коленкин А.В. О выборе баз, обеспечивающих точность измерений на координатно-измерительных машинах. *Сб. мат. XIII Всерос. науч.-техн. конф. «Состояние и проблемы измерений»*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 97.

УДК 004.942:621.165:313.126

## Эффективность и техническое регулирование информационно-метрологического обеспечения объектов машиностроения

© Комшин Александр Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[komshin\\_as@mail.ru](mailto:komshin_as@mail.ru)

*Рассмотрен подход к повышению энергоэффективности информационно-метрологического обеспечения функционирования объектов циклического действия в области машиностроения. Рассчитан экономический эффект от внедрения инновационных систем на основе модели Кобба — Дугласа.*

**Ключевые слова:** *эффективность, измерительный контроль, качество, диагностика, фазохронометрия, национальная система, экономический эффект.*

Начало XXI века ознаменовало переход из пятого в шестой технологической уклад. Переход в шестой технологической уклад характеризуется развитием новых технологий в таких направлениях, как наноэлектроника, наноматериалы, нанобиотехнология, наносистемы. Безусловно, технологический прорыв возможен только при развитии элементов нано-, био- и информационных технологий и развитой промышленности в рамках шестого уклада [1].

Период смены технологических укладов также характеризуется резким сокращением времени между прорывными фундаментальными исследованиями и успешными инновационными проектами. В ключевых направлениях становления нового технологического уклада коммерчески успешные фирмы нередко появляются из научных лабораторий [2].

Установлено, что максимальная точность измерений, достижимая аппаратурой, размещенной в лаборатории, определяется уровнем энергообеспечения процедуры

измерения. Своеобразие энергетического обеспечения процедуры измерения проявляется и в том, что в отличие от целого ряда фундаментальных соотношений неопределенностей, характерным примером которых может служить известное соотношение для неопределенностей координат и импульсов, аналогичное соотношение для неопределенностей энергии и времени не является фундаментальным и может быть преодолено современными техническими средствами в режиме дискретных стробоскопических отсчетов [3].

Вместе с тем перспективный фазохронометрический метод, одна из модификаций стробоскопического подхода, открывает возможности информационно-метрологического сопровождения работы механизмов циклического действия в энергетике, на транспорте и в других отраслях отечественной техники. Дальнейшим развитием данного подхода должно явиться создание национальных систем прогнозирующего мониторинга и аварийной защиты объектов единой энергетической системы России, а также метрологического обеспечения полного жизненного цикла отечественных машин и механизмов.

В ближайшие годы необходимо решение целого ряда фундаментальных теоретических и прикладных задач для обеспечения существенного прорыва в развитии и освоении ближнего космоса, таких как: разработка суперсовременных систем дистанционного зондирования Земли; разработка сверхскоростных систем передачи широкополосной информации; управление космическими аппаратами на дальних орбитах при реализации лунной программы и обеспечении пилотируемого полета на Марс и т. п.

Эксплуатация всей совокупности объектов машиностроительного комплекса страны, включая энергетику и транспорт, добывающую и обрабатывающие отрасли, объекты промышленного и гражданского строительства, жилищно-коммунального хозяйства требует создания надежно налаженной системы измерительно-вычислительного прогнозирующего мониторинга, внедрения инновационных энергоэффективных решений на уровне технологий XXI века.

Насыщение техники прецизионными встроенными измерительными прогнозирующими системами предполагает и высокий уровень математического обеспечения функционирования производственного комплекса в целом. Его основу должны составить многофакторные математические модели функционирования промышленных объектов. Итогом такого рода модернизации должны явиться не только более рациональный жизненный цикл эксплуатации техники, но и наиболее совершенный замкнутый цикл циркулирования — оборота металла, включая заготовительный, производственный, эксплуатационный, утилизационный этапы с последующим возвращением на заготовительный этап. Тем самым можно будет гарантировать минимальный ущерб экологии.

Научное направление информационно-метрологического сопровождения создания и эксплуатации циклических машин и механизмов на основе прецизионного хронометрического анализа фазы рабочего цикла, развиваемое в МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках научно-образовательного инжинирингового центра «Прецизионное метрологическое обеспечение машиностроения», является новым инновационным подходом к решению проблем функционирования и диагностики циклических машин и механизмов, представляющим собой реализацию TIMES-технологий в рамках шестого технологического уклада. Развиваемый метод зарекомендовал себя в экспериментальных исследованиях турбоагрегатов, часовых механизмов, подшипников, ДВС, редукторов и т. п. [4].

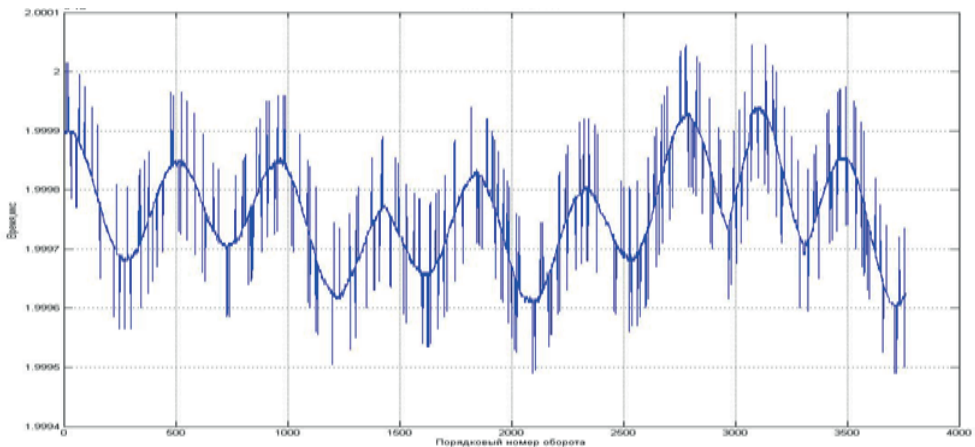
В ходе этих работ сформулирована концепция метрологического обеспечения жизненного цикла циклических машин и механизмов на основе оперативного использования прецизионной информации, систематически получаемой от встроенных фазохронометрических блоков, постоянно идентифицируемых математических моделей функционирующих контролируемых объектов.

Данная концепция получила одобрение Росстандарта, однако эти работы не получили государственной поддержки от Министерства энергетики и Министерства промышленности и торговли.

В процессе эксплуатации одной из ключевых задач является диагностика технического состояния функционирующего объекта. Согласно ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения» техническое диагностирование включает в себя:

- оценку технического состояния объекта;
- обнаружение и определение места локализации неисправностей;
- прогнозирование остаточного ресурса объекта;
- мониторинг технического состояния объекта.

Рассмотрим пример обнаружения и определение места локализации неисправности турбоагрегата. На рис. 1 приведена хронограмма вращения дефектного турбоагрегата ТВВ-320-2УЗ-Т-250/300-240-2, в котором в процессе работы (без останова машины) обнаружено искрение щеток щеточного аппарата.



**Рис. 1.** Хронограмма вращения турбоагрегата ТВВ-320-2УЗ-Т-250/300-240-2, отражающая диагностируемый дефект — искрение щеток щеточного аппарата

Таким образом, в процессе эксплуатации определяется дефект, локализуется относительно конструкции всего турбоагрегата, определяется причина возникновения данной неисправности, т. е. решаются прямые задачи диагностики, мониторинг технического состояния объекта, оценку технического состояния, прогнозирование остаточного ресурса элементов или турбоагрегата целиком.

**Экономическая эффективность внедрения фазохронометрических систем в теплоэнергетику.** Рассчитан экономический эффект от внедрения информационно-метрологической фазохронометрической технологии. Если результат будет достигнут не в полной мере, т. е. в объеме 7,5 млн руб. на один агрегат (половина от планируемого уровня), то результат проекта в прогнозных ценах будет следующий:



- чистый приведенный доход — 622 млн руб.
- срок окупаемости — 5 лет.

Экономические расчеты выполнены с кафедрой ИБМ-3 «Промышленной логистики» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Случаи аварий и отказов (с разной степенью катастрофичности последствий) для турбоагрегатов и вспомогательного оборудования, не выработавших ресурс требуют фундаментального научного обоснования по продлению ресурса работы оборудования (наработка порядка 150–200 тыс. ч).

В качестве оценочного критерия можно взять производственную функцию Кобба — Дугласа, отражающую в общем виде зависимость факторов экономического роста объема производства от создающих его условий стоимости основных фондов, трудовых ресурсов [5]

$$Q = AK^\alpha L^\beta STD^\epsilon PAT^\delta, \quad (1)$$

где  $Q$  — объем производства (ВВП);  $K$  — стоимость основных фондов;  $L$  — трудовые ресурсы;  $STD$  — фонд стандартов;  $PAT$  — фонд патентов;  $A$  — коэффициент научно-технического прогресса;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$  — коэффициенты эластичности по капиталу, труду, стандартам и патентам.

Внедрение современных информационных измерительных технологий на примере ТИМЕС-технологий способствует резкому сокращению времени между прорывными фундаментальными исследованиями и внедрению инновационных решений на базе научного прогресса.

Для целей учета инновационной составляющей могут быть введены дополнительные параметры в выражение (1). Такими показателями могут быть прорывные технологии ( $TEC$ ) и инновационный потенциал внедрения технологий ( $INW$ ).

Коэффициенты эластичности по капиталу, труду, стандартам и патентам примем равными 0,08; 5,21; 0,41; 0,03 [6]. В соответствии с представленными результатами [6] внедрение новых решений через увеличение стандартов на 1 % приводит к росту ВВП на 0,41 %, а, согласно статистическим данным, среднегодовой вклад только стандартов в ВВП составляет порядка 0,9 %.

**Заключение.** Применение фазохронометрического подхода требует внедрения в практику нормативного обеспечения с последующим включением в соответствующие группы технических регламентов для создания национальной системы информационно-метрологического обеспечения функционирования машиностроения страны на базе фазохронометрического метода.

Экономический эффект от внедрения инновационных систем на основе фазохронометрического подхода, полученный по модели Кобба — Дугласа, может дать прирост ВВП страны от 1 %.

*Работа поддержана в рамках выполнения проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 9.1265.2014/К, Гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых-кандидатов наук МК-3625.2015.8.*

#### Литература

- [1] Россия на пути к современной динамичной и эффективной экономике. Докл. РАН. Под ред. акад. А.Д. Некипелова, В.В. Ивантера, С.Ю. Глазьева. Москва, Изд-во РАН, 2013б 93 с.
- [2] Глазьев С.Ю. *Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса.* Москва, Экономика, 2010, 255 с.

- [3] Киселев М.И., Комшин А.С. *Повышение точности измерений определяющий фактор развития бортовых энергетических установок орбитальных космических комплексов*. XXXIX Акад. чтения по космонавтике, посвященные памяти академика Королева С.П. Москва, 27–30 января. Москва, 2015, с. 55–56.
- [4] Комшин А.С. Мониторинг оборудования в сере энергетики — требование безопасности. *Стандарты и качество*, 2014, № 2 (919), с. 24–27.
- [5] Аронов И.З., Ильина Е.В., Оценка эффективности национальной стандартизации. *Стандарты и качество*, 2014, № 3 (921), с. 24–28.
- [6] Белобрагин В.Я., Зажигалкин А.В., Зворыкина Т.И. *Основы стандартизации*: учеб. пособие. Москва, РИА «Стандарты и качество», 2014, 464 с.

УДК 53.086

## Применение методов зондовой микроскопии для исследования объектов машиностроения

© Крансуцкая Анастасия Алексеевна, Тумакова Екатерина Владимировна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[kransutzkaya@yandex.ru](mailto:kransutzkaya@yandex.ru)

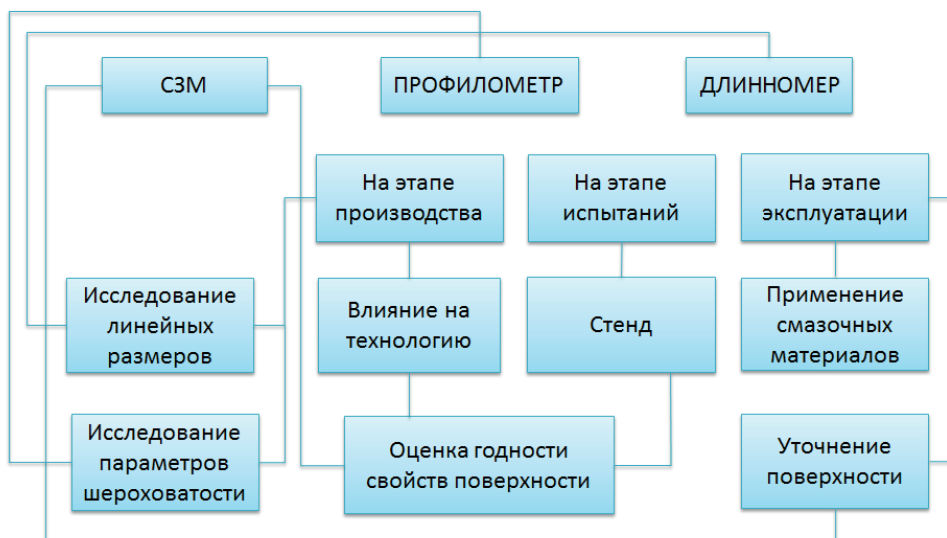
*Рассмотрены способы оценки годности поверхности. Приведены результаты исследования режущей кромки лезвия в качестве примера возможностей сканирующей зондовой микроскопии. Представлен комплексный подход к исследованию объектов машиностроения на примере подшипников качения различных размеров и производителей.*

**Ключевые слова:** нанотехнологии, машиностроение, подшипники качения, макро рельеф поверхности, СЗМ, профилометр, длинномер, контроль поверхности.

Характерной особенностью развития ведущих экономически развитых стран является переход к инновационной экономике, внедрение перспективных разработок, принципиально новых высоких технологий во все сферы деятельности человека. Одним из приоритетных направлений развития научно-технического прогресса в мире являются нанотехнологии. При этом данное направление зачастую рассматривается как рычаг, способный обеспечить политическое, финансовое и военное превосходство [1].

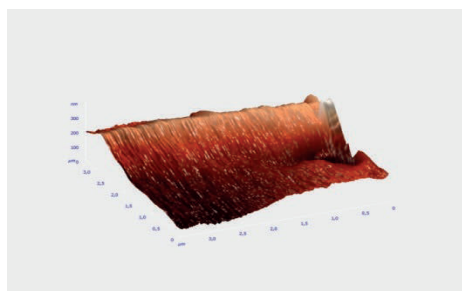
Надежность и долговечность объектов машиностроения тесно связаны с обеспечением необходимой точности их изготовления. Типовые изделия массового производства, без которых не обходится большинство конструкций, — подшипники. Основными составляющими подшипника являются тела качения (различной формы), сепаратор и корпусные кольца (внешнее и внутреннее). Разноразмерность тел качения в комплекте подшипника — причина повышенного износа и выхода из строя сепаратора и подшипника в целом. А от качества подшипников в значительной мере зависит коэффициент полезного действия, работоспособность и долговечность машины [2].

Представлен комплексный подход к исследованию объектов машиностроения (рис. 1) на примере подшипников качения различных размеров и производителей.

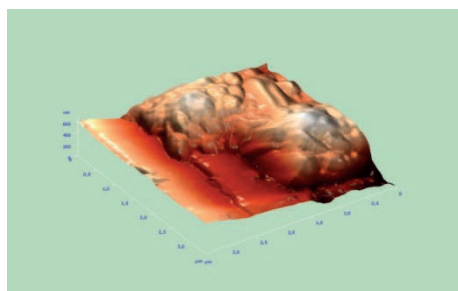


**Рис. 1.** Комплексный подход к исследованию объектов машиностроения от субмикронной точности до измерения размера

В качестве одного из инструментов комплекса выбрана сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), где туннельный ток локализуется в области порядка атомных размеров, позволяя получить пространственные характеристики состояния поверхности (рис. 2), дает возможность осуществить контроль поверхности на наноуровне [3, 4].



а

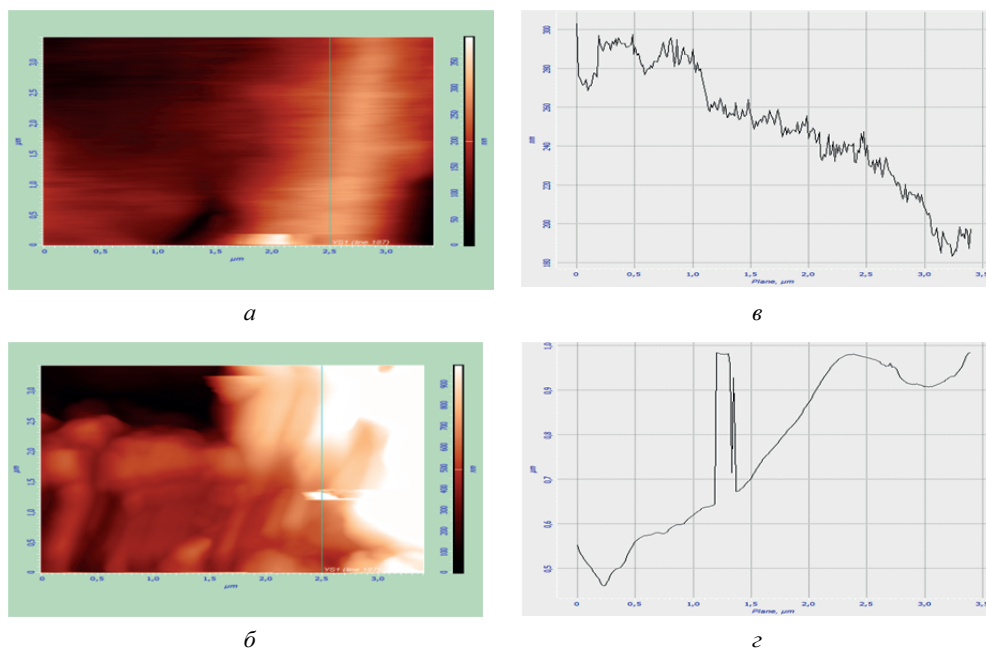


б

**Рис. 2.** 3D-изображение поверхности:

а — недеформированной поверхности образца; б — поверхности образца после деформации

Возможности СЗМ проиллюстрированы на примере проведенного исследования поверхности режущей кромки лезвия методами зондовой микроскопии на базе атомно-силового микроскопа Solver P47 (рис. 3) [4].



**Рис. 3.** Топография поверхности недеформированного образца (а) и образца после деформации (б). Изменение профиля поверхности по оси  $Y$  недеформированного образца (в) (г) образца после деформации

Результатом является сравнительный анализ топологии поверхности составных элементов подшипников, в частности, тел качения.

*Работа поддержана в рамках НИР по выполнению проектной части государственного задания в сфере научной деятельности. Задание № 9.1265.2014/К.*

### Литература

- [1] Кочанов Д.И. МИПК МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы применения. *РИТМ*, 2010, № 8 (56), с. 16–21.
- [2] URL: [http://www.prompk.ru/ntn-snr/e/about\\_bearings/about\\_bearing.htm](http://www.prompk.ru/ntn-snr/e/about_bearings/about_bearing.htm) (дата обращения 20.06.2015).
- [3] Физическая энциклопедия: в 5 т. Москва, Советская энциклопедия, 1988.
- [4] Крансуцкая А.А., Ружицкая Д.Д. Изучение поверхности режущей кромки лезвия методами зондовой микроскопии. *Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 4. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/772963.html> (дата обращения 01.06.2015)

УДК 621.792

## **О возможности применения измерительного контроля адгезивных соединений электрорезистивными, электроемкостными и акустическим методами**

© Масленникова Екатерина Викторовна, Тумакова Екатерина Владимировна,  
Комшин Александр Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[tumakova\\_ekaterina91@mail.ru](mailto:tumakova_ekaterina91@mail.ru)

*Перечислены основные методы неразрушающего контроля клеевых соединений. Представлен оригинальный метод контроля сборки клеевых соединений. Выполнены расчеты переходного сопротивления и емкости клеевого шва. Предложена схема измерения склеенных металлических пластин. Проведен анализ результатов измерений склеенных металлических пластин и расчет относительной погрешности измерений.*

**Ключевые слова:** клеевые соединения, контроль качества клеевых соединений, методы контроля клеевых соединений, неразрушающий контроль, электрорезистивные и электроемкостные методы измерений.

Долгое время считалось, что все клеевые соединения относятся к неразборным. Однако прогрессивное развитие клеевой индустрии, разработка новых технологий сборки клеевых соединений позволяют говорить как о необходимости значительной модернизации классификаций, отражающих современную действительность, так и о применении современных способов измерения клеевых соединений.

Контроль сборки клеевых соединений — один из обязательных этапов технологического процесса сборки. Методы и организационные формы контроля зависят от ответственности соединения, габаритов изделия, оснащенности и серийности производства.

Контроль качества склеивания неотвественных соединений осуществляют визуально. Ответственные соединения подвергаются испытаниям, которые разделяют на неразрушающие и разрушающие [1, 2].

При неразрушающих испытаниях в настоящее время наибольшее распространение нашли методы, основанные на применении радиоактивного и рентгеновского излучения, акустического и ультразвукового резонанса, электронной микроскопии, электронной эмиссии, инфракрасного и лазерного излучения, голографии, на измерении электросопротивления и диэлектрической проницаемости, измерении теплопроводности.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан оригинальный метод контроля сборки клеевых соединений. На его основе создано экспериментальное устройство контроля клеевых соединений. Данный подход основан на использовании при контроле качества клеевого соединения прецизионных электрорезистивных и электроемкостных методов измерений. При использовании данных методов можно определить наличие дефектов в клеевом шве.

Суть предлагаемого метода заключается в измерении переходного электрического сопротивления и емкости клеевого шва.

Расчет переходного сопротивления можно произвести по формуле

$$R_{\text{п}}(S_k) = \rho C \frac{\sqrt{\text{НВ}}}{P_k^b}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление, Ом · мм;  $C$  — коэффициент, зависящий от степени чистоты поверхности; НВ — твердость поверхности по Бринеллю, кгс/мм<sup>2</sup>;  $P_k$  — контактное давление, кгс;  $b$  — показатель степени, зависящий от вида и формы зоны контактирования.

Более информативным параметром является емкость контакта. Так как поверхности склеиваемых деталей разделены клеем, который является диэлектриком, то можно говорить о конденсаторе, емкость которого для плоских деталей можно рассчитать по классической формуле:

$$C_k = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость клея;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная, Ф/мм;  $S$  — площадь обкладок конденсатора, мм<sup>2</sup>;  $d$  — расстояние между обкладками, мм.

Если слой клея тонкий, то контакт происходит по микронеровностям, и можно использовать следующую формулу [3]:

$$C_{\text{п}} = \frac{5,82\varepsilon_0 \sqrt{r_{\text{пр}} F_k} (1-\mu)^2}{E_{\text{пр}} a_m^{1,5}} \left( 2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_1 \frac{(h_m - a_m)^2}{a_m^2} + 4\varepsilon_1 h_m \left( \frac{0,5}{\sqrt{h_m - a_m + a_n}} + \frac{1}{\sqrt{a_m - a_n}} \right) \right), \quad (3)$$

причем

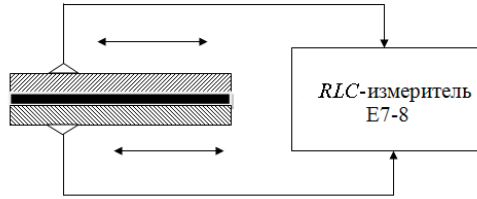
$$r_{\text{пр}} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}; \quad F_k = \frac{\sin \Delta \alpha}{ab \cos \alpha_B \cos \alpha_a} S_k^2, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная, Ф/м;  $\varepsilon_1$  — относительная диэлектрическая проницаемость;  $r_{\text{пр}}$  — приведенный радиус неровностей, мм;  $F_k$  — контактное усилие на сопрягаемых поверхностях, кгс;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $E_{\text{пр}}$  — приведенный модуль Юнга, кгс/мм<sup>2</sup>;  $h_m$  — максимальная высота выступов, мкм;  $a_m$  — максимальное внедрение выступов, мкм;  $a_n$  — минимальное внедрение выступов, мкм.

На рис. 1 приведена схема измерения склеенных металлических пластин. Измерения проводятся с помощью цифрового RLC-измерителя Е7-8. На практике могут быть использованы любые другие средства измерения сопротивления и емкости.

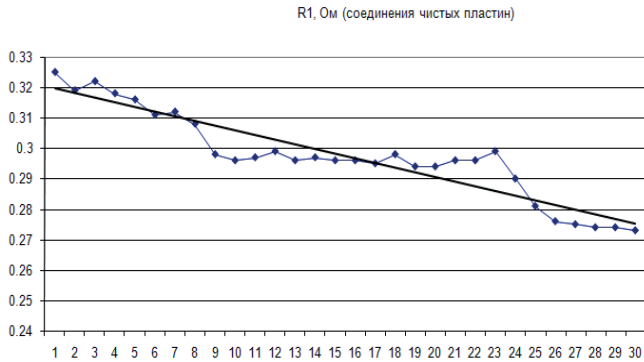
Особенностью измерений склеенных металлических пластин является выполнение требований к точности средств измерений, обеспечивающих получение необходимого результата. В общем случае можно рассчитать емкость соединения двух пластин, используя выражение (2), по сути можно говорить о плоском конденсаторе. Тогда оценить площадь контакта можно с помощью выражения

$$S = \frac{dC_k}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (5)$$



**Рис. 1.** Схема измерения сопротивления и емкости, склеенных пластин при контроле

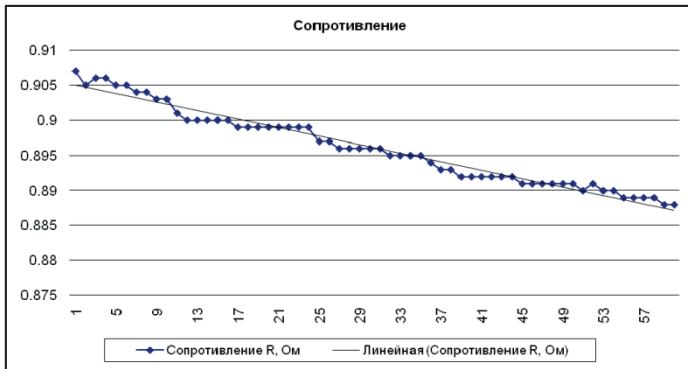
На рис. 2, 3 приведены результаты измерения сопротивления двух сопряженных пластин с различной толщиной и дефектностью до склеивания. На рисунках видно, что сопротивления и емкости неоднородны по всей поверхности, что свидетельствует о наличии пустот. Измерения цифровым *RLC*-измерителем E7-8 представлены на рис. 4 и 5, где показаны сопротивления и емкости склеенных металлических пластин.



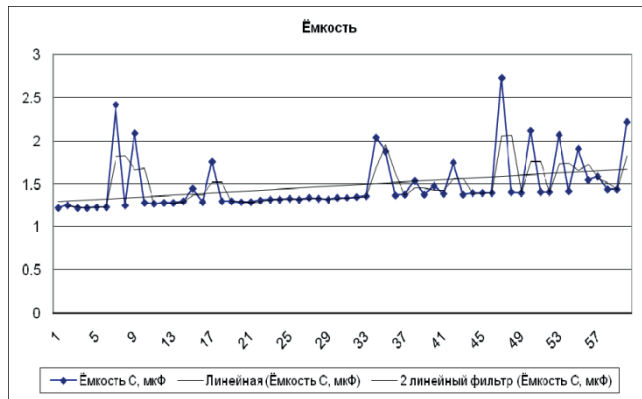
**Рис. 2.** Результат измерения сопротивления двух сопряженных пластин с различной толщиной и дефектностью



**Рис. 3.** Результат измерения емкости двух сопряженных пластин с различной толщиной и дефектностью



**Рис. 4.** Результат измерения сопротивления склеенных пластин с различной толщиной и дефектностью

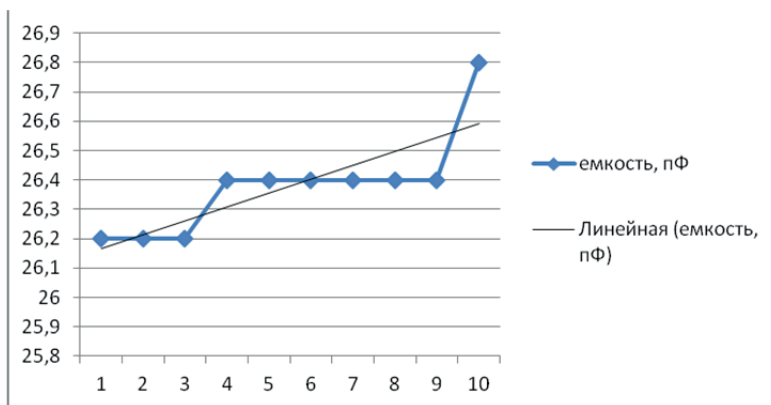


**Рис. 5.** Результат измерения емкости склеенных пластин с различной толщиной и дефектностью

Результаты измерения клеевого соединения из плоских металлических пластин при принудительном формировании неполного заполнения клеевого шва показали чувствительность метода и высокую повторяемость результатов измерений. Суть эксперимента заключалась в измерении площади клеевого соединения с помощью микрометра с цифровым отсчетом 1 класса точности (погрешность измерения  $\Delta_{СИ} \leq 1$  мкм) и оценке площади с помощью выражения (3). На рис. 6 показан результат многократных измерений. Следует отметить, что увеличение емкости связано с высокой чувствительностью метода и нестабильностью нормальных условий измерений, в первую очередь температуры и влажности.

Анализ результатов измерений показал, что среднее квадратичное отклонение полученных результатов  $S = 0,175$  пФ, среднее значение емкости  $C_k = 26,38$  пФ, толщина 1,85 мм. Оценка площади показала, что измеренное значение  $S = 1,408 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, а расчетное, полученное из выражения (3),  $S = 1,40 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Относительная погрешность измерения не превысила значения 0,56 % [3, 4].





**Рис. 6.** Результат измерения емкости двух пластин постоянной толщины при неполном заполнении клеевого шва

Относительная погрешность измерения площади контакта не превышает значение 0,6 %, что на порядок точнее существующих средств неразрушающего контроля, встраиваемых в автоматизированные линии. Такая погрешность измерения обеспечивает точность измерения дефекта клеевого шва в пределах  $\pm(5...10)$  мм<sup>2</sup>.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-06447а. Отдельные результаты поддержаны в рамках НИР 9.1265.2014/К по выполнению проектной части государственного задания в рамках научной деятельности.*

### Литература

- [1] Игнатов А.В. Формирование качества сборки клеевого соединения в машиностроении в зависимости от характеристик поверхностного слоя детали. *Инженерный вестник*, 2012, № 11, 77-48211/511504.
- [2] Игнатов А.В. *Применение клеев при сборке изделий в машиностроении: учеб. пособие*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 43 с.
- [3] Игнатов А.В., Комшин А.С., Потапов К.Г., Масленникова Е.В. Особенности измерительного контроля сборки клеевых соединений электрорезистивными и электроемкостными методами. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2014, № 6, с. 13–18.
- [4] Тумакова Е.В. Применение метода акустических измерений к сэндвич-панелям, изготовленных с использованием метода инъекции длинного волокна. *Радиооптика. Сетевое издание*, 2015, № 1, с. 29–38.

УДК 621.391

## Разработка методики исследования параметров сигнала с первичного преобразователя фазохронометрической системы

© Мисюра Яна Эдуардовна, Комшин Александр Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[misyura93@yandex.ru](mailto:misyura93@yandex.ru), [kozyr.ru@mail.ru](mailto:kozyr.ru@mail.ru)

*Предложена методика исследования параметров сигнала с первичного преобразователя фазохронометрической системы — датчика углового перемещения ЛИР-158А с помощью осциллографа Tektronix TDS2024С. Первичный преобразователь вносит наибольший вклад в оценку погрешности всей фазохронометрической системы в целом. В результате работы получены данные нужных параметров, разработан стенд для исследования узла «датчик-генератор».*

**Ключевые слова:** метрология, фазохронометрическая система, угловой датчик, ЛИР-158А, осциллограф, погрешность, неопределенность.

Состояние используемого измерительного и производственного оборудования оказывает непосредственное влияние на качество выпускаемой продукции. При этом к системам, считающимся высокоточными, предъявляются постоянно растущие требования к точности получаемых данных, работоспособности и надежности.

Все это связано с низким метрологическим уровнем имеющегося диагностического оборудования как на производстве, так и в эксплуатации.

Одним из способов повышения точности является применение фазохронометрического метода, позволяющего иметь высокую разрешающую способность и чувствительность к деградиционным процессам в станках и механизмах машин, предотвращение или корректировка которых помогут существенно снизить долю брака и настроить производственный процесс в целях улучшения качества продукции.

Целью работы является исследование неопределенности по времени первичного преобразователя фазохронометрической системы, так как в дифференциальные уравнения описания динамики циклических механизмов и машин входят время и фаза, они взаимосвязаны с характеристиками анализируемого объекта.

В некоторых случаях очень важно знать точные параметры формы импульса. Искаженные импульсы могут стать причиной неправильного функционирования цифровой схемы, кроме того, может нарушаться синхронизация в последовательности импульсов.

В качестве первичного преобразователя был выбран угловой датчик ЛИР-158А. Погрешность для данного датчика 5-го класса точности составляет  $\pm 15''$ . Датчик способен вырабатывать синусоидальный сигнал напряжения и прямоугольный импульсный сигнал с уровнями TTL и HTL.

Общий вид стенда показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид стенда

В процессе исследования с помощью преобразователя частоты LS600-2001 задается нужная частота вращения двигателя.

Вращающийся вал электродвигателя через переходную муфту приводил в движение вал датчика. Сигнал об угловых перемещениях датчика с помощью коаксиального кабеля фиксировался осциллографом Tektronix TDS2024C.

Исследование проводилось на синусоидальном сигнале напряжения.

Для крепления датчика отсутствовали типовые стойки или штативы. Требовалась разработка стола для крепления узла датчик — генератор. Чертеж предложенного варианта представлен на рис. 2.

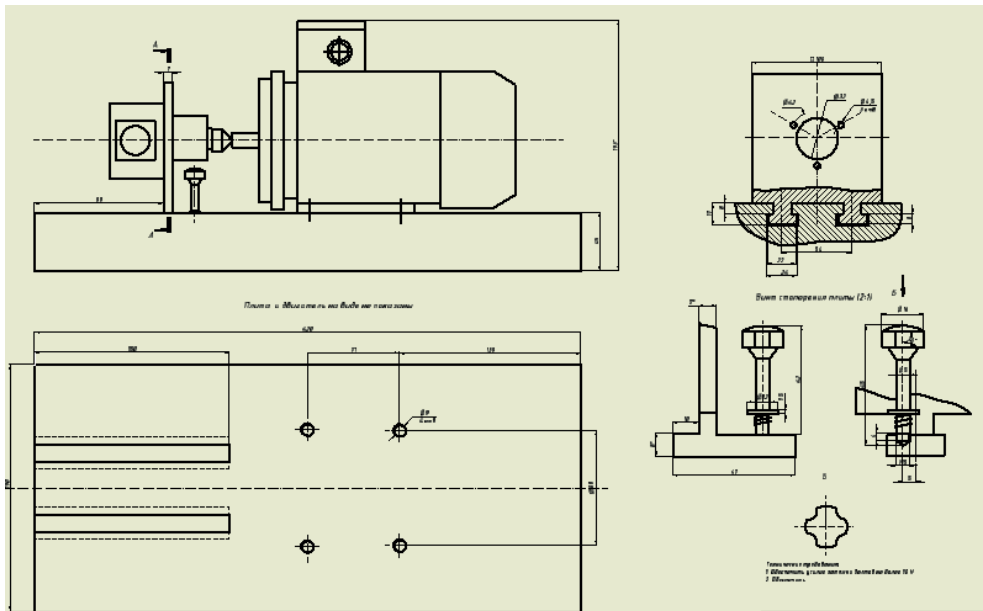


Рис. 2. Проектирование стойки и стола стенда для крепления узла датчик — двигатель

Сигнал с датчика не является идеальным, есть небольшое колебание. Для выяснения неопределенности сигнала датчика по времени проводилось более детальное исследование нарастающего и спадающего фронта синусоиды от самой нижней точки до самой верхней точки впадины.

Неопределенность считается в делениях горизонтальной оси как ширина максимального коридора между двумя касательными к сигналу с датчика. Исследуемая частота — 600 Гц. Пример одного из изображений на дисплее осциллографа представлен на рис. 3.

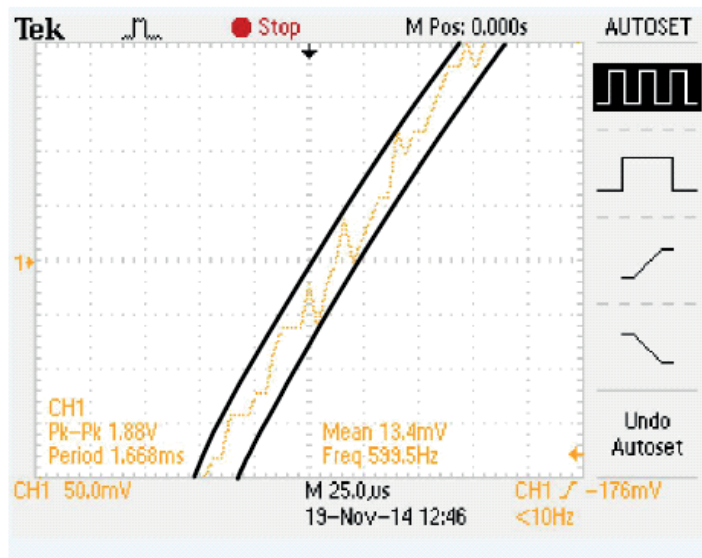


Рис. 3. Изображение на экране осциллографа и построенные границы коридора неопределенности сигнала

За временной параметр отвечает коэффициент горизонтальной развертки осциллографа. Согласно данным, заявленным производителем, для осциллографа Tektronix модели TDS2024B, использованного в данном случае, диапазон горизонтальной развертки составляет 2,5 нс/дел ... 50 с/дел. Погрешность горизонтальной развертки —  $50 \cdot 10^{-6}$  с, т. е. 50 мкс. Полученный результат сравнивается с этим показателем.

### Литература

- [1] Комшин А.С. Фазохронометрический метод диагностики состояния металлорежущих станков. *РИТМ*, 2012.
- [2] Пронякин В.И. Метрологическое обеспечение фазохронометрических систем. *Молодежный научно-технический вестник*, 2012, № 12.
- [3] Сайт производителя датчиков СКБ ИС. URL: <http://www.skbis.ru/> (дата обращения 15.05.2015).
- [4] Сайт производителя измерительной техники. URL: <http://ru.tek.com/> (дата обращения 20.05.2015).

УДК 53.086

## Обзор возможностей программы Gwyddion на примере исследования искусственного опала

© Ружицкая Дарья Дмитриевна, Комшин Александр Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[Blackky666@mail.ru](mailto:Blackky666@mail.ru)

*Рассмотрены основные возможности программы Gwyddion. Изложены способы улучшения качества полученного с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) изображения искусственного опала. Приведен пример устранения искажений полученного изображения. Показаны возможности обработки данных топографии поверхности. Представлен пример работы с зернистыми структурами. Дан обзор работы с объектами, демонстрирующими свойства самоподобия (фрактальные структуры).*

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, Gwyddion, рельеф поверхности, зерна, фракталы.

Развитие общества неразрывно связано с развитием научно — технического прогресса. Особо следует отметить начало XXI века — начало стремительного развития нанотехнологий. Нанотехнологии немислимы без новых, более совершенных методов и инструментов измерений [1]. Одним из наиболее часто встречающихся методов исследований в этой области является зондовая микроскопия (АСМ, МСМ, СТМ, СБОМ). Для анализа полученных результатов в августе 2004 года была создана программа Gwyddion [2]. В настоящее время данная программа находится в свободном доступе, что позволяет непрерывно совершенствовать ее возможности, а также поддерживается Чешским институтом метрологии.

В работе показан обзор возможностей программы Gwyddion на примере исследования образца искусственного опала. Изображение образца получено на атомно-силовом микроскопе в полуконтактном режиме и представлено на рис. 1 [3].

Возможности Gwyddion позволяют редактировать и корректировать полученные данные, например удалить пятна, зерна, царапины, производить коррекцию и выравнивание линий, устранять шумы и дрейф.

Gwyddion позволяет анализировать полученные двумерные данные: измерять необходимые расстояния и углы, извлекать профиль, выполнить расчет статических величин. Проведен анализ параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ 25142—82, ISO 4287—1997 и ASME B46.1—1995 [2].

В Gwyddion реализована возможность работы с зернами. Возможно их выделение по простым алгоритмам (по высоте или кривизне), а также для работы со сложными структурами выделение по водоразделу. Проводится обработка полученных результатов: измерение и распределение зерен [2].

Программа Gwyddion позволяет исследовать объекты, которые демонстрируют случайные свойства самоподобия и рассматриваются как афинно-самоподобные ста-

тические фракталы. Для фрактального анализа Gwyddion использует следующие методы: метод подсчета кубов, метод триангуляции, вариационный метод, метод спектра мощности [2]. Пример расчета фрактальной размерности методом кубов представлен на рис. 2.

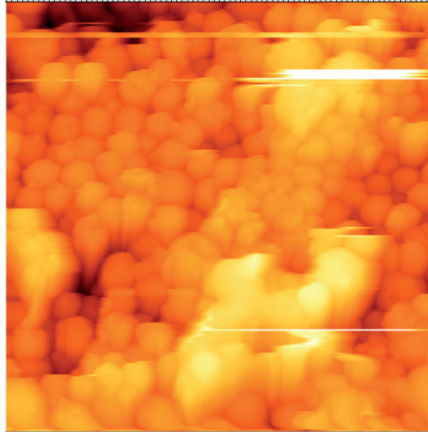


Рис. 1. Двумерное АСМ изображение структуры искусственного опала

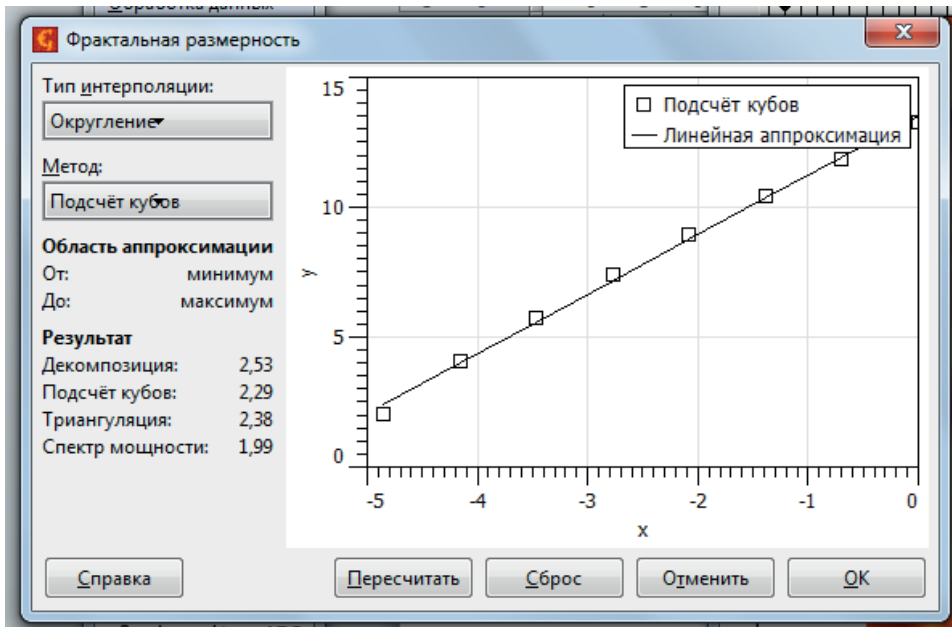


Рис. 2. Пример расчета фрактальной размерности методом кубов

## Литература

- [1] Новиков Ю., Тодуа П. Нанотехнология и нанометрология. *Наноиндустрия*, 2007, № 1. URL: [http://www.nanoindustry.su/files/article\\_pdf/2/article\\_2589\\_75.pdf](http://www.nanoindustry.su/files/article_pdf/2/article_2589_75.pdf) (дата обращения 27.06.2015).
- [2] Петр Клапетек, Дэвид Несас, Кристофер Андерсон. *Руководство пользователя Gwyddion*. 2009–2014, 174 с.
- [3] Миронов В.Л. *Основы сканирующей зондовой микроскопии*. Нижний Новгород, РАН, Институт физики микроструктур, 2004, 114 с.

УДК 621.941:67.05

## изучение процесса изнашивания токарного инструмента в фазохронометрическом представлении

© Сырицкий Антони Борисович, Комшин Александр Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

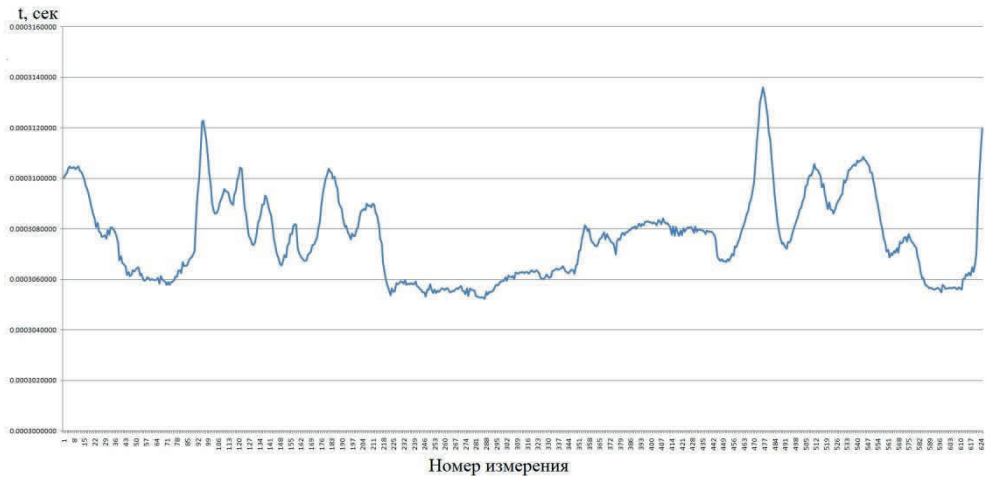
[syritsky@bmstu.ru](mailto:syritsky@bmstu.ru)

*Описаны теоретические предпосылки определения диагностического признака выхода из строя режущего инструмента в фазохронометрическом представлении. Представлена основная гипотеза — наличие в частотном спектре хронограммы вращения составляющей, связанной с частотой колебаний, зависящей от характера пластических деформаций в процессе снятия стружки.*

**Ключевые слова:** *токарная обработка, износ инструмента, диагностический признак, фазохронометрический метод.*

Одной из важных проблем современной металлообработки является создание эффективного метода оценки величины износа инструмента в процессе обработки. Ведь износ инструмента непосредственно влияет на качество механической обработки: ухудшает шероховатость поверхности и свойства поверхностного слоя материала заготовки и может привести к размерностным погрешностям обработки [1]. Несмотря на продолжительные исследования, проводимые в указанном направлении во многих научных и производственных коллективах нашей страны и за рубежом, проблема создания системы мониторинга состояния токарного инструмента остается нерешенной [2].

В сложившейся ситуации актуален поиск нового подхода к решению вышеописанной проблемы. Автору данной работы представляется перспективным применение фазохронометрического метода получения информации о циклических механизмах, разработанного на кафедре «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Метод построен на обработке результатов измерений интервалов времени долей оборота шпинделя станка [3], а представить эти результаты можно в виде хронограммы вращения (рис. 1).



**Рис. 1.** Хронограмма за один оборот шпинделя станка Hwacheon Cutex-240 В SMC при частоте вращения  $n = 300$  об/мин

На рисунке видно, что график изменения длительности интервалов времени испытывает постоянные колебания, амплитуда которых является мерой неравномерности вращения шпинделя станка, обусловленной совокупностью влияющих факторов. Исходя из этого, можно выделить три основные составляющие непостоянства вращения шпинделя при токарной обработке:

- 1) неравномерность крутящего момента привода станка;
- 2) неравномерность моментов сил сопротивления вращению в опорах;
- 3) неравномерность момента силы резания.

Последняя составляющая несет в себе информацию о состоянии режущего инструмента, а именно об износе режущей кромки.

Физика появления неравномерности момента силы резания описана в монографии Колева К.С. [4]. Колебания силы резания связаны с тем, что сопротивление металла при резании растет с увеличением деформации срезаемого слоя. После начала скалывания первого элемента стружки давление резко падает до окончания скалывания. Затем усилие резания вновь повышается и падает по мере скалывания следующего элемента стружки. Частоту этих колебаний можно найти аналитическим путем. Поскольку каждое скалывание в стружке соответствует одному периоду изменения усилия резания, то число скалываний в единицу времени даст искомую частоту колебаний  $\nu$ :

$$\nu = \frac{L}{\alpha},$$

где  $L$  — длина стружки, снимаемой в единицу времени;  $\alpha$  — длина волны деформированного элемента стружки, определяемого по насечкам.

В соответствии с выдвигаемой автором теорией в спектре хронограммы вращения можно выделить данную частоту  $\nu$ . В свою очередь, износ инструмента обязательно скажется либо на амплитуде колебаний либо на частоте  $\nu$ , что в конечном счете отразится в спектре.



В случае расширения и подтверждения данной гипотезы результатом может стать выявление диагностического признака, который был бы связан с фактическим значением износа, что является одним из главных условий реализации эффективной технологии мониторинга состояния инструмента в процессе обработки.

*Работа выполнена в рамках государственного задания № 9.1265.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в сфере научной деятельности (код проекта 1265).*

### Литература

- [1] Синопальников В.А., Григорьев С.Н. *Надежность и диагностика технологических систем*: учебник. Москва, Высш. шк., 2005, 343 с.
- [2] Сидоров А.С. *Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах*. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2007.
- [3] Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков. *Приборы*, № 5, 2014, с. 13–18.
- [4] Колев К.С. *Вопросы точности при резании металлов*. Киев, Машгиз, 1961, 134 с.

УДК 621.313.1

## Перспективы развития и основные проблемы в области диагностики электромеханических систем

© Тумакова Екатерина Владимировна, Комшин Александр Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[tumakova\\_ekaterina91@mail.ru](mailto:tumakova_ekaterina91@mail.ru)

*Приведена классификация существующих электромеханических систем. Проанализированы последствия выхода из строя основного и вспомогательного оборудования ТЭС и ТЭЦ. Сформулированы основные проблемы в области диагностики электромеханических систем, представлены перспективы развития электромеханических систем.*

**Ключевые слова:** *электромеханические системы, диагностика электромеханических систем, ТЭЦ, ТЭС, оценка технического состояния технических систем.*

Электрические машины имеют чрезвычайно широкое распространение. Они применяются в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, в энергетике, на транспорте, морском и речном флоте, в авиации, медицине, быту и т. д. В связи с этим существует большое разнообразие электрических машин. Они различаются по принципу действия, роду потребляемого тока, мощности, частоте вращения, режимам работы (рис. 1) [1].

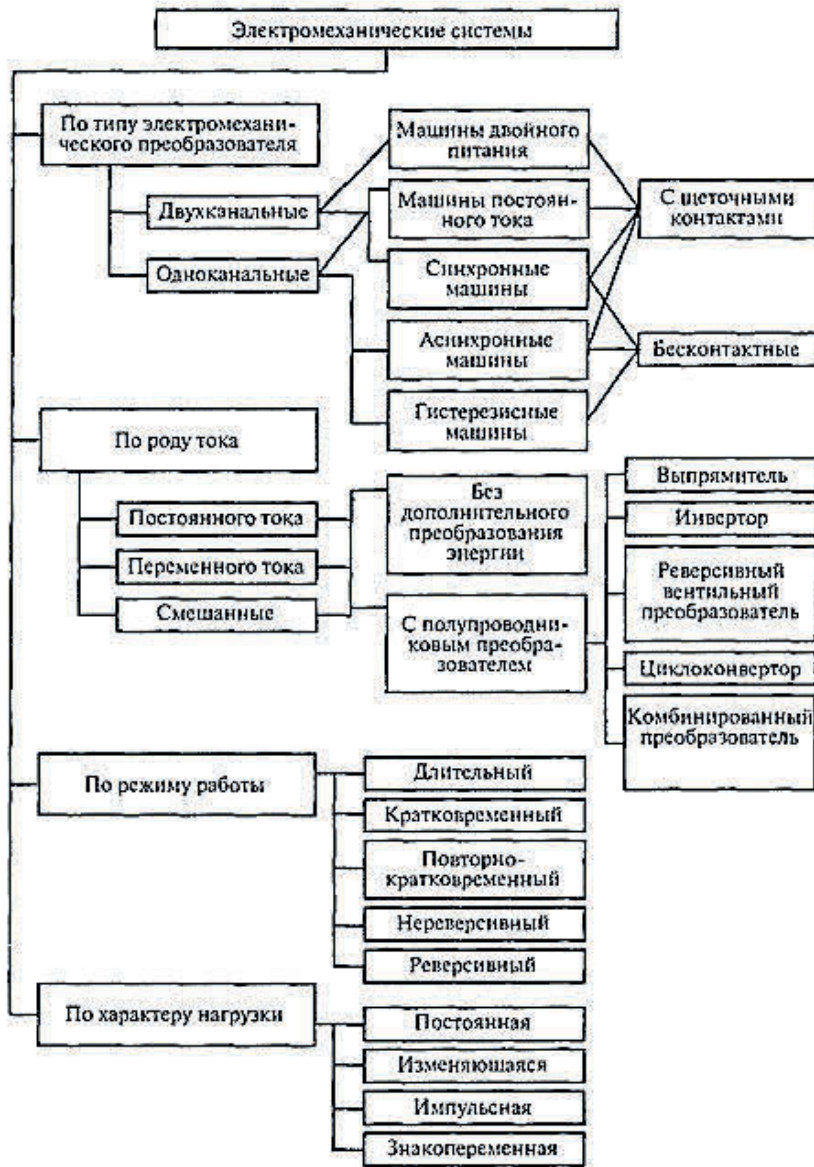


Рис. 1. Классификация электромеханических систем

Электрическая машина представляет собой электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергии. Основная часть электрической энергии (до 80 %) вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС) [2].

ТЭС отличаются друг от друга тем, каким образом на них получают пар, обладающий запасом потенциальной энергии и способный совершать работу в турбине. В настоящее время на большинстве электростанций пар для их работы получают в ко-

тельных установках за счет химической энергии сжигаемого топлива (угля, нефти, газа и т. д.) [3].

Весь мир приближается к исчерпанию ресурса основных компонентов жизнеобеспечения в энергетике. Темпы роста промышленного производства мировых стран замедляются и в 2012 г. составили: США — 4,1 %, Китай — 7,9 %, Индия — 5,6 %, Бразилия — 10,17 %, Россия — 2,6 %. [4].

Авария или выход из строя основного или вспомогательного оборудования ТЭС или ТЭЦ могут привести к значительным потерям, а в некоторых случаях к катастрофическим последствиям по целому ряду направлений. К ним относятся:

- недовыработка плановой энергии конкретной электростанцией, приводящая к убыткам, связанным с удорожанием электроэнергии из-за подключения источников энергии с меньшей экономичностью;
- исключение из работы части оборудования электростанции приводит к удорожанию производства электроэнергии из-за уменьшения коэффициента использования оборудования;
- ремонтные затраты на восстановление оборудования, претерпевшего аварию (зависит от масштаба аварии);
- ущерб предприятий, не получивших энергию, вследствие аварии или недостатка необходимого резерва мощностей у вырабатывающих энергию станций;
- ущерб для населения, вызванный внезапной остановкой общественного электрического транспорта, перерывами в массовых мероприятиях, отключением бытовых приборов и т. п.;
- Серьезные последствия при длительных перерывах в теплоснабжении жилых домов и предприятий [3].

Исходя из вышесказанного, диагностика состояния электромеханических систем, особенно ТЭС и ТЭЦ, — очень важная задача, как для области электроэнергетики, так и для всей экономики в целом.

Известен целый ряд методов диагностики электромеханических систем: анализ электрических токов и напряжений; измерение тепловых полей и магнитных полей рассеяния объекта; капиллярная, оптическая, радиационная, электромагнитная дефектоскопия; вибродиагностика; химический анализ технологических жидкостей (трансформаторного масла и смазки) и отработанных газов и т. д. [5].

Современная практика эксплуатации технических систем выдвигает требования к их постоянному непрерывному информационно-метрологическому сопровождению в целях оценки и прогноза технического состояния. Для повышения надежности функционирования всех без исключения машин и механизмов необходима полная и своевременная информация о состоянии элементов конструкции, узлов, условиях эксплуатации.

Проблемы информационно-метрологического сопровождения и аварийной защиты циклических электромеханических систем существуют не первый год, и специалисты постоянно выносят их на рассмотрение на совещаниях, конференциях и семинарах [4].

Развитие электромеханических систем и их диагностика — это неотъемлемая часть современного мира. В последнее время значительно возросло применение электрических машин малой мощности — в устройствах автоматики и вычислительной техники [2]. Разработка и создание новых видов генераторов с каждым годом приобретает всю большую актуальность. Так, с 2012 года в США ведется работа по созданию нового типа глубоководного электрического генератора, который сможет

превращать в электричество энергию стабильных глубинных течений — источника экологически чистой энергии.

*Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-3625.2015.8. Отдельные результаты поддержаны в рамках НИР 9.1265.2014/К по выполнению проектной части государственного задания в рамках научной деятельности.*

#### Литература

- [1] Хоперскова Л.В. *Электромеханические системы: учеб. пособие*. Волгоград, ВолгГТУ, 2002, 69 с.
- [2] Кацман М.М. *Электрические машины: учеб. для студентов средн. проф. учебных заведений*. Москва, Высшая школа, 2000, 463 с.
- [3] Труний А.Д., Ломакин Б.В. *Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: учеб. пособие для вузов*. Москва, Изд-во МЭИ, 2002, 540 с.
- [4] Комшин А.С. Мониторинг оборудования в сфере энергетики — требования безопасности. *Стандарты и качество*, 2014, № 2, с. 24–27.
- [5] Вахромеев О.С., Каримов Р.Т., Надеев А.И. *Современные методы диагностики электро-механических систем*. Москва, Машиностроение, 2005, с. 51–56.

УДК 620.179

## Частотный метод регистрации образования трещин на валопроводе

© Урманова Ольга Вячеславовна, Киселев Михаил Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[abrigo\\_negro@mail.ru](mailto:abrigo_negro@mail.ru)

*Рассмотрены вопросы прогнозирующего мониторинга. Особенно важным является диагностика валопровода. Для диагностики возникновения и развития трещин предложено использование частотного метода. Проведен эксперимент пропускания через валопровод тока малых величин с фиксированием изменения частоты при наличии дефектов.*

**Ключевые слова:** валопровод, дефект, техническое состояние, прогнозирующий мониторинг.

В последние годы возросла необходимость пристального внимания к проблемам энергомашиностроения. Приходится работать на стареющем оборудовании и вести оценку его технического состояния. Поэтому необходимо налаживать прогнозирующий мониторинг. Валопровод является одной из важнейших деталей не только в

энергетике, но и на автономных судовых механизмах и поездах. Валопровод вращается, скручивается и испытывает напряжение. Вибрация, перепады сети возмущают изгибно-крутильные колебания, вследствие которых возникают кольцевые трещины на валу. Необходимо также обращать внимание на старение (в частности — цикловое старение) материала.

Виброакустические методы диагностики возникновения трещин не обладают должной точностью, в то время как процессы деградации наблюдаются в 3-4 знаке и дальше. Необходимо обращать внимание состояние самого материала.

Для диагностики возникновения и развития трещин предлагается использование частотного метода. Через валопровод можно пропускать ток малых величин и фиксировать изменение частоты при наличии дефектов.

В данной работе представлены результаты эксперимента при пропускании тока через медный провод, из которого были сделаны квадратные рамки. Из закона Био — Савара следует, что напряженность магнитного поля тока, текущему по прямолинейному отрезку, равна

$$H = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

Применительно к рис. 1

$$\cos \alpha_1 = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{a - y}{\sqrt{x^2 + (a - y)^2}}.$$

Магнитный поток, создаваемый током, протекающим по левой вертикальной стороне квадрата, равен

$$\Phi_1 = \frac{I}{4\pi} \int_r^{a-r} dy \int_r^{a-r} \frac{dx}{x} \left( \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{a - y}{\sqrt{x^2 + (a - y)^2}} \right).$$

Полный поток, создаваемый четырьмя сторонами рамки равен

$$\Phi = 4\Phi_1.$$

Следовательно,

$$L = \frac{4}{I} \Phi_1 \mu_0,$$

где  $\mu_0$  — индуктивность.

Получаем итоговую формулу для нахождения индуктивности квадратной рамки из меди:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[ 2a \ln \frac{ab}{r(a+d)} + 4a - 2d \right] - 2a \frac{\mu_0}{\pi},$$

где  $d$  — диагональ рамки;  $a$  — сторона рамки.

Расчет проведен для рамки из меди ( $\mu_0 = 0,999994$ ) радиусом поперечного сечения проволоки  $r = 5,0955414$  мм, а также для 2,5; 4; 7; 10 мм (рис. 2).

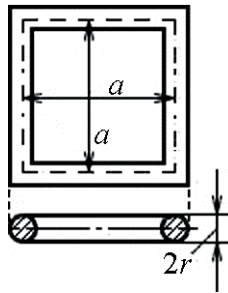


Рис. 1. Медная рамка

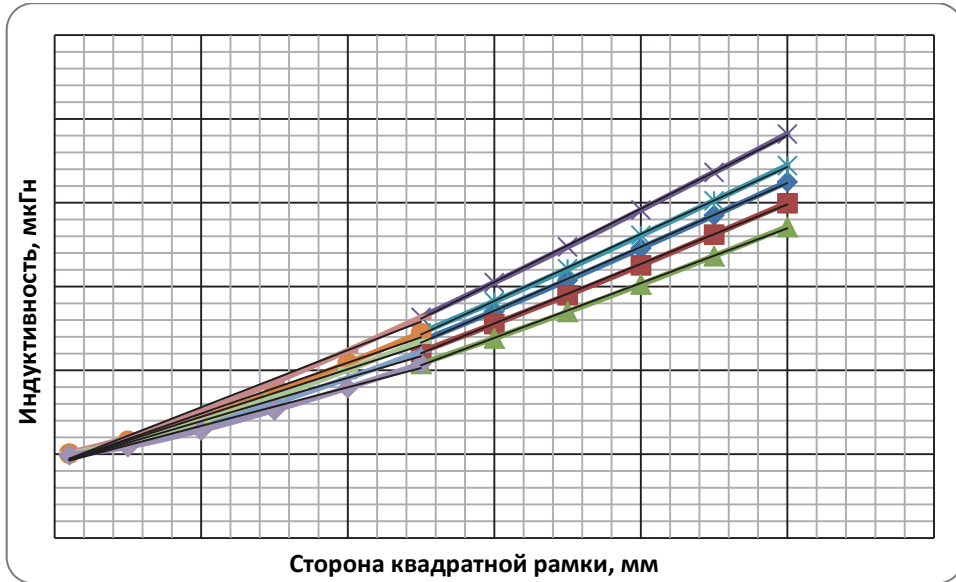


Рис. 2. Результаты расчетов зависимости индуктивности от стороны рамки и площади поперечного сечения медной проволоки

При проведении эксперимента предполагалось измерять частоту тока, пропускаемого через идеальную рамку и рамку, которая имеет дефекты (трещины), а также сравнение полученных результатов. В дальнейшем планируется проведение аналогичных измерений, но уже на вращающемся валу небольшого диаметра.

### Литература

- [1] Киселев М.И. Зачем нужна такая точность? *Метрология*, 2013, № 7, с. 4–7.
- [2] Пронякин В.И. Метрологическое обеспечение фазохронометрических систем. Ч. 1. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 12, с. 20.
- [3] Пронякин В.И. Метрологическое обеспечение фазохронометрических систем. Ч. 2. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 1, с. 115–122.
- [4] Пронякин В.И. Фазохронометрия в обеспечении информационно-метрологического сопровождения жизненного цикла машин и механизмов. *Мир измерений*, 2011, № 9, с. 57–61.

УДК 681.786.4

## **Разработка спектра трехмерных бесконтактных измерительных систем на базе фотограмметрии с применением новых подходов для объектов в ближней зоне**

© Хохоликов Антон Александрович, Марков Борис Николаевич

Россия, г. Москва, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

[khokholikov@gmail.com](mailto:khokholikov@gmail.com)

*Обоснована необходимость проведения исследований и разработки в области создания фотограмметрических измерительных систем. Описан используемый в настоящий момент времени способ калибровки измерительной системы по опорным точкам. Сформулированы основные проблемы, возникающие при разработке автоматической измерительной системы на базе фотограмметрии. Обозначены возможные решения поставленных задач и направления дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** фотограмметрия, пространственная измерительная система, калибровка, сопряженные точки, 3D-сканер.

Научные исследования и новые разработки в области фотограмметрических измерений являются актуальными ввиду того, что спрос на подобные устройства растет, тогда как ведущие компании в данной сфере предпочитают хранить свои разработки в режиме коммерческой тайны.

Развитие компьютерных и фотографических технологий делает процесс проектирования новых фотограмметрических систем с каждым годом все доступнее. Подобные приборы могут использоваться в качестве альтернативных систем для контроля качества на производстве и решения задач обратной разработки, а в ряде ситуаций справляются с задачами, которые невозможно решить с применением других технологий.

В рамках аспирантской работы и гранта конкурса «Умник» ведется разработка трехмерной бесконтактной измерительной системы, работающей на базе принципов научно-технической дисциплины фотограмметрии.

В настоящий момент измерительная система калибруется по опорным точкам с заданными пространственными координатами. Опорные точки расположены в одной плоскости на известных расстояниях друг от друга. В процессе калибровки плоскость с опорными точками фотографируется в разных пространственных положениях, после чего снимки обрабатываются программной процедурой, которая автоматически находит изображения всех опорных точек на снимках и вычисляет калибровочные параметры системы.

Проведена серия экспериментов, целью которых было выявление оптимальных условий калибровки. В результате был сделан ряд выводов относительно расположения опорных точек в процессе калибровки.

Фотограмметрическая система вычисляет трехмерное положение точек на основании плоских фотоснимков. Для того чтобы вычислить трехмерные координаты реальной точки, необходимо знать ее положение в плоских системах координат, связанных с фотоснимками, на которых она фигурирует. Точки на разных снимках, изображающие одну реальную точку, называются сопряженными. Человек по двум изображениям может с легкостью определить такие сопряженные точки, однако для автоматической компьютерной системы данная задача является крайне трудоемкой процедурой. При разработке компьютерной системы приходится выбирать оптимальное соотношение между производительностью системы и ее точностью.

Для определения сопряженных точек могут использоваться алгоритмы работы с полутоновыми изображениями. Одним из действенных способов сузить область поиска и повысить производительность алгоритма является использование свойств эпиполярных линий. Затем можно применить один из алгоритмов сопоставления фрагментов изображений, например, по градиенту яркости. Однако в зависимости от сложности решаемой задачи может потребоваться проведение предварительного преобразования изображений.

В процессе работы планируется выяснить применимость существующих алгоритмов к решению поставленной задачи. Кроме того, наряду с анализом полутоновых изображений планируется использовать информацию о цветовых компонентах. Для этого потребуется провести ряд исследований, связанных с распределением цветов на фотоснимках, а также проверить применимость известных полутоновых алгоритмов (например, вычисление корреляционной матрицы) к обработке цветовых компонент изображений.

### Литература

- [1] Григорьев С.Н. Конов С.Г. Развитие пространственной метрологии для обеспечения контроля сложных поверхностей в машиностроении. *Контроль. Диагностика*, 2012, № 12, с. 9–13.
- [2] Конов С.Г. Гололобова А.А. Калибровка камер фотограмметрических измерительных систем на базе метода наименьших квадратов. *Метрология*. Москва, 2014, № 5, с. 15–20.
- [3] Шапиро Л., Стокман Дж. *Компьютерное зрение*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006, с. 752.
- [4] Wenzel K., Rothermel M., Fritsch D., Haala N. Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, vol. XL-5/W1.



УДК 621.185.532

## **Анализ факторов, влияющих на характеристики усталости литейных алюминиевых сплавов, изготовленных с использованием вторичного сырья**

© Блохин Алексей Владимирович, Лось Александр Михайлович,  
Бельский Сергей Евграфович

Республика Беларусь, г. Минск,  
Белорусский государственный технологический университет

[Blakhin@mail.ru](mailto:Blakhin@mail.ru)

*Рассмотрено влияние изменения процентного содержания рафинирующе-модифицирующей состава к шихте на характеристики усталости литейных алюминиевых сплавов (типа АК9М2, АК5М4,) изготовленных с использованием вторичных материалов (алюминиевая стружка). По результатам исследований установлено оптимальное содержание рафинирующе-модифицирующей состава (0,7...0,8 %), добавляемого при плавке и позволившее получить сплав с повышенными характеристиками усталости. Вычислено предельное содержание железа (1,0...1,1 %) не оказывающее существенного влияния на характеристики усталости таких материалов.*

**Ключевые слова:** алюминий, вторичный сплав, стружка, шихта, образец, усталостные испытания, характеристики усталости.

В настоящее время в машиностроении все больше внимание уделяется замещению первичных материалов вторичными. Особенно это актуально для сплавов цветных металлов, что объясняется высокой стоимостью их первичных аналогов. Следует отметить, что тенденция к увеличению доли цветных, в частности, алюминиевых сплавов, в общем объеме выпуска отливок обусловлена, прежде всего, развитием автомобильной и авиационной промышленности. Так, по данным [1], если в 1990 г. на один автомобиль уходило в среднем 50 кг этого материала, то к 2005 г. эта цифра выросла до 132 кг, а в 2010 г. эта цифра достигла 145 кг [2].

Изготовление алюминиевых сплавов с использованием вторичного сырья позволяет существенно снизить удельные расходы электроэнергии (в ряде случаев расход

электроэнергии при изготовлении вторичных материалов составляет 5...10 % по сравнению с расходами связанными с получением первичного алюминия). Поэтому замещение первичных алюминиевых сплавов на сплавы, полученные с использованием вторичного сырья, обеспечит снижение себестоимости производства, как самих материалов, так и отдельных деталей, узлов и машин в целом. Широкому применению сплавов, полученных на основе вторичного алюминия, в настоящее время препятствуют их низкие механические характеристики, в том числе — усталостные. Это связано с тем, что после переплавки сплавы характеризуются широкими интервалами содержания основных компонентов, значительной загрязненностью неметаллическими включениями и газами, гетерогенностью структуры, а также наличием грубых включений железосодержащих фаз. В связи с этим, остро стоит задача повышения качества, а, следовательно, и конкурентоспособности вторичных сплавов по отношению к более дорогостоящим их первичным аналогам.

В данной работе показано влияние различных факторов на характеристики усталости литейных алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья.

**Оборудование и методика проведения эксперимента.** Образцы для усталостных испытаний изготавливались из сплавов, полученных с добавлением вторичного сырья и модифицирующе-рафинирующих составов и последующей термообработкой T5. После термообработки для снятия верхнего дефектного слоя и получения необходимой величины шероховатости ( $Ra \sim 0,32$  мкм) рабочих поверхностей образцов их подвергали электролитическому полированию. Химический состав исследованных материалов был близок к составу сплавов марок АК9М2 и АК5М4.

Циклическая долговечность определялась при нагружении знакопеременным изгибом до разрушения образцов или достижения усталостной трещины заданного размера.

Образцы для испытаний (рис. 1) представляли собой балочки прямоугольного сечения  $2 \times 6$  мм с хвостовой частью для консольного закрепления. С целью смещения области разрушения от заделки на образцах был выполнен галтельный переход, несколько увеличивающий их поперечное сечение. Длина и толщина образца выбирались в зависимости от резонансной частоты и формы колебаний.

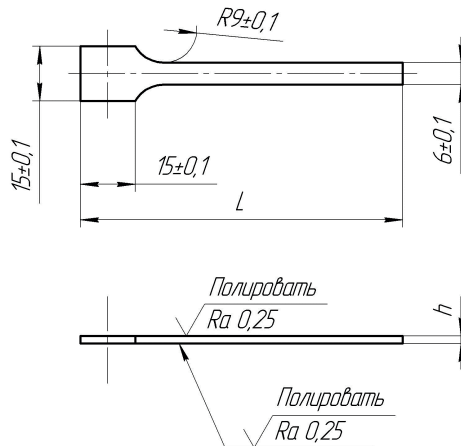
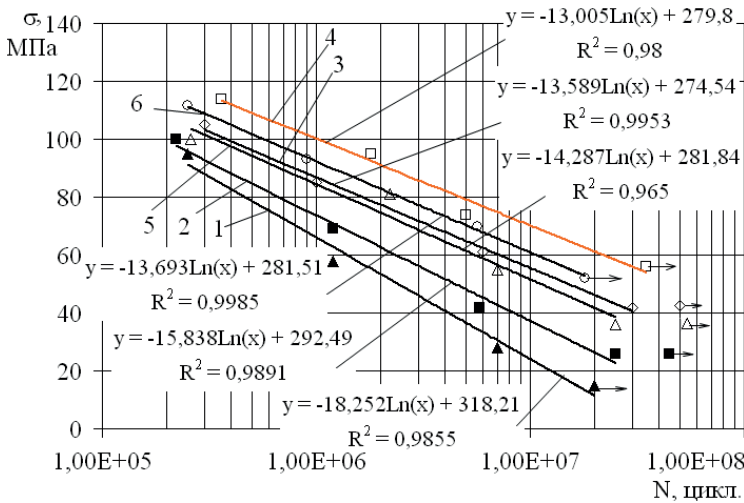


Рис. 1. Геометрические параметры образца для усталостных испытаний

Для проведения усталостных испытаний на высоких частотах нагружения (18 кГц) использовалась магнитострикционная установка, работающая в автоколебательном режиме. Активным элементом усталостной установки являлся магнитострикционный пакет, выполненный в виде замкнутого контура, набранного из тонких листов активного материала (никеля, пермендюра и т. п.). Для увеличения амплитуды колебаний к пакету присоединялся стержень переменного сечения — концентратор, который в свою очередь, был связан с образцом. Все геометрические параметры элементов данной системы выбирались таким образом, чтобы достичь одинаковой собственной частоты, что позволяло при работе установки на данной резонансной частоте получать в образце максимальные значения амплитуды циклических напряжений [3, 4].

Для проведения усталостных испытаний на низкой частоте (0,3 кГц) использовалась испытательная установка на базе электродинамического вибростенда типа ВЭ [3], которая также работала в резонансном режиме.

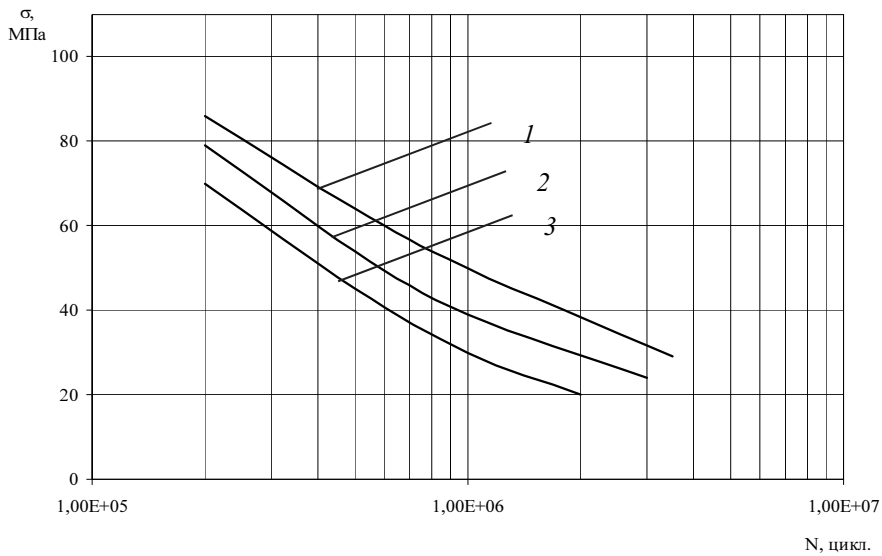
**Анализ результатов испытаний.** Результаты усталостных испытаний образцов, полученных из вторичных материалов, в том числе и алюминиевой стружки, показывают, что добавление к расплаву модифицирующе-рафинирующего состава приводит к существенному смещению кривых усталости в область более высоких напряжений (рис. 2, кривые 2–4), а затем к снижению (рис. 2, кривые 5, 6).



**Рис. 2.** Результаты усталостных испытаний алюминиевого сплава АК9М2 полученного из лома (алюминиевая стружка):  
 1 — без обработки; 2 — 0,05 % модификатора; 3 — 0,06 % модификатора; 4 — 0,07 % модификатора; 5 — 0,08 % модификатора; 6 — 0,09 % модификатора

В результате исследований также было установлено, что на усталостные характеристики алюминиевых сплавов особое влияние оказывает железо. Приведенные на рис. 3 зависимости показывают, что с ростом процента содержания железа происходит снижение усталостных характеристик исследованных материалов.

На основании проведенных исследований было определено процентное содержание железа (1,0...1,1 %), при котором усталостные характеристики алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья, снижаются не более чем на 10...15 %.



**Рис. 3.** Результаты усталостных испытаний на частоте 18 кГц сплава АК5М4 с различным содержанием железа полученного по традиционной технологии: 1 — 1,1 % Fe; 2 — 1,4 % Fe; 3 — 1,8 % Fe

**Выводы.** На основании комплексного анализа усталостных характеристик литейных алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья, было установлено оптимальное количество РМК (0,7...0,8 % к массе шихты) позволяющее получить материал с высокими характеристиками усталости, а также предельное содержание железа в сплаве (1,0...1,1 %) не приводящее к существенно (не более 10...15 %) снижению его характеристик усталости.

### Литература

- [1] Металлы и цены. Ценовой каталог металлопродукции и оборудования. URL: [http://metal4u.ru/articles/by\\_id/203](http://metal4u.ru/articles/by_id/203) (дата обращения 14.05.2011).
- [2] Stal.by. URL: <http://stal.by/mirovoi-tsvetmet-v-aprele-prognozy-raspugali-investorov> (дата обращения 14.05.2011).
- [3] Блохин А.В., Царук Ф.Ф., Гайдук Н.А. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования. *Тр. БГТУ. Сер. II. Лесная и деревообр. пром-ть*. Минск, 2002, вып. X, с. 213–215.
- [4] Блохин А.В., Царук Ф.Ф. Модернизация стенов для ускоренного определения характеристик усталости металлических материалов. *Ремонт. Восстановление. Реновация: Мат. V Междунар. науч.-практ. конф.*, Уфа, 19–20 марта 2014 г. Уфа. Башкирский государственный аграрный университет. Уфа, 2014, с. 32–36.

УДК 621.74.045

## Исследование алюмоорганического связующего в литье по выплавляемым моделям

© Варфоломеев Максим Сергеевич, Моисеев Виктор Сергеевич

Россия, г. Москва, МАТИ — Российский государственный технологический  
университет имени К.Э. Циолковского

[varfolom2a@rambler.ru](mailto:varfolom2a@rambler.ru)

*Рассмотрены вопросы применения алюмоорганического связующего при изготовлении высокотермостойких корундовых форм. Данная технология является перспективным направлением в создании керамических форм для точного сложнопрофильного литья отливок ответственного назначения из химически активных сплавов.*

**Ключевые слова:** литье по выплавляемым моделям, корундовая керамическая форма, этилсиликатное связующее, алюмоорганическое связующее, алюминокс.

При выборе материала для изготовления форм для литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) следует исходить из того, что форма должна обеспечить высокую размерную точность и чистоту поверхности отливок. Необходимо учитывать также, что керамические огнеупорные материалы подвергаются при заполнении формы, наряду с гидравлическим воздействием расплавленного металла, термическому удару, приводящему к образованию в стенке формы существенных напряжений.

Кроме этого длительное пребывание формы в условиях высоких температур и воздействия гидростатических давлений расплавленного металла на ее стенки может приводить к короблению формы отклонению отливки от номинальных размеров. Последнее особенно заметно влияет на точность размеров отливок, получаемых в условиях направленной кристаллизации и монокристаллического литья. В этом случае, в отличие от равноосного литья повышается и химическая активность легирующих элементов жаропрочных сплавов на материал формы. Таким образом, форма должна обладать рядом высоких свойств.

Используемые в настоящее время отечественной промышленностью материалы для изготовления таких форм не всегда могут обеспечить все требуемые свойства в комплексе. В частности, наиболее широко применяемое связующее — этилсиликат ЭТС-40, не обладает достаточной прочностью при применяемых температурных режимах заливки формы и формирования отливки. Попытка повысить прочность формы за счет увеличения ее толщины приводит к росту термического сопротивления, что существенно снижает возможность эффективно управлять направленностью затвердевания технологическими средствами, заметно понижая качество литья и увеличивая задолженность оборудования и без того дорогих способов литья (с направленной кристаллизацией и монокристаллической структурой).

Также существенным недостатком ЭТС-40 является наличие в нем  $\text{SiO}_2$ , практически гарантирующим образование пригара на поверхности отливок.

Перспективным путем устранения негативного влияния диоксида кремния как на качество поверхности отливки, так и повышающее в целом огнеупорную способ-

ность формы, является создание монооксидных высокоогнеупорных керамических форм, целиком состоящих из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Такая форма способна обеспечить свое рабочее состояние при температурах до 2050 °С.

В ФГУП ГНИИХТЭОС для изготовления керамических форм разработано спиртовое бескремнеземное связующее АЛЮМОКС [1], опытные партии которого были исследованы в МАТИ — РГТУ им. К.Э. Циолковского и успешно опробованы на производстве.

В результате применения бескремнеземной высокоогнеупорной термо- и химически стойкой керамической оболочки повышается термостойкость формы до 2000 °С и создается химически инертный барьерный слой, позволяющий гарантировать снижение величины пригара более чем в 5 раз и обеспечить стабильность геометрии пера отливки вследствие исключения из состава связующего диоксида кремния [2, 3].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения базовой части Государственного задания (код проекта 3087).*

### Литература

- [1] Стороженко П.А., Щербакова Г.И., Цирлин А.М., Муркина А.С., Варфоломеев М.С., Кузнецова М.Г., Полякова М.В., Трохаченкова О.П. Органоалкоксилалюмоксаны и бескремнеземное связующее на их основе. *Неорганические материалы РАН*, 2007, т. 43, № 3, с. 373–382.
- [2] Муркина А.С., Щербакова Г.И., Варфоломеев М.С., Моисеев В.С., Стороженко П.А., Сидоров Д.В. *Способ изготовления бескремнеземных керамических форм для точного литья металлов по выплавляемым моделям*. Пат. 2411104 С1 Российская Федерация, В22С 9/04. № 2009136162/02; заявл. 30.09.09; опубл. 10.02.2011, бюл. № 4.
- [3] Щербакова Г.И., Стороженко П.А., Муркина А.С., Варфоломеев М.С., Моисеев В.С., Сидоров Д.В. *Способ изготовления керамических оболочковых форм для литья металлов по выплавляемым моделям*. Пат. 2412019 С1 Российская Федерация, В22С 9/04. № 2009136165/02; заявл. 30.09.09; опубл. 20.02.2011 бюл. № 5.

УДК 621.74.07

## **Применение алюмоборфосфатного концентрата при изготовлении термостойкой оснастки для высокотемпературного оборудования**

© Верцюх Сергей Сергеевич, Знаменский Леонид Геннадьевич

Россия, г. Челябинск, АО «Специальное конструкторское бюро “Турбина”»

[server1988@mail.ru](mailto:server1988@mail.ru)

*Специфика производства отливок для газотурбостроения диктует особые условия по используемым материалам. Уникальные составы огнеупорных смесей для вакуумных печей и тоководов высокотемпературных термических печей имеют высокую*

стоимость при малом предложении на рынке. В этой связи перспективной представляется разработка такого состава для огнеупорных применений, позволяющая сократить затраты на подготовку производства.

**Ключевые слова:** алюмоборфосфатный концентрат, огнеупорность, керамика, металлофосфат, вакуумное литье.

Изготовление расходуемой оснастки для вакуумных печей в условиях производства не всегда представляется возможным, поскольку всевозможные подставки, перемычки, воронки должны иметь высокую термостойкость и устойчивость химического состава в условиях вакуума.

Применение общеиспользуемого кварцевого песка в данном случае ограничено его склонностью к диссоциации в безвоздушной среде и разрушению. Кроме того недолговечность таких приспособлений обусловлена также высоким коэффициентом термического линейного расширения и множеством нестабильных фазовых переходов.

Предприятия, специализирующиеся на изготовлении керамики, готовы решить практически любые задачи, но стоимость оснастки при этом достигает существенных значений. Поэтому актуальна проблема перевода расходных керамических материалов для нагревательных печей из разряда покупных в собственное изготовление.

Для решения сформулированной проблемы перспективным представляется применение алюмоборфосфатного концентрата (АБФК) — неорганического недорогого, экологически чистого связующего.

Для изготовления жаропрочной металлофосфатной керамики приготавливались смеси двух видов:

- 1) набивная смесь системы «АБФК — электрокорунд белый»;
- 2) наливная смесь системы «АБФК — электрокорунд белый».

Составы смесей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав смесей

№ п/п	Тип смеси	Компоненты смеси, %			
		АБФК	Вода	Электрокорунд белый ЭБ-25	Периклаз ПППл-95
1	Набивная смесь	12–15	—	Остальное	3–5
2	Наливная смесь	18–20	10–12	Остальное	2–4

Приготовленную смесь засыпают (заливают) в оснастку, уплотняют при необходимости и дают подсохнуть. Время выдержки в оснастке для набивной смеси не превышает 10 минут, наливная смесь сохнет в течение 1...1,5 часов.

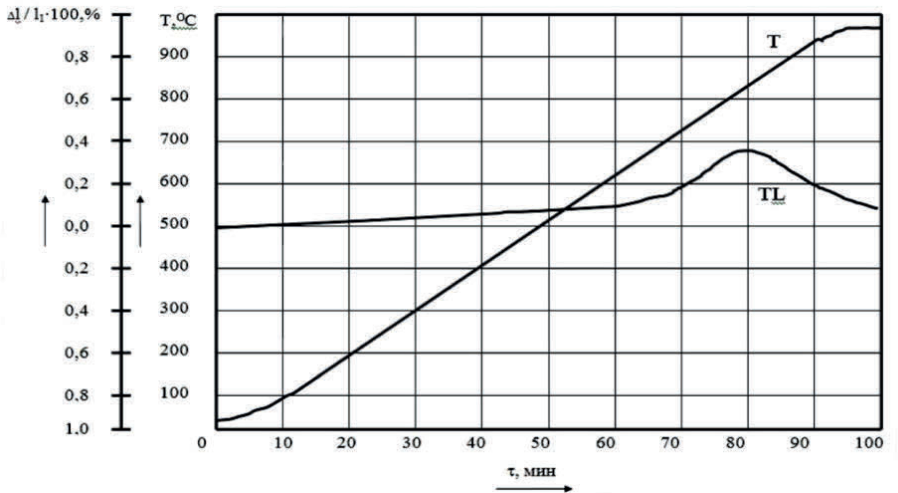
После извлечения из формовочной оснастки керамику выдерживают на воздухе в течение суток и подвергают высокотемпературной обработке (спеканию) по следующему режиму: нагрев до 500 °С → выдержка 30 мин → нагрев до 950 °С → выдержка 30 мин → нагрев до 1250 °С → выдержка 1 ч → медленное охлаждение. Цикл высокотемпературной обработки может достигать 4 суток.

После спекания резко повышается прочность керамики до следующих значений:

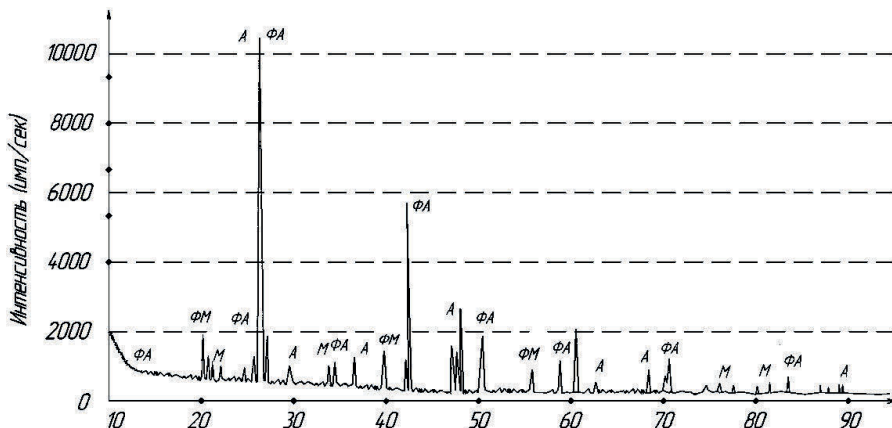
- 1) набивная масса — прочность 10...15 кг/см<sup>2</sup>;
- 2) наливная масса — прочность 180...240 кг/см<sup>2</sup>.

Повышение твердости в системе «АБФК — электрокорунд» обусловлено тем, что оба материала сходны по основе ( $Al_2O_3$ ). Разработанный состав формовочной смеси характеризуется «плавным» увеличением размеров образцов при температурах 20...600 °С, что создает условия для повышения трещиностойкости изделий при нагреве, позволяет ускорить процесс прокали и снизить энергоемкость производства жаропрочной керамики. В данном температурном интервале происходит удаление кристаллизационной влаги, при этом однозамещенный ортофосфат магния становится безводным и переходит в пирофосфат и метафосфат. Параллельно удалению влаги из металлофосфатов проходит дегидратация борной кислоты.

Данные дилатометрического и дериватографического анализов представлены на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Дилатометрия (а) и дериватография (б) образцов жаропрочной керамики



Оксид алюминия — это жаропрочный оксид с близким к нейтральному уровню рН. Кроме того, он устойчив к диссоциации в вакууме, а, следовательно, может применяться в вакуумных печах.

В данной работе оснастка из металлофосфатной керамики изготавливалась для следующих применений:

1) подставки для керамических форм в вакуумных плавильных печах (в перспективе, плавильные тигли для выплавки жаропрочных сплавов);

2) керамические трубки для тоководов высокотемпературных термических печей.

Анализ экономической целесообразности разработок приведен в табл. 2. Расчеты производились на 1 ед. продукции.

Таблица 2

Расчет экономической целесообразности разработок

№ п/п	Статья расходов	Цена, руб/ед.	Затраты по типам смеси, руб.	
			набивная	наливная
1	Материалы, кг:			
	– АБФК	89	53,4	35,6
	– ЭБ-25	110	360,8	143
	– вода дистиллированная	5,2		1,04
	– периклаз	50	10	4
2	Энергия, кВт/ч	1,18	218,67	218,67
3	Трудоемкость, н/ч	160	104	86,4
4	Прочие производственные расходы, руб.		38,5	33,5
4	Итого:		566,7	488,71
5	Стоимость приобретения аналога, руб.		3900	2390
6	Коэффициент стойкости к тепловым ударам		0,3	0,88
7	Экономия затрат, %		51,1	76,7

Таким образом, применение металлофосфатной керамики для изготовления оснастки в литейном производстве способствует снижению затрат в части подготовки производства и термообработки отливок.

### Литература

- [1] Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Варламов А.С., Верццох С.С., Карачев Е.В. *Способ подготовки зернистых материалов для изготовления керамических форм и стержней*. Пат. № 2404011 Российская Федерация. МПК В22С1/00, № 2009139872/02, заявл. 28.10.2009, опубл. 27.02.2010, бюл. № 32.
- [2] Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Верццох С.С. *Способ подготовки зернистых материалов для изготовления керамических форм и стержней в литье по выплавляемым моделям*. Пат. № 2443499 Российская Федерация. МПК В22С1/00, № 2010148809, заявл. 29.11.2010, опубл. 27.02.2012, бюл. № 6.
- [3] Знаменский Л.Г., Варламов А.С., Верццох С.С. *Способ приготовления бескремнеземного связующего для литья по выплавляемым моделям химически активных сплавов*. Пат. № 2499650 Российская Федерация. МПК В22С1/00, № 2012143558/02, заявл. 11.10.2012, опубл. 27.11.2013, бюл. № 16.

УДК 621.74

## Изменение зависимости прочности жидкостекольных стержней за счет введения инновационного модификатора

© Иванова Людмила Александровна, Кузнецов Сергей Алексеевич

Россия, Чувашская республика, г. Чебоксары,  
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова

e-mail: i-luda13@mail.ru

*Приведен анализ различных добавок для снижения остаточной прочности и улучшения выбиваемости жидкостекольных смесей. Предложен инновационный комплексный модификатор для жидкостекольных смесей, позволяющий улучшить их технологические свойства. Исследованы зависимость остаточной прочности смеси и работы, затрачиваемой на выбивку, от температуры нагрева стержней. Разработанный инновационный комплексный модификатор позволяет улучшить выбиваемость жидкостекольных смесей в различных интервалах температур, что позволяет его использовать для изготовления стержней при литье черных и цветных сплавов.*

**Ключевые слова:** жидкое стекло, жидкостекольная смесь, инновационный модификатор, остаточная прочность, выбиваемость.

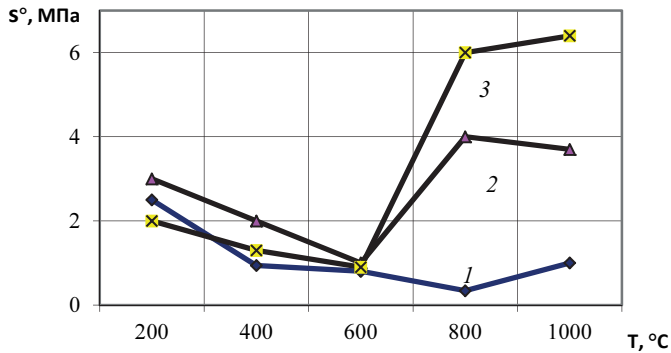
Жидкостекольные смеси (ЖСС) начали применять в литейных цехах с 1950-х годов прошлого века, и за короткий период времени они нашли широкое распространение в нашей стране и за рубежом, чему способствовала их универсальность, т. е. применимость одних и тех же составов для изготовления форм и стержней, использование их при производстве отливок из стали, чугуна и цветных сплавов [1]. Несмотря на целый ряд достоинств, жидкостекольное связующее в чистом виде не обеспечивает требуемые параметры форм и стержней после заливки сплавов из-за высокой остаточной прочности и плохой выбиваемости. Этой проблеме посвящено много работ, однако она до сих пор не решена.

С 1960-х годов проводятся циклы экспериментов по выявлению зависимости остаточной прочности жидкостекольных смесей с различными добавками от температуры нагрева [2–6]. Разработаны составы ЖСС с пониженным содержанием жидкого стекла, обладающие хорошими выбиваемостью, прочностью, скоростью затвердевания при тепловой обработке (с жидкими кремнийорганическими отвердителями) [7]. В качестве отвердителей и катализаторов твердения применяют жидкие кремнийорганические полимеры и органические мономеры. Содержание кремнийорганического полимера и мономера определяют живучесть и прочность смеси. В отличие от ЖСС, отверждаемых сложными эфирами, для приготовления смеси с жидкими кремнийорганическими отвердителями может применяться жидкое стекло с модулем 2,2...3,2, однако лучшие результаты наблюдаются при использовании высокомолекулярного стекла. Жидкостекольные смеси с жидкими кремнийорганическими отвердителями позволяют получить смеси с 1...3 масс. ч. ЖС, улучшить качество поверхности и точности отливок.

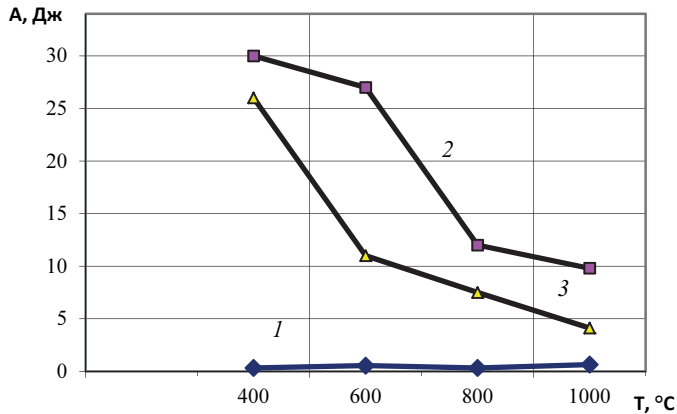
Применение кремнийорганического отвердителя позволило улучшать выбиваемость смесей главным образом в высокотемпературной области.

Авторами данной статьи разработан инновационный комплексный модификатор жидкостекольных связующих на основе лаурилсульфата натрия, полифосфата натрия и глицерина, взятых в соотношении 1:4:1 соответственно и в количестве 0,6 масс. ч., способного улучшить выбиваемость и снизить остаточную прочность в различных интервалах температур. За счет многофункционального действия модификатора данная смесь является холоднотвердеющей, быстро набирает необходимую прочность и не подвержена влиянию влажности окружающей среды [8, 9].

Зависимость остаточной прочности и выбиваемости соответственно от температуры для смесей, изготовленных с применением жидкостекольных связующих, модифицированных различными добавками показаны на рис. 1 и 2.



**Рис. 1.** Зависимость остаточной прочности смеси на сжатие от температуры нагрева:  
 1 — ЖСС с инновационным модификатором; 2 — ЖСС с кремнийорганическим отвердителем; 3 — ЖСС с пропиленкарбонатом



**Рис. 2.** Зависимость работы, затрачиваемой на выбивку от температуры нагрева:  
 1 — ЖСС с инновационным модификатором; 2 — ЖСС без добавок; 3 — ЖСС, импрегнированная полимерами

Как видно на рис. 1 и 2, применение инновационного модификатора снижает остаточную прочность и улучшает выбиваемость жидкостекольных смесей в различных интервалах температур без снижения прочностных характеристик стержней, что позволяет рекомендовать применение данной смеси для любых видов литья.

### Литература

- [1] Дорошенко С.П., Макаревич А.П. Состояние и перспективы применения жидкостекольных смесей. *Литейное производство*, 1990, № 2, с. 14–15.
- [2] Борсук П.А. Смеси с жидкими отвердителями. *Литейное производство*, 1990, № 2, с. 15–17.
- [3] Грузман В.М. Улучшение выбиваемости жидкостекольных смесей. *Литейное производство*, 1999, № 6, с. 30–31.
- [4] Иткис З.Я., Гурлев В.Г., Дворяшина Ю.С. Применение модифицированного жидкостекольного связующего для стержней, форм и противопопригарных покрытий. *Литейное производство*, 1995, № 4–5, с. 40–41.
- [5] Исаев Г.А. Современные жидкостекольные смеси для форм и стержней. *Литейное производство*, 2004, № 2, с. 16–17.
- [6] Петров В.В., Тютин Е.А., Захарова Н.В. Изменение свойств жидкостекольных смесей в процессе образования стержней. *Литейное производство*, 2011, № 4, с. 24–26.
- [7] Ромашкин В.Н., Валисовский И.В. Смеси с улучшенными технологическими свойствами. *Литейное производство*, 1990, № 2, с. 17–18.
- [8] Чернышов Е.А., Евлампиев А.А., Королев А.В., Кузнецов С.А., Иванова Л.А. К вопросу образования газовых дефектов в стальных отливках при использовании современных способов изготовления литейных форм и стержней. *Литейщик России*, 2015, № 5, с. 33–35.
- [9] Чернышов Е.А., Евлампиев А.А., Королев А.В., Кузнецов С.А., Иванова Л.А. О модернизации сталелитейных цехов с использованием современных технологий формообразования. *Литейное производство*, 2015, № 3, с. 36–38.

УДК 621.74.01

## **Построение расширенной механики зернистых сред для моделирования процессов виброуплотнения при литье по газифицируемым моделям**

© Карпенко Денис Николаевич, Вербичкий Валерий Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[karpenko\\_dn@bmstu.ru](mailto:karpenko_dn@bmstu.ru)

*Одной из основных проблем при литье по газифицируемым моделям, сдерживающих развитие этого способа литья, является отсутствие корректного теоретического описания процессов виброуплотнения, протекающих место при изготовлении форм из сухого формовочного песка. Вследствие особенностей поведения песка как сыпучего материала под воздействием вибрации, традиционные методы, основанные на*

механике сплошных сред, имеют ограниченную применимость. Один из возможных теоретических подходов — механика зернистых сред, разработанная И.И. Кандауровым. Однако эта модель сама по себе построена на допущениях, использование которых неприемлемо при моделировании виброуплотнения. В работе предложены некоторые пути «преодоления» этих допущений, при реализации которых возможно построение расширенной механики зернистых сред, пригодной для описания процессов виброуплотнения.

**Ключевые слова:** литье по газифицируемым моделям, кварцевый песок, виброуплотнение, механика зернистых сред.

Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) — сравнительно молодой способ литья. Появившись в 1950-х годах, он получил широкое распространение и до сих пор считается одним из самых перспективных [1]. Главные преимущества технологии ЛГМ — отсутствие плоскости разъема, высокая точность и возможность изготовления формы из сухого песка, что исключает необходимость применения сложного смесеприготовительного оборудования. Однако развитие ЛГМ-технологий сдерживается отсутствием достаточно полного теоретического описания процессов, происходящих при изготовлении формы.

Наиболее распространенным методом формовки при ЛГМ является изготовление формы из сухого кварцевого песка по пенополистирольной модели. Для того чтобы во время заливки не произошел обвал формы, песок должен быть равномерно уплотнен до некоторой технологической плотности. Однако добиться этой равномерной плотности зачастую бывает очень сложно.

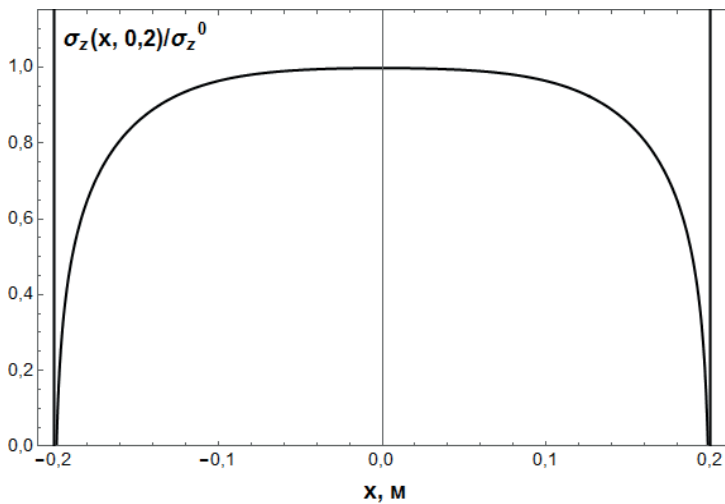
Способ литья по газифицируемым моделям в большой степени ориентирован на изготовление отливок сложной конфигурации: отсутствие разъема формы теоретически позволяет изготавливать отливки любой конфигурации. Но только теоретически: наличие у модели многочисленных поднутрений и каналов делает формовку такой модели крайне сложной. Получение необходимой плотности песка в этих поднутрениях модели — очень сложная задача, и нет каких-либо надежных алгоритмов ее решения для каждой конкретной конфигурации.

Все это сдерживает распространение способа литья по газифицируемым моделям. При этом одна из главных проблем — невозможность предсказать качество готовой формы при переходе на формовку новых моделей, что крайне осложняет процесс переналадки. На реальных производствах при переходе на выпуск новой номенклатуры отливок выбор режимов вибрации и расположения модели в форме приходится делать на основе многочисленных натуральных экспериментов, что увеличивает время технологической подготовки производства и в конечном итоге повышает стоимость отливки.

Основная причина подобной «непредсказуемости» заключается в отсутствии достаточно полного теоретического описания воздействия вибрации на сыпучий материал (песок) вообще и процесса виброуплотнения в частности. В известных литературных источниках даны лишь общие рекомендации по режимам вибрации, которые, как правило, нельзя применить «индивидуально» к тому или иному случаю. Несмотря на то, что проблема воздействия вибрации на сыпучие материалы поднималась неоднократно [1–4], почти все работы, ей посвященные, сосредотачивают внимание на экспериментальных данных и практически не содержат теоретических моделей рассматриваемых процессов.

Одна из основных сложностей теоретического описания воздействия вибрации на сыпучие материалы, к которым, несомненно, относится и сухой кварцевый песок, состоит в том, что здесь плохо применимы положения механики сплошных сред. Как было показано в экспериментальных работах [3, 4], при достижении некоторого критического режима вибрации песок переходит в разуплотненное «виброкипящее» состояние, характеризуемое тем, что физический контакт между отдельными частицами носит характер кратковременного ударного взаимодействия, а сами частицы большую часть времени проводят в состоянии полета или «витания». И даже в «докритическом» состоянии частицы под действием вибрации друг относительно друга перемещаются отдельные частицы, а не объемы среды. Фактически уплотнение происходит через изменение взаимного расположения частиц.

Таким образом, для описания процессов виброуплотнения нужна теория, которая не только описывает состояние среды на основе усредненных показателей, вроде пористости, но и учитывает взаимное расположение отдельных частиц, т. е. структуру зернистой среды. Одной из наиболее проработанных теорий такого плана представляется механика зернистых сред, разработанная И.И. Кандауровым как альтернатива классической механике грунтов [5]. Подход Кандаурова позволяет моделировать напряженное состояние в зернистых средах с учетом их структуры. В частности, моделирование напряженного состояния формовочного песка, находящегося в опоке под действием равномерно распределенного давления, показало вызванное трением падение вертикального напряжения возле стенок опоки (рис. 1) [6].



**Рис. 1.** Распределение вертикальных напряжений в песчаном массиве на глубине 200 мм при действии на поверхности равномерно распределенного давления

Однако механика зернистых сред разрабатывалась Кандауровым для применения в строительстве, т. е. для расчета напряженного состояния грунтов под нагрузкой. В связи с этим она построена на ряде допущений, которые не позволяют напрямую применить механику зернистых сред для моделирования процессов воздействия вибрации на песок. Рассмотрим эти допущения [5] более подробно.

**Постоянство размера.** В первом приближении предполагается, что все частицы представляют собой шары одинакового диаметра. Известно, что размеры частиц реального песчаного массива, как правило, подчиняются логнормальному распределению [7]. Форма частиц также может быть самой разнообразной. Тем не менее, песок, применяемый для формовки при ЛГМ, как правило, имеет сильно сосредоточенную структуру. Поэтому данное допущение не выглядит совершенно неприемлемым. Тем не менее, было бы хорошо, если бы разрабатываемая модель позволяла работать с зернистыми массивами, имеющими заданное распределение по размерам.

**Постоянство плотности.** Даже в уравнениях динамики И. И. Кандаурова предполагается, что средняя плотность массива остается примерно постоянной. Это по понятным причинам является неприемлемым для моделирования виброуплотнения. Конечно, несложно ввести в уравнения переменную плотность, однако весь вопрос состоит в том, по какому закону она будет меняться и от чего будет зависеть. Понятно, что плотность самих частиц в процессе виброуплотнения не меняется. Как уже было сказано выше, плотность определяется структурой песчаного массива, и изменение плотности под действием вибрации — это изменение структуры. В связи с этим особенно важным представляется следующее допущение.

**Постоянство структуры.** Одним из главных допущений механики зернистых сред Кандаурова является предположение, что среднее число контактов, приходящееся на одну частицу в массиве шаров одинакового размера равно четырем в двухмерной задаче и восьми — в трехмерной. Исходя из этого допущения выводится основное уравнение, описывающее распределение напряжений от точечной вертикальной силы на поверхности массива, из которого выводятся другие уравнения:

$$\sigma_z(x, z) = \frac{P}{z\sqrt{2\pi\nu}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\nu z^2}\right), \quad (1)$$

где  $x, z$  — горизонтальная и вертикальная координата соответственно;  $\sigma_z$  — вертикальные напряжения в массиве;  $P$  — сила, приложенная к массиву;  $\nu$  — коэффициент распора.

Однако нас постоянство среднего числа контактов не устраивает, поскольку мы можем рассматривать среднее число контактов (а также дисперсию числа контактов) и пористость массива как два основных численных показателя его структуры. Первый из них определяет взаимное расположение частиц, второй — плотность массива. При этом, если будет меняться среднее число контактов, значит будет меняться и вид уравнения (1) и, как следствие, все остальные уравнения для распределения напряжений в массиве.

**Отсутствие разрывов.** Уравнение динамики Кандаурова в общем случае имеют вид

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \nu z \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

где

$$f = \frac{1}{\nu z} \left( \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right). \quad (3)$$

Здесь  $w$  — перемещение среды вдоль оси  $z$ ;  $\rho$  — плотность среды.

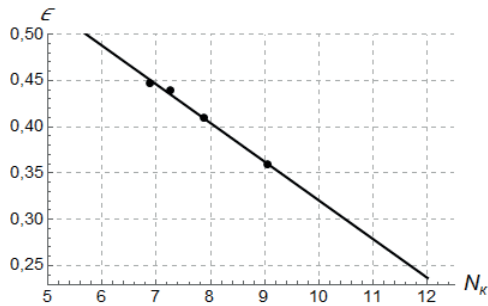
Аналогичные уравнения записываются для двух других координат. По сути, это уравнения для среды, не имеющей разрывов. А песок, как известно, при некоторых режимах вибрации может терять связную структуру и распадаться на отдельные частицы.

Таким образом, первым этапом решения задачи по моделированию виброуплотнения должно быть «расширение» механики зернистых сред Кандаурова за счет преодоления указанных выше ограничений.

Рассмотрим последнее допущение. От него можно избавиться путем модифицирования уравнений вида (2) и (3). Один из вариантов такого модифицирования является использование дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [8]. В частности, поскольку основным условием разрыва среды является обнуление напряжения сжатия в зернистой среде (напряжения растяжения зернистая среда не воспринимает), для модификации уравнения можно использовать так называемую функцию Хевисайда  $\theta(x)$ , принимающую значение единицы при  $x \geq 0$  и ноль — при  $x < 0$ . В этом случае уравнение (3) может быть модифицировано следующим образом:

$$f = \frac{1}{vz} \left( \frac{\partial(\theta(\sigma_z) \cdot \sigma_z)}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right). \quad (4)$$

Гораздо сложнее дело обстоит с допущениями 2 и 3. Понятно, что они увязаны друг с другом, так как связаны между собой пористость, определяющая плотность, и среднее число контактов, определяющее структуры. В литературе представлены экспериментальные данные, позволяющие проследить эту зависимость. Например, в работе [9] приведены результаты нескольких экспериментов для сред, состоящих из шаров одинакового размера с нерегулярной укладкой. На рис. 2 представлены эти результаты и построена регрессионная прямая.



**Рис. 2.** Зависимость между пористостью  $\epsilon$  и средним числом контактов  $N_k$

На рисунке видно, что с уменьшением пористости (уплотнением) увеличивается среднее число контактов, что является ожидаемым результатом. Однако данная зависимость характерна для упаковки шаров одинакового размера, а массив с логнормальным распределением по размерам может формировать другие зависимости. Очевидно, что преодоление третьего ограничения сводится к модификации уравнения (1) таким образом, чтобы оно зависело от среднего числа контактов. Механизмы подобной модификации должны опираться на тот способ получения формулы (1), который использовал сам Кандауров: построение вероятностной модели передачи нагрузки с вышележащих слоев на нижележащие.



Иначе построение зависимостей среднего числа контактов от пористости для зернистого массива с конкретным гранулометрическим составом возможно осуществить на базе метода Монте-Карло путем формирования случайных массивов с заданной пористостью и «измерением» в них среднего числа контактов и их дисперсии с последующей статистической обработкой полученных данных. Таким образом возможно исключение из теории и первого допущения о равенстве размеров частиц.

Весь комплекс указанных мероприятий позволит построить расширенную механику зернистых сред, которая послужит теоретической основой для моделирования процессов воздействия вибрации на зернистые среды, в том числе процессов виброуплотнения песка при литье по газифицируемым моделям.

### Литература

- [1] Шуляк В.С. *Литье по газифицируемым моделям*. Санкт-Петербург, НПО «Профессионал», 2007, 408 с.
- [2] Членов В.А., Михайлов Н.В. *Виброкипящий слой*. Москва, Наука, 1972, 344 с.
- [3] Авдокушин В. П. Выбор оптимальных режимов виброуплотнения форм при литье по газифицируемым моделям. *Литейное производство*, 2001, № 4, с. 38–40.
- [4] Карташев Н.Н., Членов В.А., Урьев Н.Б. Исследование реологических свойств слоя сыпучих материалов в условиях вибрации. *Закономерности процессов образования и разрушения дисперсных материалов*. Минск, Изд-во АН БССР, 1972, с. 239–247.
- [5] Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Ленинград, Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988, 280 с.
- [6] Карпенко Д.Н., Вербицкий В.И. Анализ распределения напряжений в формовочном песке. *Литейщик России*, 2010, № 9, с. 37–39.
- [7] Васильев В.А. *Физико-химические основы литейного производства: учебник*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994, 320 с.
- [8] Финогенко И.А. *Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью*. Иркутск, ИДСТУ СО РАН, 2013, (Неклассические задачи динамики и управления; вып. 1), 82 с.
- [9] Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Ленинград, Химия, 1968, 512 с.

УДК 621.74.019

## Исследование влияния двуслойной деформации на образование пористости

© Ларичев Николай Сергеевич, Коротченко Андрей Юрьевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[Larnikser@mail.ru](mailto:Larnikser@mail.ru)

*Рассмотрены факторы, влияющие на образование пористости и трещин в теле отливки. Показаны зависимости доли твердой фазы, теплообмена, фильтрации и перепада давления в двухфазной зоне от величины локализации двуслойной деформации.*

Установлено, что в связи с уменьшением доли твердой фазы у оснований дендритов при затрудненной усадке к концу процесса затвердевания остается некоторая доля жидкой фазы, которую можно условно обозначить как эвтектическая составляющая. Показано, что уменьшение эффективной теплоемкости и доли твердой фазы в результате деформаций способствует уменьшению времени затвердевания. В работе скорректирован поправочный коэффициент к критерию образования пористости от степени локализации деформации. Показано, что при степени локализации деформаций от 5, требуется скорректировать расчетное значение примерно на 50 %.

**Ключевые слова:** твердая фаза, затрудненная усадка, усадочная пористость, фильтрация.

Служебные свойства отливки в той или иной степени формируются на всех этапах технологического цикла ее изготовления. Однако одним из наиболее важных для формирования свойств отливки является этап затвердевания залитого сплава в форму. На этот этап влияет много факторов: характер затвердевания расплава, физико-химическое взаимодействие отливки с формой, геометрические размеры отливки и формы, теплофизические свойства формовочных материалов. Создание математической модели, учитывающей многообразие факторов, связано с большими затруднениями.

На служебные свойства отливок значительное влияние оказывают внутренние несплошности (поры, трещины). Для выявления причин образования этих дефектов в отливках и поиска средств их устранения литейщик-технолог использует программы компьютерного моделирования литейных процессов. Однако опыт применения специализированных пакетов программ свидетельствует о том, что проблему повышения плотности отливок не удается решить, применяя математические модели с заложенными в них модельными упрощениями. Причиной этого являются сделанные допущения о факторах, влияющих на процесс затвердевания отливки.

Факторов, которые обуславливают образование пористости и трещин в теле отливки, много, среди них недостаточное питание тепловых узлов, выделение газов из сплава во время затвердевания, размыв формы, замешивание шлака и т. д. Кроме отдельного влияния факторов нельзя не учитывать их взаимного действия и сочетания. Например, наличие в теле отливки пористости приводит к увеличению напряженно-деформированного состояния отливки. В последнее время появился ряд работ, в которых говорится об обратном влиянии на образование пористости — наличие затрудненной усадки, и что это влияние может быть значительным.

В работе показаны зависимости доли твердой фазы, теплообмена, фильтрации и перепада давления в двухфазной зоне от величины локализации двuosной деформации.

Установлено, что в связи с уменьшением доли твердой фазы у оснований дендритов при затрудненной усадке, к концу процесса затвердевания остается некоторая доля жидкой фазы, которую можно условно обозначить как «эвтектическая составляющая».

Показано, что уменьшение эффективной теплоемкости и доли твердой фазы в результате деформаций способствует уменьшению времени затвердевания.

Скорость фильтрационного течения в двухфазной зоне повышается с увеличением деформаций. Также наличие деформаций способствует ненулевой скорости течения расплава у основания дендритов в случае, если перепад давления в двухфазной зоне не превысил критического.

Перепад давления в двухфазной зоне увеличивается с ростом деформаций, т. е. вероятность останова фильтрационного течения за счет достижения критического значения перепада давления увеличивается. При этом следует отметить, что перепад давления от усадки и ее затруднения становится соизмерим при сумме коэффициентов локализации деформаций равном 2 и выше.

В работе скорректирован поправочный коэффициент к критерию образования пористости.

### Литература

- [1] Баландин Г.Ф. *Основы теории формирования отливки: в 2 ч. Ч. II: Формирование макроскопического строения отливки*. Москва, Машиностроение, 1979. 335 с.
- [2] Баландин Г.Ф. *Теория формирования отливки: Основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 360 с.
- [3] Коротченко А.Ю. Новый критерий образования усадочной пористости в отливках. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2011, № 9, с. 3–7.
- [4] Поляков С., Коротченко А.Ю., Баст Ю. Новая форма критерия Нияма для предсказания пористости при затрудненной усадке отливок из Al-Cu сплавов. *Литейщик России*, 2012, № 4, с. 23–30.
- [5] Поляков С. Значение критического числа Нияма как функция от технологических условий литья. URL: [http://newcompcast.ru/Artikel/Niyama/Niyama-12\\_2012.pdf](http://newcompcast.ru/Artikel/Niyama/Niyama-12_2012.pdf) (дата обращения 10.02.2015).
- [6] Monroe C., Beckermann C. Development of a hot tear indicator for use casting simulation. *Proceedings of the 58th SFSA Technical and Operating Conference*, Paper No. 3.1, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2004.
- [7] Monroe C., Beckermann C. Development of a hot tear indicator for steel casting. *Materials Science and Engineering*, 2005, A. 413-414, p. 30–36.
- [8] Rappaz M., Drezet J., Gremaud M. A new hot-tearing criterion. *Metall., and Mater. Trans. A*, 1999, vol. 30A, p. 449–455.
- [9] Rappaz M., Farup I., Drezet J.-M. Study and modeling of hot tearing formation. *Merton Flemings Symposium MIT*. Cambridge, Massachusetts, June 28–30. 2000.

УДК 621.74:669.714

## Исследование влияния комплексного модифицирующего флюса на микроструктуру силуминов

© Шляпцева Анастасия Дмитриевна, Петров Игорь Алексеевич,  
Ряховский Александр Павлович

Россия, г. Москва, Российский государственный технологический университет  
имени К.Э. Циолковского» (МАТИ)

[dimash881@yandex.ru](mailto:dimash881@yandex.ru), [Lumen-2007g@mail.ru](mailto:Lumen-2007g@mail.ru)

*Показано, что обработка различных силуминов разработанным комплексным модифицирующим флюсом, позволяет эффективно воздействовать на структуру сплавов, и повышает их механические свойства. Предполагаемый флюс содержит по-*

верхностно-активные вещества и вещества, образующие дополнительные центры кристаллизации,

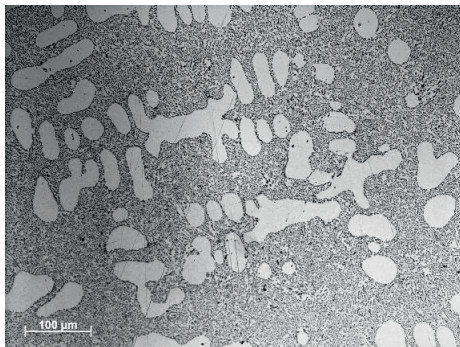
**Ключевые слова:** силумины, комплексное модифицирование, флюс, микроструктура.

Для улучшения структуры и механических свойств литейных алюминиевых сплавов необходимо регулировать как режимы плавки, так и условия кристаллизации отливок. Наиболее действенно на структурообразование этих сплавов влияет модифицирование, т. е. измельчение структуры за счет введения в расплав небольшого количества модифицирующих добавок, что позволяет существенно повысить свойства силуминов.

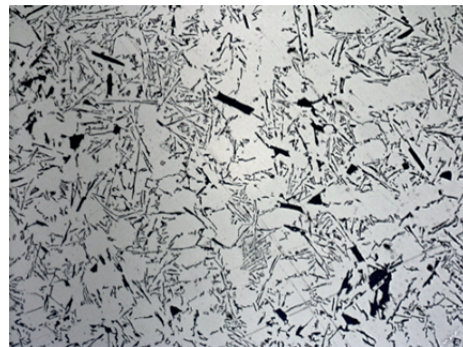
В настоящей работе изучалось изменение микроструктуры различных силуминов за счет обработки расплава комплексным модифицирующим флюсом (КМФ) на основе соли бария, соли титана и углерода, разработанным в МАТИ им. К.Э. Циолковского на кафедре «САПР и ТЛП» [1, 2]. Для исследования были выбраны следующие сплавы: АК12, АК9 и Al – 6 % Si – 4 % Cu. Количественный анализ кристаллов эвтектического кремния проводился с помощью программы ImageExpertPro 3.4.

Основными структурными составляющими сплава АК12 являются дендриты  $\alpha$ -твердого раствора и эвтектика ( $\alpha + \text{Si}$ ), в немодифицированном виде содержащая частицы кремния в форме игл и пластин. В то же время в сплаве АК9 кроме перечисленных выше структурных составляющих присутствует силицид магния ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ), который при термообработке растворяется в  $\alpha$ -твердом растворе [3]. В структуре сплава Al – 6 % Si – 4 % Cu основными структурными составляющими являются дендриты  $\alpha$ -твердого раствора и эвтектика ( $\alpha + \text{Si}$ ), а также частицы хрупкой фазы  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , понижающей пластичность.

Исследования микроструктуры сплава АК12 показали, что обработка его КМФ приводит к значительному измельчению и облагораживанию эвтектики ( $\alpha + \text{Si}$ ), а также к более равномерному распределению и измельчению дендритов  $\alpha$ -твердого раствора (рис. 1, а). Количественный анализ доказал, что обработка сплава АК12 КМФ обеспечивает уменьшение площади эвтектических кристаллов кремния на 90 % относительно немодифицированного сплава (рис. 1, б).



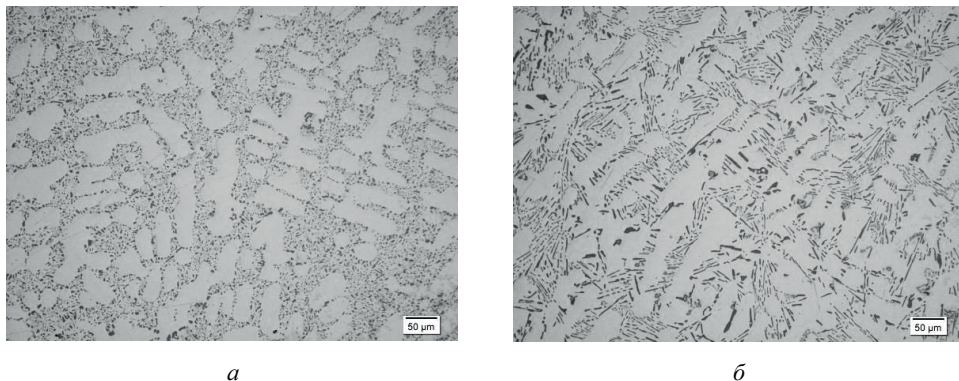
а



б

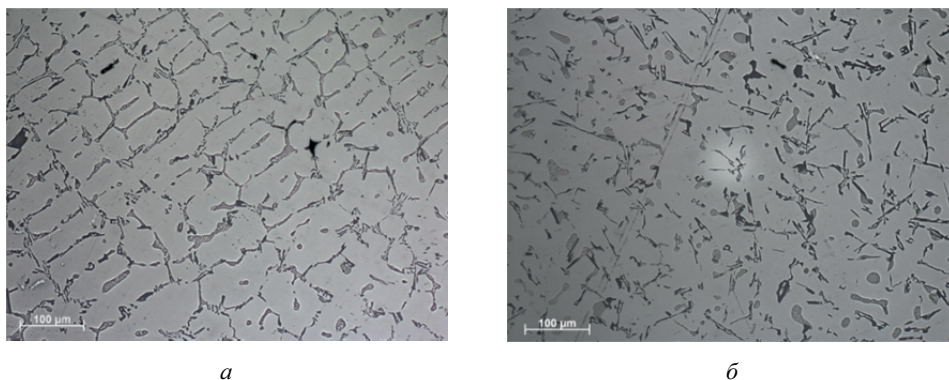
**Рис. 1.** Микроструктура сплава АК12 (x200): а — обработанного КМФ; б — немодифицированного

Исследования микроструктуры сплава АК9 показали, что обработка КМФ приводит к измельчению эвтектики ( $\alpha + \text{Si}$ ), а так же к более равномерному распределению и измельчению дендритов  $\alpha$ -твердого раствора (рис. 2, *а*). Количественный анализ показал, что обработка сплава АК9 КМФ приводит к уменьшению площади эвтектических кристаллов кремния на 78 % относительно немодифицированного сплава (рис. 2, *б*).



**Рис. 2.** Микроструктура сплава АК9 (x200):  
*а* — обработанного КМФ; *б* — немодифицированного

Анализ микроструктуры сплава системы Al – 6 % Si – 4 % Cu показал, что обработка КМФ приводит к изменению микроструктуры (рис. 3, *а*). Сплав характеризуется упорядоченной структурой, измельчением дендритов  $\alpha$ -твердого раствора и более равномерным распределением и измельчением частиц кремния в эвтектике по сравнению с немодифицированным сплавом (рис. 3, *б*). Количественный анализ показал, что обработка сплава системы Al – 6 % Si – 4 % Cu приводит к уменьшению площади эвтектических кристаллов кремния на 75 % относительно немодифицированного сплава.



**Рис. 3.** Микроструктура Al – 6 % Si – 4 % Cu (x200):  
*а* — обработанного КМФ; *б* — немодифицированного

Таким образом, разработанный комплексный модифицирующий флюс оказывает положительное воздействие на микроструктуру различных алюминиевых литейных

сплавов, содержащих в своем составе кремний, что позволяет значительно повысить механические свойства отливки, в том числе, относительное удлинение, а также литейные свойства алюминиевого расплава.

### Литература

- [1] Ряховский А.П., Петров И.А., Шляпцева А.Д., Моисеев В.С. Исследование модифицирующего влияния углекислых солей на сплав АК12. *Литейщик России*, 2013, № 2, с. 20–22.
- [2] Моисеев В.С., Ряховский А.П., Петров И.А. Повышение эффективности модифицирующей обработки силуминов. *Технология легких сплавов*, 2012, № 2, с. 94–96.
- [3] Белов Н.А., Савченко С.В., Белов В.Д. *Атлас микроструктур промышленных силуминов: справочник*. Москва, Изд. дом МИСиС, 2009, 204 с.

УДК 621.74.019

## Факторы, влияющие на процесс выгорания глин в разовых песчано-глинистых формах

© Озерова Елизавета Сергеевна<sup>1</sup>, Романов Максим Сергеевич<sup>2</sup>,  
Коротченко Андрей Юрьевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Россия, г. Москва, Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова

[elizaveta.ozerova@gmail.com](mailto:elizaveta.ozerova@gmail.com), [mcliz@mail.ru](mailto:mcliz@mail.ru)

*Рассмотрены основные особенности процесса выгорания формовочных материалов в песчано-глинистых смесях. Проанализированы различные уравнения баланса формовочных материалов, а также методы определения коэффициентов термодеструкции формовочных материалов, в том числе с использованием пакета прикладных программ ProCas. Проведено сравнение результатов расчета коэффициентов термодеструкции для двух отливок — «Плита» и «Основания». Установлены причины различий между коэффициентами термодеструкции, определенных экспериментально и рассчитанных на основании результатов моделирования в пакете прикладных программ ProCast. На основании проведенных исследований определены основные факторы, влияющие на процесс выгорания компонентов формовочных песчано-глинистых смесей, что делает возможным построение математической модели процесса выгорания.*

**Ключевые слова:** песчано-глинистые смеси, глины, литье в песчано-глинистые формы, выгорание компонентов смеси.

В современном российском литейном производстве до 80 % отливок изготавливаются литьем в сырые песчано-глинистые формы [1]. Этот способ является не только наиболее дешевым, но и обеспечивает высокую гибкость технологического процесса.

Однако для данного способа изготовления отливок большое влияние на качество отливок оказывает качество формовочной смеси. До 40 % дефектов отливок происходят из-за недостаточного качества формовочных материалов и смеси [2]. В условиях современного литейного производства необходимо обеспечить высокую производительность, расширение ассортимента выпускаемых изделий и уменьшение сроков адаптации технологии, что возможно только в условиях разработки групповых технологических процессов изготовления отливок. Однако применение таких процессов в широко номенклатурном производстве при постоянном (усредненном) освежении приводит к неоправданному перерасходу формовочных материалов, периодическим вспышкам сложно устранимого брака.

Задача поддержания состава и свойств формовочной смеси является многофакторной и не решается без учета всех факторов процесса смесеприготовления. Основной используемый в России метод для решения данной задачи — изменение освежения по результатам лабораторных анализов. Однако при применении данного метода невозможно обеспечить быструю корректировку состава, поскольку проведение подобных анализов занимает до одного дня, а стабилизацию свойств невозможно провести мгновенно в связи с большим объемом смеси в системе смесеприготовления [3].

В условиях гибкого производства такие долгосрочные корректировки не могут обеспечить достаточной стабильности качества смеси. Также необходимо отметить, что подобный подход не позволяет эффективно прогнозировать свойства смеси на этапе подбора рецептуры.

Поэтому важной научно-технической задачей является создание математической модели, описывающей выгорание основных компонентов смеси.

В настоящее время, подобной модели не существует. В работах [3, 4] приведены уравнения баланса формовочных смесей и уравнения, позволяющие рассчитать выгорание основных компонентов смеси, исходя из массы отливки. Однако в данных уравнениях не учитывается ни геометрия, ни материал сплава отливки. Единственным учитываемым параметром, отражающим изменяющуюся номенклатуру производства, является масса отливки. Процесс выгорания составляющих смеси отражается лишь изменяющимся коэффициентом термодеструкции, измеряющимся экспериментально.

Сравнивая результаты моделирования процесса затвердевания и охлаждения отливок «Плита» и «Основание» в программе Procast, авторы данной статьи получили, что средний коэффициент термодеструкции для данных отливок составил 0,1 и 0,6 соответственно. Однако при назначении освежения для данных отливок в соответствии с рекомендациями [3, 4] коэффициент термодеструкции должен быть равен 0,3, т. е. для отливки «Плита» освежение по бентониту составило бы в 3 раза больше, чем необходимое технологически, а для отливки «Основание» — в 2 раза меньше, что привело бы к постепенному снижению прочности смеси в процессе циклической работы формовочной смеси.

Такое различие в коэффициентах термодеструкции обусловлено тем, что программа Procast при моделировании учитывает теплофизические свойства смеси и геометрию отливок, тогда коэффициент термодеструкции получаемых экспериментально по методике [3, 4] отражает лишь физические свойства бентонита.

Поэтому в будущем необходимо получить математическую модель, учитывающей не только геометрию, но и теплофизические свойства смеси.

Таким образом, в настоящее время отсутствует математическая модель для описания выгорания компонентов смеси. Коэффициенты термодеструкции, полученные экспериментально, для отливок «Плита» и «Основание» одинаковые и равны 0,3.

Коэффициент термодеструкции для данных отливок, рассчитанные при помощи пакета прикладных программ равны 0,1 и 0,6 соответственно. Математическая модель процесса выгорания компонентов смеси, должна учитывать теплофизические свойства смеси, геометрию отливки.

### Литература

- [1] Дибров И.А. Состояние и перспективы развития литейного производства России. *Тр. 7-го съезда литейщиков России*. Новосибирск, 2005, т. 1, с. 4–13.
- [2] Долгополов В.Н. Техническое перевооружение смесеприготовительных отделений: выбор типа смесителя и поэтапная комплектация. *Литье Украины*, 2005, № 8.
- [3] Кваша Ф.С. *Стабилизация состава и свойств песчано-глинистых формовочных смесей*. Москва, МГИУ, 2003, 108 с.
- [4] Дегтяренко Г.И., Воронцова Т.В. Оценка термоизноса глинистых материалов и расчет освежения формовочной смеси. *Литейщик России*, 2012, № 11, с. 16–20.

УДК 621.74.019

## Сравнение методов критериальной оценки образования усадочной пористости для отливок из алюминиевых сплавов

© Савохина Ольга Михайловна, Коротченко Андрей Юрьевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[savokhina@mail.ru](mailto:savokhina@mail.ru)

*Выполнен сравнительный анализ методов критериальной оценки образования усадочной пористости путем проведения численного и натурного экспериментов. Разработана геометрия пробы и проведено компьютерное моделирование процесса затвердевания отливки в пакете программ Flow3D и определены места вероятного образования усадочной пористости. Индикаторами образования пористости служили результаты расчетов «тепловых узлов», критическое значение критерия Нияма и разработанный на кафедре «Литейные технологии» критерий  $K_1$ . Критерий  $K_1$  показал, что вся отливка будет поражена пористостью, что соответствует действительности.*

**Ключевые слова:** критерии образования пористости, моделирование литейных процессов, компьютерная томография.

При разработке технологии изготовления отливки перед технологом встает задача устранения или уменьшения усадочных дефектов при минимальном количестве элементов питания. Наиболее часто используемым методом снижения количества дефектов в отливке является установка приблелей для компенсации усадки. В отечественной и зарубежной технической литературе приводится множество методик рас-



чета геометрии прибылей и зоны их действия. Также в помощь технологу разработан ряд пакетов программ математического моделирования литейных процессов, позволяющих определить области расположения усадочной пористости. Расчет зон вероятного расположения усадочной пористости при моделировании основан на использовании различных критериев образования пористости.

В рамках работы выполнен сравнительный анализ методов критериальной оценки образования пористости путем проведения численного и натурального экспериментов. Для этого была разработана геометрия пробы и проведено компьютерное моделирование процесса затвердевания отливки в пакете программ Flow3D и определены места вероятного образования усадочной пористости. Индикаторами образования пористости служили результаты расчетов «тепловых узлов», критическое значение критерия Нияма и разработанный на кафедре МГТУ им. Н.Э. Баумана «Литейные технологии» критерий  $K_1$ . Критическое значение критерия  $K_1$  рассчитывалось с использованием критического значения критерия Нияма для алюминиевых сплавов для по формуле

$$K_1 = \frac{\sqrt{\Delta T}}{K_N},$$

где  $K_1$  и  $K_N$  — критические значения критериев,  $\Delta T$  — интервал затвердевания сплава. В рассматриваемом случае критическое значение критерия  $K_1 = 0,012 \text{ м/с}^{0,5}$ .

Из анализа результатов моделирования в Flow3D следует, что вся отливка поражена пористостью  $\approx 1\%$ . Критерий Нияма показал отсутствие пористости в углах отливки, а критерий  $K_1$  — что вся отливка поражена пористостью.

Для оценки надежности методов критериальной оценки образования усадочной пористости отлиты пробы из сплава типа АК9. Пробы были подвергнуты рентгеноскопическому анализу на установке GE Phoenix micromex DXR (минимальный размер пор 20...30 мкм). Контроль выполнен по центральной линии отливки от прибыли до торца.

Также было проведено исследование пористости с применением компьютерной томографии. Результаты томографии подтвердили, что вся отливка поражена мелкой пористостью. Из обработки результатов томографии следует, что процент пористости соответствует 2,19 %.

**Таким образом, критерий Нияма** показал наличие в отливке областей, свободных от усадочной пористости, однако проведенные исследования на томографии показали, что вся отливка поражена пористостью. Значение пористости, рассчитанной в пакете программ Flow3D соответствует 1 %, в реальности — 2,19 %. Критерий  $K_1$  показал, что вся отливка будет поражена пористостью, что соответствует действительности.

## Литература

- [1] Трухов А.П., ред. *Технология литейного производства: Литье в песчаные формы*. Москва, Издательский центр «Академия», 2005, 528 с.
- [2] Чуркин Б.С., ред. *Технология литейного производства*. Екатеринбург, Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2000, 662 с.
- [3] Галдин Н.М., Чистяков В.В., Шатульский А.А. *Литниковые системы и прибыли для фасонных отливок*. Москва, Машиностроение, 1992, 256 с.
- [4] Коротченко А.Ю. Критерии образования усадочной пористости в отливках. *Литейщик России*, 2010, № 4, с. 43–47.

УДК 621.7.043

### Совершенствование технологического процесса горячей раскатки колец из сплава ВТ6

© Алимов Артем Игоревич, Евсюков Сергей Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[alimov\\_ai@bmstu.ru](mailto:alimov_ai@bmstu.ru)

*Построена математическая модель технологического процесса раскатки колец из титанового сплава ВТ6, учитывающая микроструктурные превращения при деформационно-термической обработке. Исследовано влияние режимов деформации на микроструктуру получаемых колец. Предложены рекомендации по проектированию технологического процесса раскатки колец с регламентированной микроструктурой из сплава ВТ6.*

**Ключевые слова:** раскатка колец, сплав ВТ6, микроструктура, рекристаллизация.

Раскатка колец — высокопроизводительный технологический процесс получения бесшовных колец диаметром до 8 м и массой до 82 т из сталей, титановых, никелевых и других сплавов [1]. Наиболее широкое применение раскатка колец получила в авиакосмической отрасли для производства вращающихся и неподвижных деталей двигателей всех типов, армированного трубопровода, элементов узла качания и других деталей. Данные кольца изготавливают из титановых и никелевых сплавов, которые обладают необходимыми эксплуатационными свойствами: жаропрочностью, сопротивлением ползучести, длительной прочностью и др. Кроме авиакосмической отрасли, раскатка колец широко применяется в колесопрокатной отрасли, производстве подшипников, крупных зубчатых колес и шестерен, деталей ядерных реакторов, различных фланцев.

Технологический процесс раскатки колец состоит из получения заготовки и собственно раскатки. Чаще всего заготовку для раскатки изготавливают ковкой за три операции: осадка, прошивка и пробивка (рис. 1).

Раскатка колец осуществляется на специальных раскатных станах, имеющих один (радиальная раскатка) или два (радиально-осевая раскатка) калибра (рис. 2).

Нагретая до температуры деформации заготовка устанавливается на оправку. В радиальном калибре деформация заготовки осуществляется путем поступательного движения оправки к главному валку и вращения главного валка. Аксиальные валки осуществляют деформацию по высоте в осевом калибре. По мере увеличения диаметра кольца аксиальные валки смещаются для предотвращения проскальзывания кольца в аксиальном калибре. Приводными являются главный и аксиальные валки, а оправка вращается за счет действия сил трения с заготовкой. Для центрирования заготовки применяются центрирующие валки (на рис. 2 не представлены).

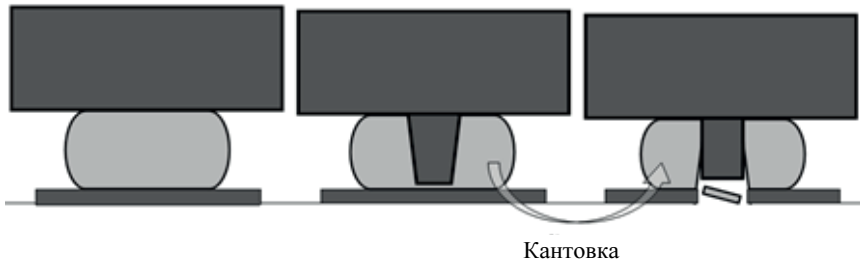


Рис. 1. Последовательностьковки заготовки для раскатки [2]

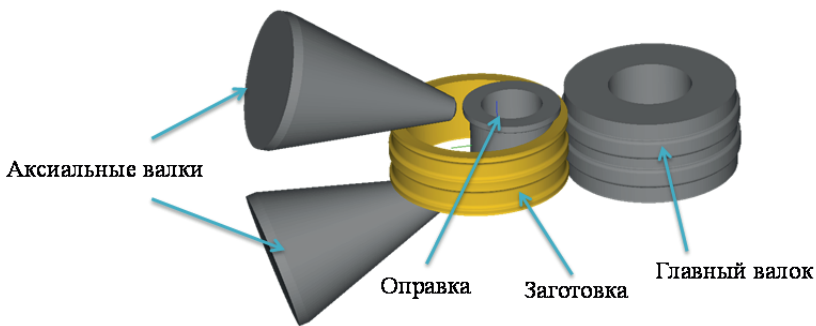


Рис. 2. Схема радиально-осевой раскатки кольца [3]

Механические свойства титановых сплавов обладают высокой чувствительностью к типу и параметрам микроструктуры, причем варьирование микроструктурой позволяет одновременно повышать параметры прочности и пластичности [4].

Процессы раскатки колец достаточно хорошо изучены, однако рекомендации по назначению режимовковки заготовки и раскатки колец из титановых сплавов, позволяющие получить требуемую микроструктуру, в литературе отсутствуют. Таким образом, необходимо создать инструмент, позволяющий исследовать влияние режима деформации на микроструктуру получаемых колец как на стадии получения заготовки, так и на стадии раскатки кольца. На основе исследования влияния режимов деформации на микроструктуру получаемых колец предложены рекомендации по проектированию технологического процесса раскатки колец с регламентированной микроструктурой из сплава ВТ6.

## Литература

- [1] Eruç E., Shivpuri R. A summary of ring rolling technology — I. Recent trends in machines, processes and production lines. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1992, vol. 32, no 3, pp. 379–398.
- [2] Wang C., Geijselaers H. J. M., Boogaard A. H. Multi-stage FE simulation of hot ring rolling. *AIP conference proceedings*. AIP Publishing LLC, 2013. Vol. 1532, p. 1014–1019.
- [3] Пчельников А.В., Трошин А.Н. Моделирование раскатки профильных колец. *Инженерные системы: Тр. Международн. форума*. Москва, 2014.
- [4] Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИС-МАТИ, 2009, 520 с.

УДК 621.7.011

## Определение кривых текучести сплава ВТ6 с помощью инверсного анализа

© Алимов Артем Игоревич, Шитиков Андрей Андреевич,  
Евсюков Сергей Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[alimov\\_ai@bmstu.ru](mailto:alimov_ai@bmstu.ru), [aa-shitikov@yandex.ru](mailto:aa-shitikov@yandex.ru)

*Предложена методика определения кривых текучести с помощью инверсного анализа в программном комплексе DEFORM. Варьирование кривых текучести выполнено методом деформируемого многогранника. По предложенной методике определены кривые текучести титанового сплава ВТ6 в диапазоне температуры 800... 920 °С, истинных скоростей деформации 0,01...1 с<sup>-1</sup>.*

**Ключевые слова:** кривая текучести, кривая упрочнения, инверсный анализ, оптимизация, сплав ВТ6.

В настоящее время для анализа процессов обработки металлов давлением широко используется метод конечных элементов, который позволяет за короткий срок и с минимальными затратами исследовать напряженно-деформированное состояние заготовок, температуру, энергосиловые параметры процессов обработки давлением, эволюцию микроструктуры и многое другое. Одним из основных параметров материала, необходимого для моделирования формоизменения, является кривая текучести, которая обычно представляет собой зависимость напряжения текучести от накопленной деформации, скорости деформации и температуры. Чаще всего для определения кривой текучести проводят испытания на одноосное сжатие образца в изотермических условиях при постоянной истинной скорости деформации.

Одно из важнейших требований для получения адекватных результатов расчета — точность определения кривой текучести деформируемого материала. Среди

факторов, вносящих ошибку в определение напряжения текучести, можно выделить следующие:

- отклонение содержания легирующих элементов и примесей в сплаве в пределах допуска;
- влияние сил трения;
- тепловой эффект деформации, приводящий к неоднородности температуры в заготовке;
- отличие реального закона движения деформирующего инструмента от заданного.

Для минимизации ошибки, обусловленной отклонением содержания легирующих элементов и примесей в сплаве, рекомендуется строить кривую текучести путем испытания нескольких групп образцов из разных плавок.

Для компенсации адиабатического нагрева в процессе испытания можно воспользоваться уравнением, позволяющим вычислить повышение температуры [1]:

$$\Delta T = \frac{\eta \cdot 0,95 \int \sigma d\varepsilon}{\rho C_p},$$

где  $\Delta T$  — изменение температуры, °С;  $\eta$  — адиабатический поправочный коэффициент;  $\int \sigma d\varepsilon$  — площадь под кривой текучести, МПа;  $\rho C_p$  — теплоемкость, Дж/°С.

Зная повышение температуры, можно провести корректировку напряжения текучести:

$$\Delta \sigma = \Delta T \left. \frac{d\sigma}{dT} \right|_{\varepsilon, \dot{\varepsilon}}. \quad (2)$$

Здесь  $\frac{d\sigma}{dT}$  — температурная чувствительность напряжения текучести, МПа/°С.

Для компенсации влияния сил трения можно воспользоваться уравнением [2–5]:

$$\Delta \sigma = \frac{C^2 P}{2(\exp(C) - C - 1)},$$

где  $C = 2\mu r/h$ ,  $r$  и  $h$  — начальные радиус и высота образца соответственно.

Для минимизации ошибки, связанной с отличием реального закона движения деформирующего инструмента от заданного, используют специальные испытательные машины, которые позволяют точно реализовывать необходимую кинематику движения.

Как следует из изложенного выше, определение действительной кривой текучести представляет сложную инженерную задачу. Одним из методов, позволяющих автоматизировать корректировки, является инверсный анализ — варьирование кривой текучести при расчете задачи каким-либо теоретическим методом до тех пор, пока машинная диаграмма (или другие параметры) не совпадут с полученными экспериментально.

В работе предложена методика определения кривых текучести с помощью инверсного анализа в программном комплексе DEFORM. Варьирование кривых текучести выполнено с помощью метода деформируемого многогранника. По предложенной методике определены кривые текучести титанового сплава ВТ6 в диапазоне

температур 800...920 °С, истинных скоростей деформации от 0,01 до 1 с<sup>-1</sup> до истинной степени деформации 1,6.

### Литература

- [1] Shen G. et al. A technique to compensate for temperature history effects in the simulation of non-isothermal forging processes. *Journal of materials processing technology*, 1992, т. 33, №. 1, с. 125–139.
- [2] Ebrahimi R., Najafizadeh A. A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 152, no 2, pp. 136–143.
- [3] Li Y. P. et al. Correcting the stress-strain curve in hot compression process to high strain level. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, vol. 40, no 4, pp. 982–990.
- [4] Monajati H. et al. Deformation characteristics of isothermally forged UDIMET 720 nickel-base superalloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, vol. 36, no 4, pp. 895–905.
- [5] Rasti J., Najafizadeh A., Meratian M. Correcting the stress-strain curve in hot compression test using finite element analysis and Taguchi method. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*, 2011, vol. 8, no 1, pp. 26–33.

УДК 621.7.043

## **Моделирование технологического процесса поперечно-клиновой прокатки заготовки для горячей объемной штамповки коленчатого вала**

© Алленов Максим Геннадьевич, Белокуров Олег Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[okdell@mail.ru](mailto:okdell@mail.ru)

*Рассмотрены технологические процессы получения коленчатого вала с применением технологической операции гибки, а также выбор поперечно-клиновой прокатки как способа получения предварительной заготовки. В программе Qfort выполнено моделирование процесса клиновой прокатки предварительной заготовки с учетом разных условий трения и проверка адекватности формулы для определения трения на контактных поверхностях инструмента.*

**Ключевые слова:** поперечно клиновая прокатка, горячая объемная штамповка, коленчатый вал.

Коленчатый вал — одна из важнейших деталей двигателя внутреннего сгорания, воздушного компрессора, насоса и т. д. Его надежность и долговечность влияют на безаварийность и безотказность работы этих устройств. В связи с современными тенденциями создания двигателей с увеличенными сроками эксплуатации выдвигаются высокие требования к прочности и износостойкости коленчатых валов. Износостой-

кость и долговечность работы шеек коленчатого вала зависит от волокнистого строения металла. В течение длительного времени на кафедре «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся исследования штамповки поковки с направленным волокнистым строением [1–4].

Например, технологический процесс горячей объемной штамповки поковки коленчатого вала [5] с использованием операции гибки, при котором волокнистое строение повторяет контур поковки, включает в себя следующие операции:

- формирование шатунных шеек;
- зажим шатунных шеек и гибка коленчатого вала;
- предварительная формовка щек и противовесов коленчатого вала;
- окончательная формовка коленчатого вала;
- обрезка.

Исследования [2–4] доказали возможность использования этого процесса при штамповке повокос коленчатых валов.

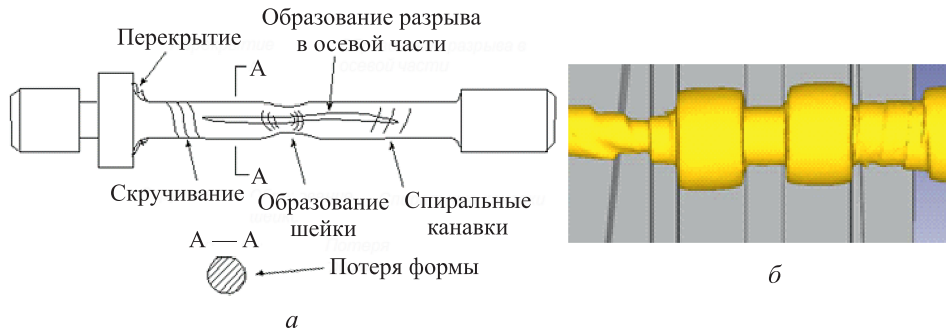
Анализ зарубежной литературы подтверждает актуальность работы в этом направлении. Различают несколько методов получения направленного волокнистого строения металла:

- 1) TR-method [6, 7];
- 2) forging with flexible forming tool [8–10];
- 3) binding with upsetting [11].

Однако метод получения предварительной заготовки в виде ступенчатого вала, и особенно шатунных шеек, под последующую гибку в данных указанных изданиях не исследован.

В настоящей работе проведено моделирование технологического процесса поперечно-клиновой прокатки предварительной заготовки в виде ступенчатого вала. Исследуемый процесс состоит из следующих операций:

- получение шатунных шеек и ступенчатых элементов вала поперечно-клиновой прокаткой;
- зажим шатунных шеек и гибка коленчатого вала;
- окончательная формовка коленчатого вала.



**Рис. 1.** Дефекты при клиновой прокатке: *а* — теоретические исследования, *б* — компьютерное моделирование

Основным качественным критерием оценки правильности математической модели при исследовании поперечно-клиновой прокатки является получение дефектов, приведенных в литературе (рис. 1) и подтвержденных на практике [12]. Дефекты клиновой прокатки подразделяют на шесть категорий (рис. 1, *а*). Все они обусловле-

ны неравномерностью деформации (потеря формы, образование шейки), течением металла (образование разрыва) и внедрением инструмента в поверхность заготовки.

В процессе проведения моделирования удалось выявить практически все указанные дефекты. Результат моделирования приведен на рис. 1, б. Разрыв в осевой части можно получить только с использованием модели разрушения методом конечных элементов в программах Deform и Qform.

Объектом исследования был выбран технологический процесс, рассмотренный в работе [2]. Цель моделирования — получение заготовки для коленчатого вала. Заготовка для последующей операции гибки представлена на рис. 2. Необходимо получить данную заготовку без дефектов, выбрав оптимальные параметры инструмента и задав коэффициент трения для боковой поверхности клина.

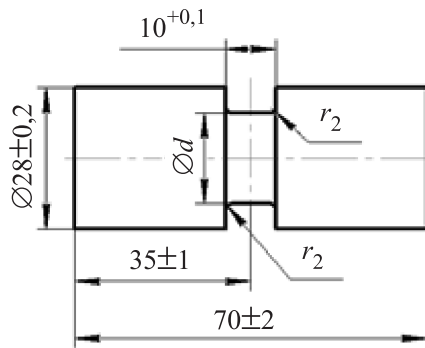


Рис. 2. Заготовка, получаемая клиновой прокаткой

Одним из важнейших параметров при моделировании данного процесса является значение коэффициента трения, который, в свою очередь, зависит от состояния поверхности инструмента. Используем условный коэффициент трения, который зависит от профиля рифления и состояния его поверхности, [13]:

$$M_{\text{эkv}} = \frac{1 - \mu \operatorname{tg} \varphi}{\mu + \operatorname{tg} \varphi},$$

где  $\mu$  — коэффициент трения на поверхности рифления;  $\varphi$  — угол заострения профиля рифления.

После проведение моделирования (рис. 3) в программном комплексе Qform выявлено, что расчет коэффициента трения по приведенной формуле существенно влияет на моделирование процесса клиновой прокатки. В первых вариантах моделирования образовалось большое количество складок при внедрении ножевого участка в заготовку.

В последующих вариантах уменьшение наклонных поверхностей и установка рассчитанного коэффициента трения обеспечило наиболее оптимальные параметры: угол наклона поверхностей  $\alpha = 80^\circ$ , длина ножевой части  $L_n = 42$  мм, длина зоны удлинения  $L_{з.у} = 215$  мм. Однако в этом случае на поверхности шейки заготовки отмечаются спиральные канавки от движения инструмента (рис. 4).



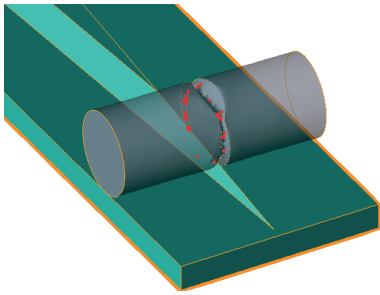


Рис. 3. Образование складок и зажимов на начальном этапе

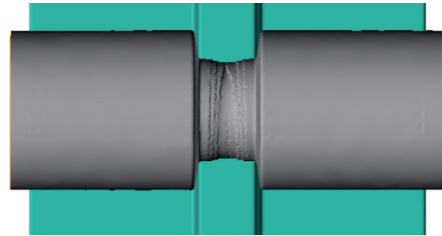


Рис. 4. Образование спиральных канавок

В результате получена математическая модель для исследования процесса поперечно-клиновой прокатки заготовки для коленчатого вала. Выбрана и апробирована формула для расчета коэффициента трения на боковых поверхностях клина. Рассмотрено влияние угла наклона клиньев на протекание процесса клиновой прокатки. Выявлены недостатки математической модели без учета критериев разрушения.

### Литература

- [1] Банных О.А., Белокуров О.А., Блинов В.М. и др. Штамповка поковок с направленным волокнистым строением. *Вестник машиностроения*, 2000, № 10, с. 33–37.
- [2] Майстров Ю.В., Белокуров О.А. Экспериментальные исследования и оптимизация операции гибки при штамповке коленчатых валов. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2011, № 10, с. 17–21.
- [3] Майстров Ю.В. Исследование операции гибки при штамповке коленчатых валов с помощью компьютерного моделирования. *Известия вузов. Машиностроение*, 2011, № 9, с. 37–43.
- [4] Семенов Е.И., Майстров Ю.В. Новая заготовительная операция гибки для штамповки коленчатых валов. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2011, № 9, с. 15–18.
- [5] Семенов Е.И., Крук А.Т., Соков В.И., Дибнер Ю.А., Мороз В.Я., Перевезенцев С.Н. *Способ изготовления коленчатого вала*. Пат. 2247623 Российская Федерация, МПК В21К001/08. № 2002135252/02; заявл. 24.12.02; опубл. 10.03.05, бюл. № 7, 7 с.
- [6] Adolf W.W. Neuere Entwicklungen bei geschmiedeten Kraftfahrzeug-Kurbelwellen. *Schmiede-Journal*, September 2001, p. 14–17.
- [7] Walczyk W., Milenin A., Pietrzyk M. Computer Aided Design of New Forging Technology for Crank Shafts. *Steel research*, int. 82. 2011, no. 3.
- [8] Boyer B., Massoni E. Advanced Technology of Plasticity. *Proc. 6<sup>th</sup> ICTP Nuremberg*, 1999, pp. 347–352.
- [9] Behrens B.-A., Doege E., Reinsch S., Telkamp K., Daehndel H., Specker A. Precision forging processes for high-duty automotive components. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, pp. 139–140.
- [10] Alves L.M., Martins P.A.F. Flexible forming tool concept for producing crankshafts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, pp. 467–474.
- [11] United States Patent Ruget. 451 Mar. 21, 1972 541. *Apparatus for forging*. 2,534,613 12/1950 Meley.29/6 Crankshafts and the like 2,747,253 5/1956 Conchon.29/6.
- [12] Kache H., Stonis M., Behrens B.-A. Development of a warm cross wedge rolling process using FEA and downsized experimental trials. *Prod. Eng. Devel.*, 2012, pp. 44–46.
- [13] Кашеев В.И. *Процессы в зоне фрикционного контакта металлов*. Москва, Машиностроение, 1978, 212 с.

## Анализ разделительных операций листовой штамповки и автоматизированная оценка характеристик металла

© Виноградов Альберт Ильич, Шибakov Владимир Георгиевич

Россия, Республика Татарстан, г. Набережные Челны,  
научно-технический центр ОАО «КАМАЗ»

[vinogradov.ri@mail.ru](mailto:vinogradov.ri@mail.ru)

*Рассмотрен процесс анализа разделительных операций листовой штамповки на примере пробивки отверстия и ее моделирования в САЕ-программах. Предложен метод и устройство для измерения характеристик металла непосредственно на рабочей позиции по соотношению выходных параметров на пробивном пуансоне максимальной длины. Разработан алгоритм позволяющий производить оценку годности металла по измеренным характеристикам и на основе этих данных управлять технологическим процессом в режиме реального времени.*

**Ключевые слова:** листовой металл, пробивной пуансон, штампуемость.

При расчетном исследовании контактного взаимодействия режущих инструментов разделительных штампов с листовым металлом можно применять метод конечных элементов, заложены в программном комплексе САЕ [1]. Для моделирования системы пуансон–заготовка–матрица автор статьи использовал программный комплекс LS-Дуна. В качестве входных параметров для задания геометрии твердых тел приняты размеры пуансона, матрицы, заготовки, а также физико-механические характеристики материалов и параметры конечно-элементной сетки.

Путем изменения размеров и дислокации зон сгущения конечно-элементной сетки (КЭ-сетки) можно достаточно точно смоделировать напряженно-деформированное состояние в исследуемой системе, а изменение их размеров и формы позволяет охватить широкий класс конструкций инструмента, а также толщин и материалов металла.

Например, в процессе многовариантных исследований при изменении диаметра штампуемой детали, ее толщины и технологического зазора между пуансоном и матрицей установлено, что:

- контакт штампового инструмента с заготовкой сосредоточен в зоне режущих кромок, а ширина контактного пояса составляет  $0,1-0,5t$ , где  $t$  — толщина штампуемого металла;
- с увеличением относительного технологического зазора  $z/t$  контактные давления повышаются, а ширина контактного пояса уменьшается;
- при сгущении КЭ-сетки в зоне режущей кромки инструмента уровень максимальных напряжений на кромке увеличивается.

Распределение напряжений в исследуемой системе взаимодействующих тел, отображающий характер напряженно-деформированного состояния, особенностью которого заключается в сосредоточении напряжений в области режущих кромок пуансона и матрицы, а также в зоне разделения штампуемого металла, изображено на рис. 1.



Рис. 1. Распределение осевых (слева) и касательных (справа) напряжений

Таким образом, при конечно-элементном моделировании можно установить качественные и количественные характеристики напряженно-деформированного состояния в системе режущий инструмент — листовый металл, вытекающие из анализа его численной модели, которая создана на базе математической модели, содержащей систему уравнений теории упругости, условий контактного взаимодействия в виде условий непроникновения для взаимодействия гладких тел без трения [2, 3]. При этом необходимо рассмотреть эту систему взаимодействующих тел и на основе экспериментальных методов, что позволяет обосновать достоверность и сходимость расчетных численных результатов.

Для определения характеристик материала при пробивке отверстия следует измерять усилие на пробивном пуансоне и его перемещение. С этой целью один из пробивных пуансонов 1 (рис. 2) изготавливают большей длины, чем другие. Датчик 2 для измерения параметров штампуемости содержит силоизмеритель (месдоза) и ходограф. Сигналы с датчика 2 через усилитель 3 поступают в блок сравнения 4, где происходит сопоставление поступающих с датчика сигналов с эталонными.

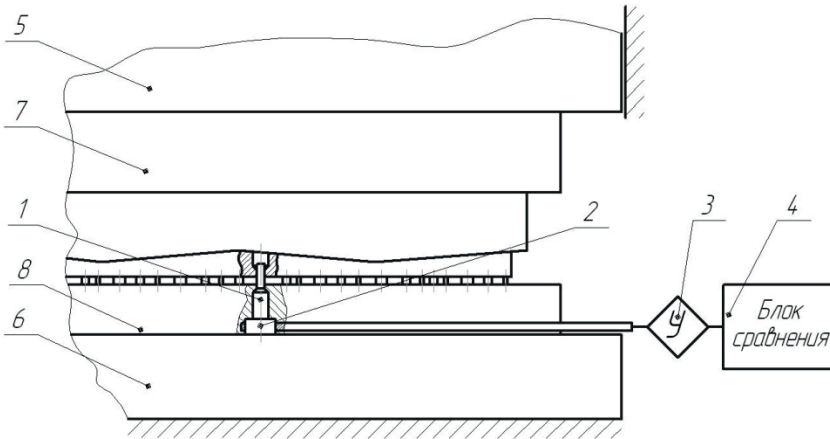


Рис. 2. Блок-схема устройства для реализации метода:

1 — пробивной пуансон максимальной длины; 2 — датчик для измерения параметров штампуемости (силоизмеритель — месдоза, ходограф); 3 — усилитель; 4 — блок сравнения измеренных параметров с эталонными; 5 — ползун; 6 — стол пресса; 7, 8 — верхний и нижний штампы

По измеренной силе пробивки  $P_{\max}$  (рис. 3) определяют сопротивление срезу  $\tau_c$ . Значения  $\tau_c$  и  $h_{\text{п}}$  сопоставляют с предельно допустимыми значениями  $[\tau_c]$  и  $[h_{\text{п}}]$ , кото-

рые установлены в процессе эксплуатации технологического процесса листовой штамповки конкретной детали:

$$\frac{P_{\max}}{F_c} < [\tau_c];$$

$$h_n > [h_n]$$

где  $P_{\max}$  — максимальная технологическая сила при пробивке отверстия в заготовке;  $F_c$  — площадь поверхности среза в заготовке при пробивке отверстия;  $[\tau_c]$  — допустимое значение сопротивления срезу для материала заготовки, при которой не происходит перегрузка инструмента;  $h_n$  — перемещение пробивного пуансона от момента его внедрения в заготовку до начала уменьшения величины технологического усилия с его максимального значения;  $[h_n]$  — допустимая глубина зоны пластического сдвига в заготовке, соответствующая достаточной пластичности обрабатываемого материала.

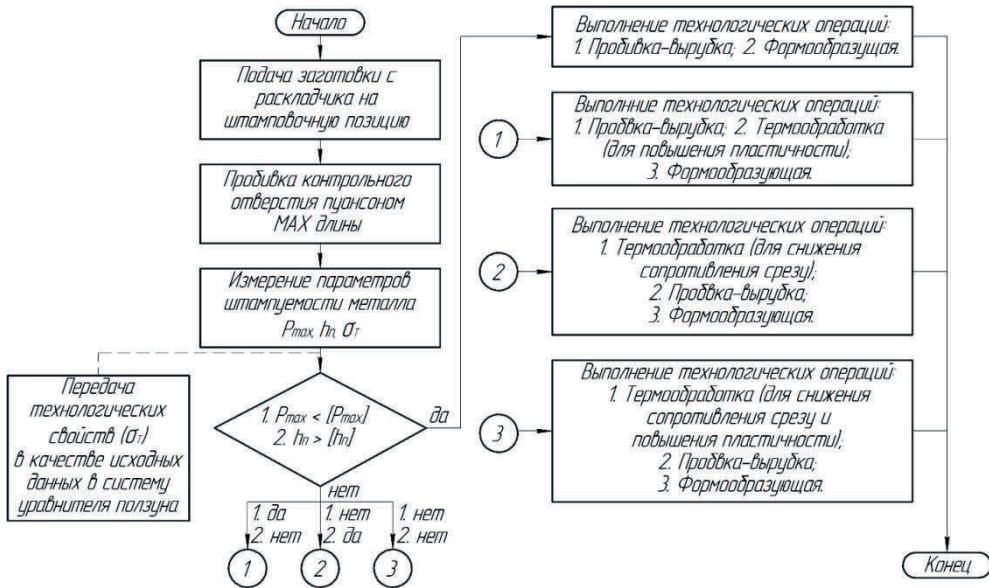
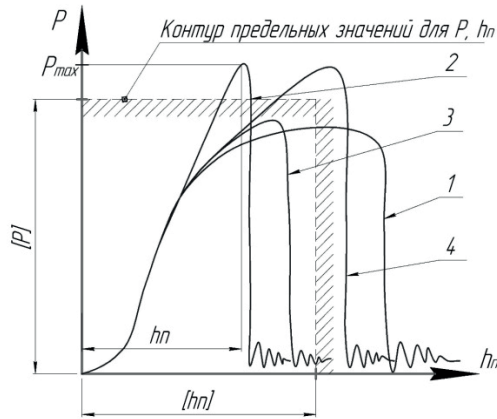


Рис. 3. Алгоритм реализации метода оценки штампуемости листового металла

Значения  $[\tau_c]$  и  $[h_n]$  ограничивают область допустимой штампуемости металла, причем  $[\tau_c]$  соответствует предельно допустимой прочности штампуемого металла меньше которой инструментальная оснастка не подвергается перегрузкам и имеет экономически целесообразную стойкость, а  $[h_n]$  — предельно допустимой пластичности металла ниже которой вероятность появления брака по разрушению металла при формообразовании становится больше принятой нормы.

Алгоритм реализации предлагаемого метода (рис. 4) дополнительно имеет выход на систему уравнивателя ползуна прессы для передачи в режиме реального времени измеренных параметров штампуемости каждой заготовки.



**Рис. 4.** Оценка параметров штампуемости листовой заготовкой:  
 1 — допустимый вариант штампуемости металла; 2–4 — недопустимые варианты штампуемости металла

Если при внедрении пуансона в металл заготовки при пробивке отверстия окажется, что

$$\tau_c < [\tau_c]; \quad h > [h_n],$$

то последующая формообразующая операция будет выполняться при гарантированном бездефектном изготовлении детали и приемлемой стойкости инструмента.

В противном случае, когда

$$1) \tau_c > [\tau_c]; \quad h > [h_n];$$

$$2) \tau_c < [\tau_c]; \quad h < [h_n];$$

$$3) \tau_c > [\tau_c]; \quad h < [h_n],$$

заготовка формообразующей операции не подвергается, а удаляется со штамповочной линии на термообработку, так как в случае 1 возможна перегрузка инструмента и его преждевременный выход из строя, в случае 2 — появление брака по разрушению заготовки, а в случае 3 — и то и другое.

Схематично рассмотренные варианты представлены на рис. 4.

Таким образом, одновременное выполнение технологической операции пробивки отверстия с измерением параметров штампуемости металла для каждой заготовки позволяет повысить производительность труда, стойкость инструмента, поскольку в неблагоприятном случае  $\tau_c > [\tau_c]$  при штамповке на гидропрессах нагрузке подвергается только один пробивной пуансон, который выполняется более длинным, чем другие, и в случае его перегрузки до момента внедрения других пуансонов рабочий ход гидропресса прекращается, и происходит реверс хода пресса. Кроме того, экономится металл, так как каждая заготовка с недостаточной пластичностью, которая могла бы разрушиться при формообразующей операции, снимается со штамповочной линии и подвергается термообработке, повышающей пластичность.

## Литература

- [1] Мовшович И.Я., Ткачук Н.А., Ткачук А.В., Демина Н.А. Экспериментальное определение контактных давлений в технологической системе пуансон–заготовка–матрица разделительного штампа. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2012, № 9, с. 25–30.
- [2] Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров. *Прикл. мат. и мех.*, 1977, т. 41, вып. 2, с. 329–337.
- [3] Кравчук А.С. Постановка задачи о контакте нескольких деформируемых тел как задачи нелинейного программирования. *Прикл. мат. и мех.*, 1978, т. 42, вып. 3, с. 466–474.

УДК 621.7-52

## Управление надежностью технологического процесса холодной листовой штамповки на базе интеллектуальной системы

© Кашапова Лилия Рамиловна, Утяганов Рамиль Фавзятovich,  
Панкратов Дмитрий Леонидович

Россия, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, ОАО «КАМАЗ»

[pishite.lile@gmail.com](mailto:pishite.lile@gmail.com)

*Для исключения периодического брака при изготовлении деталей, получаемых методом холодной листовой штамповки разработана методика автоматизированной оценки надежности технологического процесса. Методика основана на анализе факторов надежности: конструкция детали, материал, механические и физические требования к ней; параметры оборудования, характеристики инструмента и т.д. В работе представлена экспертная система, функционирующая на базе статистических накоплений знаний оператора (технолога) и решений алгоритмов управления.*

**Ключевые слова:** методика, устойчивость, надежность, листовая штамповка, управление, технологический процесс, экспертная система, алгоритм.

В настоящее время листовая штамповка является одним из передовых методов обработки металлов давлением. Она применяется для изготовления широкой номенклатуры изделий машиностроительного производства: кузова, рамы, усилительные элементы автомобилей, корпуса самолетов и т. д. Холодная штамповка позволяет получать детали сложных форм, изготовление которых другими методами обработки либо невозможно, либо затруднительно [1].

Однако при использовании данной технологии нередко возникают дефекты: складки и разрыв листа (или трещины). Появление данных дефектов носит периодический характер, что обусловлено рядом причин: разброс свойств листового материала в состоянии поставки, износ инструмента и прессового оборудования, предельные значения геометрических параметров деформирующих частей штампа, нетехнологичность конструкции изделия и т. п.

Сегодня необходим способ, уменьшающий или, в лучшем случае, исключаящий возникновение подобных дефектов, так как производство высококачественных деталей является одной из главных задач ведущих предприятий мира. При этом вопросы надежности приобретают все более высокую значимость в современных рыночных условиях: импортозамещение, экономия материальных и трудовых ресурсов с выполнением требований менеджмента качества. Поэтому на этапе разработки и реализации технологических процессов листовой штамповки необходимо закладывать, контролировать, а также управлять их конструкторско-технологическими параметрами, чтобы обеспечить их требуемую согласованность.

Предлагается методика автоматизированной оценки надежности технологических процессов, которая на этапе проектирования позволяет выявить и скорректировать их критические параметры.

Суть методики сводится к автоматизированному анализу факторов надежности: конструкция детали, материал, из которого она изготавливается, механические и физические требования к ней; параметры оборудования, на котором будет осуществляться штамповка, характеристики инструмента и т. д. Перечень факторов и их обозначения представлены в [2].

Разработана экспертная система, функционирующая на базе статистических накоплений знаний оператора (технолога) и решений алгоритмов управления. Схема экспертной системы представлена на рис. 1.

Ядром системы является база знаний, которая хранит в себе информацию о зависимостях между различными факторами надежности. Знания хранятся в виде математических зависимостей и технологического опыта, формализация этих знаний выполнена в виде правил. База знаний изначально формируется за счет формализованных знаний экспертов. Дальнейшее пополнение производится либо экспертом, либо на основе базы прецедентов.

Система функционирует на основе типа операции и соответствующих параметрах технологического процесса (марка материала, сортамент, тип заготовки, смазка, параметры инструмента и т. д.), которые вводятся на первом этапе.

Затем следует выбор вида брака, который периодически возникает в процессе штамповки. В базе данных в соответствии с типом брака подбирается соответствующий алгоритм для расчета технологических параметров. Следующий этап состоит из расчета технологических параметров по подобранному алгоритму. В случае удачного расчета на выходе составляется технологический процесс с новыми параметрами. В случае невозможности расчета параметров по алгоритму технолог вручную разрабатывает новый технологический процесс и апробирует его методом имитационного моделирования (например, в программе AUTOFORM, PAMSTAMP и т. п.).

В блоке «Эксперт» технологический процесс с расчетными параметрами проверяется специалистом, который в итоге принимает одно из решений:

- направить технологический процесс на следующий этап: оценку целесообразности;
- вернуть технологу для доработки;
- отправить в базу знаний, как готовый технологический процесс с параметрами, позволяющими получить бездефектную штамповку.

Оценка целесообразности — оценка реальности и экономической целесообразности внедрения в конкретных производственных условиях. После оценки целесообразности, полученные данные вносятся в базу прецедентов, из которой она передается в базу знаний и базу данных.

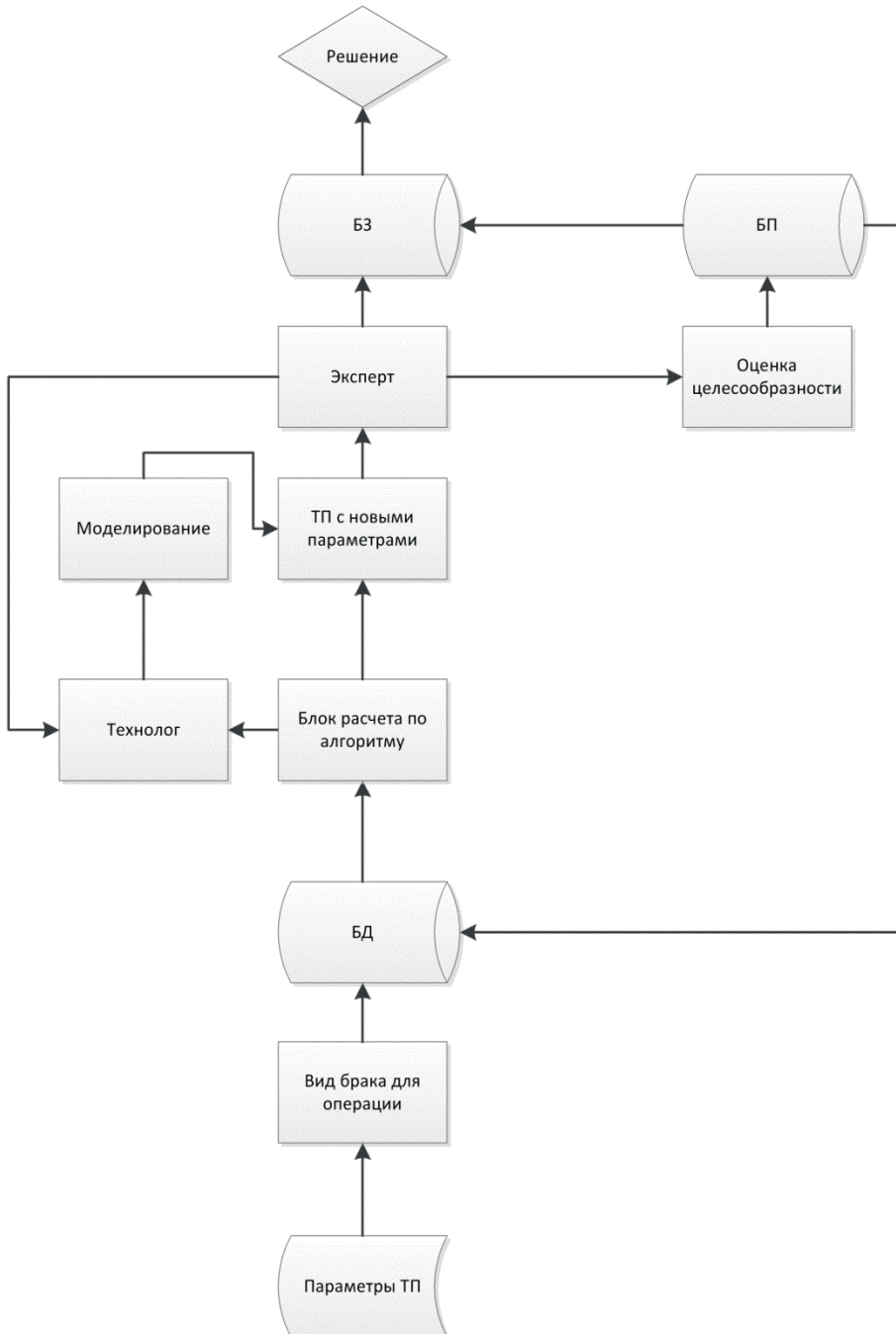


Рис. 1. Принципиальная схема экспертной системы обеспечения надежности технологического процесса листовой штамповки



Создание интеллектуальной системы, обобщающей знания в области холодной листовой штамповки, позволяет рассчитывать рациональные параметры технологических процессов, исключаяющие возможность возникновения периодического брака.

Таким образом, регулируя значение одного или нескольких показателей надежности, которые в силу взаимозависимости «скорректируют» другие показатели, можно явно или косвенно управлять технологическим процессом на базе интеллектуальной системы [3].

### Литература

- [1] Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке*. Санкт-Петербург, Машиностроение, 1979, 520 с.
- [2] Кашапова Л.Р., Панкратов Д.Л., Шибиков В.Г. Методика автоматизированной оценки надежности технологического процесса листовой штамповки на этапе его проектирования. *Фундаментальные исследования*, 2014, № 8, ч. 7, с. 1533–1538.
- [3] Кашапова Л.Р., Панкратов Д.Л., Шибиков В.Г., Виноградов А.И. Обеспечение стабильности и надежности технологического процесса листовой штамповки деталей сложной формы. Тез. докл. мат. междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы — 2014», Казань, 3–5 декабря 2014 г. Ч. 2, Казань, 2014, с. 53–57.

УДК 621.7.043

## Изотермическое деформирование колеса самолета

© Милевская Тамара Васильевна, Семенов Евгений Иванович

Россия, г. Москва, Всероссийский институт авиационных материалов

[milevskaya-tv@yandex.ru](mailto:milevskaya-tv@yandex.ru)

*В настоящее время в мировой практике основной тенденцией развития является ресурсо- и энергосбережение. Наиболее доступные способы снижения энерго- и материалоемкости технологий получения деталей — это повышение точности изготовления штампованных поковок и, как следствие, сокращение объемов операций обработки резанием; снижение числа переходов штамповки, что позволяет экономить на штамповой оснастке, которая дорога и трудоемка в изготовлении, и на прочих расходах, связанных с дополнительным запуском кузнечно-прессового оборудования. В ходе проведенного исследования была разработана технология изотермической штамповки наружного обода колеса самолета и подобран деформируемый материал, увеличивающий весовую эффективность конструкции. Применение рекомендованного материала позволило уменьшить массу штамповки на 4 кг при сохранении объема используемой заготовки. Полученные штамповки имеют удовлетворительное расположение волокна и требуемый уровень механических свойств.*

**Ключевые слова:** изотермическая штамповка, алюминиевый сплав, энергоэффективность, ресурсосбережение, штамповка колеса самолета.

В настоящее время основной тенденцией развития промышленности является ресурсо- и энергосбережение. К наиболее доступным и очевидным способом снижения энерго- и материалоемкости технологий получения деталей относятся: повышение точности изготовления штампованных поковок и, как следствие, сокращение объемов операций обработки резанием; сокращение числа переходов штамповки, что позволяет экономить на штамповой оснастке, которая дорога и трудоемка в изготовлении, и на прочих расходах, связанных с дополнительным запуском кузнечно-прессового оборудования. Технология изотермической штамповки позволяет изготавливать сложноконтурные точные штамповки, геометрическая форма и размеры которых близки к конечным размерам деталей. Суть технологии изотермической штамповки состоит в том, что деформирование заготовки осуществляют на низкой скорости деформирования с поддержанием постоянной температуры деформации. Такая технология также позволяет сократить количество технологических переходов штамповки.

Технологии изотермической штамповки сложнопрофильных точных заготовок из алюминиевых сплавов находят все более широкое применение в автомобилестроении. В ближайшие годы ожидается внедрение данных энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий в производство изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов, используемых в авиационной и космической технике [1].

Наружный обод колеса самолета — геометрически сложная и ответственная деталь, поэтому важно, чтобы технология его изготовления обеспечивала правильную волокнистую структуру и высокие механические свойства, гарантирующие надежность эксплуатации.

В настоящее время наружный обод колеса самолета изготавливают из высокопрочного деформируемого алюминиевого сплава 7050 по серийной технологии, предусматривающей восемь переходов. Изготовленная по технологии изотермической штамповки заготовка имеет массу 52 кг.

При проведении научно-исследовательской работы была поставлена задача оптимизировать серийную технологию таким образом, чтобы она соответствовала современным требованиям ресурсо- и энергосбережения при сохранении показателей прочности.

Усовершенствования проводили в двух направлениях: сокращение технологических переходов и повышение весовой эффективности конструкции, что в дальнейшем может позволить значительно снизить материальные затраты на новые самолеты.

Сокращение количества технологических переходов возможно при повышении пластичности деформируемого материала. Протекание деформационных процессов с малыми скоростями и при постоянной оптимальной температуре значительно повышает пластичность деформируемых материалов [2–6]. Такая особенность процесса позволяет изготавливать поковки с тонкими полотнами и ребрами, выступами и полостями, резкими перепадами сечений, вертикальными безуклонными стенками и другими элементами, получить которые обычной штамповкой невозможно или трудно [3].

Разработанная технология изотермической штамповки позволила сократить количество технологических переходов при изготовлении наружного барабана колеса самолета до шести.

Достижение поставленной цели работы по разработке энерго- и ресурсосберегающей технологии изотермической штамповки наружного барабана колеса самолета требует комплексного решения имеющихся проблем: не только оптимизация серийной технологии производства, но и грамотный выбор деформируемого материала.

Для повышения весовой эффективности конструкции сплав 7050 заменен на перспективный высокопрочный деформируемый алюминий-литиевый сплав, который при сохранении прочности на уровне традиционных высокопрочных сплавов обладает пониженной плотностью, что позволяет снизить общий вес конструкции, а соответственно расширить полезный объем самолета — повысить грузоподъемность, сэкономить горючее летательных аппаратов.

Алюминий-литиевый сплав В-1469 считают одним из наиболее перспективных для сплавов авиационно-космической промышленности. Он по удельной прочности превосходит существующие алюминиевые деформируемые сплавы и характеризуется коррозионной стойкостью, трещиностойкостью и усталостной долговечностью [7–9].

Промышленное опробование технологии изотермической штамповки наружного барабана колеса самолета проводили на металлургическом заводе ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» (ОАО «КУМЗ») — на единственном заводе, который выпускает полуфабрикаты из алюминий-литиевых сплавов.

Штамповка наружного барабана колеса самолета, изготовленная из предложенного сплава имела массу 48 кг. Если исходить из расчета, что в одной стойке шасси может быть до четырех пар колес, то конструкция стойки шасси станет легче на 16 кг, что довольно существенно, так как позволяет поднимать больше полезного груза.

Проведены исследования макро- и микроструктуры, а также механических свойств полученных штамповок.

Полученные результаты показали, что макроструктура однородная мелкозернистая с благоприятным расположением волокна. Механические свойства соответствуют требуемому уровню.

Разработанная технология изотермической штамповки наружного обода колеса самолета и применение алюминий-литиевого сплава обеспечивает значительную экономию материальных затрат за счет сокращения количества запусков кузнечно-прессового и нагревательного оборудования, а также за счет снижения общей массы конструкции.

## Литература

- [1] Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. *Авиационные материалы и технологии*, 2012, № 5, с. 7–17.
- [2] Фиглин С.З., Бойцов В.В., Бахарев А.В., Калпин Ю.Г. Преимущества горячей изотермической штамповки. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, 1972, № 9, с. 7–9.
- [3] Нестеров В.С., Еманов Л.Ф., Кропинов В.Е., Шичков И.Ю. Точная объемная изотермическая штамповка алюминиевых и магниевых сплавов. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, 1989, № 5, с. 17–19.
- [4] Охрименко Я.М., Смирнов О.М., Горбунов В.С., Сурмач Л.В., Морозов Л.И. Точная штамповка металлов и сплавов в состоянии сверхпластичности. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, 1972, № 8, с. 10–14.
- [5] Бойцов В.В., Бахарев А.В., Калпин Ю.Г., Фиглин С.З., Капкин Ю.И. Изотермическое деформирование серого чугуна. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, 1973, № 8, с. 12–14.
- [6] Калпин Ю.Г., Гершман Г.Б., Кобяков В.А., Шерман Я.И., Бурхина А.Н. Изотермическая штамповка поршней из сплава АЛ25. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, 1979, № 2, с. 12–14.

- [7] Высокопрочный сплав на основе алюминия и способ получения изделия из него: пат. 2443793. Российская Федерация; опубл. 08.10.2010.
- [8] Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П. и др. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминийлитиевого сплава В-1469. *Авиационные материалы и технологии*, 2011, № 1, с. 8–12.
- [9] Клочкова Ю.Ю. *Формирование структуры и свойств холоднокатаных листов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469*. Дис. ... канд. техн. наук. 05.16.01. Москва, 2014, 148 с.

УДК 62-462

## **Вывод аналитических зависимостей для краевого расширения при обжиге трубчатых заготовок в коническую матрицу с выходом в цилиндрическую часть**

© Рыжов Павел Андреевич, Евсюков Сергей Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[pr1987@mail.ru](mailto:pr1987@mail.ru)

*Рассмотрено напряженное состояние краевого участка тонкостенной трубчатой заготовки на выходе из конической обжимной матрицы. На основании совместного решения уравнений равновесия и условия пластичности Сен-Венана получен закон распределения меридиональных напряжений по очагу деформации данного участка заготовки. Совокупность полученного выражения и выражения для составляющей свободного изгиба и спрямления на выходе из очага деформации при обжиге позволяет определить значение максимального радиуса (диаметра) краевого участка трубчатой заготовки на выходе из матрицы. Показано влияние радиуса перехода конического участка матрицы в цилиндрический на значение данного радиуса (диаметра).*

**Ключевые слова:** обжим в коническую матрицу с выходом в цилиндрическую часть, краевое расширение заготовки, радиус перехода конического участка матрицы в цилиндрический.

Полученные зависимости расчета позволяют без использования специальных средств и решения сложных дифференциальных уравнений определить конечные размеры хвостовой части заготовки при обжиге с выходом в цилиндрическую часть с учетом влияния таких важных факторов, как исходная относительная толщина стенки заготовки  $S_0/D_0$ , относительный радиус перехода конического участка матрицы обжима в цилиндрический (относительный радиус скругления рабочей кромки матрицы)  $r_M/D_0$ , угол конусности матрицы обжима, а также упрочнение в процессе деформации.

Увеличение относительного радиуса скругления рабочей кромки матрицы  $r_M/D_0$  при неизменных прочих параметрах приводит к существенному уменьшению разни-

цы  $\Delta d$  между радиусом краевого участка ниппельной части полученной детали и радиусом остальной поверхности ниппеля. Упрочнение в процессе условной раздачи также ведет к снижению данной величины.

Увеличение угла конусности матрицы и исходной относительной толщины стенки — наоборот, приводит к увеличению  $\Delta d$ .

Влияние угла конусности матрицы и исходной относительной толщины стенки заготовки  $S_0/D_0$  на величину  $\Delta d$  мало по сравнению с влиянием относительного радиуса скругления рабочей кромки матрицы  $r_M/D_0$ .

### Литература

- [1] Матвеев А.Д., ред. *Ковка и штамповка: Справочник: в 4 т. Т. 4: Листовая штамповка.* Москва, Машиностроение, 1985–1987, 544 с.
- [2] Сторожев М.В., ред. *Основы теории обработки металлов давлением.* Москва, Машгиз, 1959, 539 с.
- [3] Агафонов С.А., Герман А.Д., Муратова Т.В. *Дифференциальные уравнения.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 348 с.
- [4] Попов Е.А. *Основы теории листовой штамповки.* Москва, Машиностроение, 1968, 283 с.
- [5] Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. *Технология и автоматизация листовой штамповки.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, 480 с.

УДК621.7.079

## **Влияние финишного антифрикционного безабразивного покрытия на усилие формоизменения при вытяжке деталей из сплава АМГ6БМ**

© Серёжкин Михаил Александрович, Мельников Эдуард Леонидович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[pehobatop@gmail.com](mailto:pehobatop@gmail.com)

*Рассмотрено влияние финишного антифрикционного безабразивного покрытия на стойкость штамповой оснастки при вытяжке деталей из сплава АМГ6БМ. Испытания проводились на машине трения возвратно-поступательного действия. Приведены значения эффективной толщины покрытия и данные экспериментальных исследований, доказывающие эффективность применения предлагаемого покрытия. Показано влияние состава покрытия на величину износа вытяжной матрицы.*

**Ключевые слова:** *вытяжка, матрица, покрытие, стойкость штамповой оснастки, холодная листовая штамповка.*

Технологический процесс холодной листовой штамповки (ХЛШ) характеризуется низкой стойкостью штамповой оснастки. Стойкость крупногабаритных штампов для ХЛШ составляет 5...10 тыс. готовых деталей. На стойкость штампа влияет большое число факторов: вид обработки, марка штампуемого материала, его толщина и термообработка, марка материала матрицы, точность установки пуансона, относительно матрицы, деформация станины прессы [1] и т. д.

Практика показывает, что низкая стойкость штампа при вытяжке алюминиевых сплавов обусловлена налипанием штампуемого материала на поверхность штампа. В процессе вытяжки на вытяжном ребре матрицы возникают большие усилия, которые приводят к выдавливанию смазочного материала и последующему схватыванию штампуемого материала с материалом матрицы. С точки зрения химии схватывание — это процесс образования металлических связей. Поскольку алюминий по химическим характеристикам ближе к стали, чем железо, энергия образования соединения меньше [2]. Как следствие стойкость штампа при штамповке алюминиевых сплавов ниже в 2–2,5 раза меньше, чем при штамповке стали.

Для борьбы с этим явлением было решено применить финишную антифрикционную безабразивную обработку (ФАБО) на вытяжном ребре матрицы штампа и проверить влияние металлоплакирующих смазочных материалов (на примере композиции «Валена») на изменение усилия штамповки.

ФАБО — обработка, при которой на чистовую обработанную поверхность детали натирается латунным, бронзовым или медным карандашом с использованием специальной технологической среды [3]. Технологическая среда используется для создания на поверхности детали сплошного покрытия, при ее отсутствии покрытие имеет чешуйчатое строение, состоящее из отдельных частиц, слабо скреплённых между собой и легко отделяемых от поверхности детали. При обработке образуется металлическое покрытие, химический состав которого сходен с химическим составом металла карандаша — избирательного переноса меди из сплава на поверхность обрабатываемой детали не происходит. Эффективная толщина покрытия 1...4 мкм.

Получившее покрытие заполняет микронеровности штампа, тем самым повышая площадь контактируемых поверхностей, что приводит к снижению удельного давления на контакте штампуемый материал — матрица [4]. Покрытие предотвращает контакт штампуемого материала с материалом матрицы, и играет роль смазочного материала в паре трения деталь-матрица. Образование поверхности раздела между штампуемым материалом и матрицей не позволяет им контактировать и предотвращает налипание.

Испытание на образцах показали, что применение покрытия позволяет уменьшить износ матрицы на 50...75 %. Результаты представлены на рис. 1. Испытания проводились на кафедре МТ-13 в лаборатории триботехники, на машине трения возвратно-поступательного действия. Пластина, к которой прижимался палец, совершала возвратно-поступательное движение. Со стороны пластины на пальце был закреплён диск из сплава АМГ6БМ. Таким образом имитировалось движение штампуемого материала в процессе вытяжки.

Поскольку на стойкость штампа влияет не только штампуемый материал, а ещё целый ряд факторов, повышение стойкости штамповой оснастки оценивается в 20...30 %.

Стойкость покрытия, полученного ФАБО, составляет около 20 тыс. штамповок, что сопоставимо со стойкостью вытяжной матрицы.

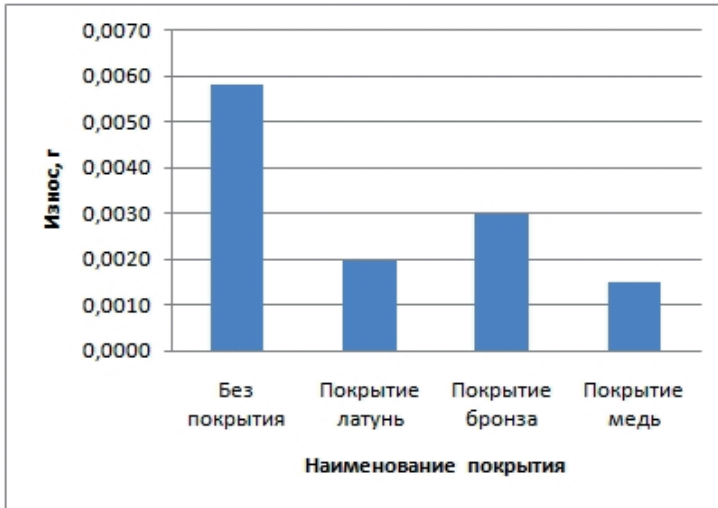


Рис. 1. Сравнение износа матрицы в зависимости от нанесенного покрытия

Таким образом, применение ФАБО позволяет повысить стойкость штамповой оснастки на 20...30 %. Проведение экспериментальных исследований показало, что стабильность наносимых покрытий различается: в одних и тех же условиях дисперсия массы нанесенных покрытий из разных материалов составляла 0,2...2 мг<sup>2</sup>. Поскольку от массы наносимого покрытия зависит толщина покрытия, это существенно влияет на его стойкость и требует дальнейшего изучения.

### Литература

- [1] Ковалёв В.Г., Ковалёв С.В. Технология листовой штамповки. Технологическое обеспечение точности и стойкости: учеб. пособие. Москва, КНОРУС, 2010, 224 с.
- [2] Серёжкин М.А., Мельников Э.Л. Повышение стойкости вытяжных штампов при изготовлении крупногабаритных днищ. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2014, № 12, с. 7–11.
- [3] Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Бабель В.Г. *Трибология на основе самоорганизации*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 245 с.
- [4] Гаркунов Д.Н., Корник П.И. *Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин*. Москва, Изд-во МСХА, 2003, с. 344.

## Модели износа для прогнозирования стойкости инструмента для горячей штамповки

© Сомкина Анна Сергеевна, Власов Андрей Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[annasomkina@mail.ru](mailto:annasomkina@mail.ru)

*Оценка износа инструмента для горячей штамповки является очень актуальной задачей, поскольку стойкость штампов оказывает значительное влияние на стоимость производственного процесса. Методом конечных элементов можно провести моделирование процессов штамповки, предсказать износ инструмента и устранить недостатки на этапе проектирования технологического процесса. Большое число исследований выполняется с целью изучения износа штампов и создания моделей износа. Усовершенствование существующих моделей, путем учета дополнительных факторов, влияющих на процесс штамповки, позволит повысить точность расчетов и снизить материальные затраты.*

**Ключевые слова:** износ, стойкость штампов, модель износа, метод конечных элементов, горячая штамповка.

Стойкость штампов — один из наиболее важных факторов, влияющих на производительность при штамповке. На потерю работоспособности инструмента при горячей штамповке оказывают влияние многие факторы, в числе которых параметры процесса (характеристики оборудования, материал заготовки, смазка, температурные условия протекания штамповки), материал и поверхностная обработка штампов. Потеря работоспособности штампов может быть классифицирована следующим образом [1]:

- внезапная поломка;
- износ;
- термомеханическая усталость;
- пластическая деформация.

Установлено, что при горячей штамповке доминирующей причиной поломки инструмента является износ (до 70 % поломок штампа в производстве) [2].

Проведено множество исследований, посвященных изучению износа, а также созданию моделей износа, предсказанию и уменьшению износа.

Большинство моделей для прогнозирования износа основаны на уравнении Арчарда, которое определяет, что износ пропорционален нагрузке и относительному расстоянию скольжения между заготовкой и поверхностью штампа, и обратно пропорционален твердости поверхности:

$$Z = K \frac{P_n s}{H},$$

где  $Z$  — износ;  $K$  — коэффициент износа;  $P_n$  — нагрузка;  $s$  — относительное расстояние скольжения между заготовкой и поверхностью штампа;  $H$  — твердость поверхности штампа.



В работе [3] для прогнозирования износа при горячем выдавливании использовано моделирование методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM. При этом базовым принято уравнение Арчарда. Основная идея состоит в том, чтобы определить условия проведения процесса на одном цикле штамповки, а затем использовать их в качестве входных данных для прогнозирования износа.

Более поздние модели износа отличаются от ранних тем, что в них учтены влияния твердости поверхности штампа на процесс износа. В обычной модели Арчарда твердость определяется как функция температуры, а тепловой эффект смягчения не рассматривается. Как известно, твердость штампов уменьшается с ростом числа операций горячей штамповки. Для учета влияния времени и температуры штамповки на твердость поверхности инструмента в работах [4–6] вводятся кривые термического умягчения.

Для всех моделей износа коэффициент  $K$  должен быть экспериментально определен. Предполагается, что значение этого коэффициента связано со свойствами материала и является постоянным для других процессов штамповки. Однако данное предположение до сих пор остается предметом дискуссии: насколько расчетный коэффициент может быть применим при других условиях процесса, включающих геометрию инструмента, режимы смазки и температурные интервалы штамповки [7].

Несмотря на некоторые недостатки используемых моделей износа, моделирование процессов штамповки с применением этих моделей позволяет предсказать износ и прогнозировать разрушение инструмента еще на стадии проектирования процесса. Дальнейшее исследование в области прогнозирования износа является очень важной задачей, решение которой приведет к повышению стойкости штампов, а, следовательно, к снижению стоимости производства.

#### Литература

- [1] Shirgaokar M. *Technology to Improve Competitiveness in Warm and Hot Forging: Increasing Die Life and Material Utilization*: PhD Dis., The Ohio State University, 2008.
- [2] Cser L., Geiger M., Lange K., Hansel M. Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming. *Proc. Instn Mech Engrs*, 1993, no 207.
- [3] Painter B., Shivpun R., Altan T. Prediction of die wear during hot-extrusion of engine valves. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, vol. 59, p. 132–143.
- [4] Kang J., Park I., Jae J., Kang S. A Study on a Die Wear Model Considering Thermal Softening: (I) Construction of the Wear Model. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 96, pp. 53–58.
- [5] Kang J., Park I., Jae J., Kang S. A Study on a Die Wear Model Considering Thermal Softening: (II) Application of the Suggested Wear Model. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 94, pp. 183–188.
- [6] Behrens B.A. Finite Element Analysis of Die Wear in Hot Forging Processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, pp. 305–308.
- [7] Groseclore A., Choi C., Gonzalez-Mendez J. L., Yelich T., Altan T. *Estimation of die stresses and wear in warm forging of steel pinion shafts: Report No. ERC/NSM-08-R-34* Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, 2009.

УДК 621.7.043

## Математическое моделирование складкообразования в процессе однопереходной вытяжки в программном комплексе AutoForm

© Ступников Вадим Владимирович, Евсюков Сергей Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[prius@mail.ru](mailto:prius@mail.ru)

*Рассмотрено математическое моделирование складкообразования в процессе однопереходной вытяжки в программном комплексе AutoForm. Приведено обоснование необходимости изучения процесса потери устойчивости (гофрообразования) при вытяжке. Представлены результаты моделирования процессов штамповки листовых деталей. Определен диапазон значений критерия складкообразования, при котором наиболее вероятно образование дефекта в виде складки.*

**Ключевые слова:** штамп, вытяжка, складкообразование, гофрообразование, потеря устойчивости, компьютерное моделирование.

В современной технике большой класс деталей, имеющих цилиндрическую форму, изготавливаются вытяжкой. Для получения детали с качественной поверхностью без дефектов в виде складок и волнистостей применяют целый ряд технологических решений, от использования смазки и прижимов, до специализированных штампов. При изменении номенклатуры изделий необходимо перепроектировать технологический процесс, что требует значительных трудозатрат на отработку новой технологии.

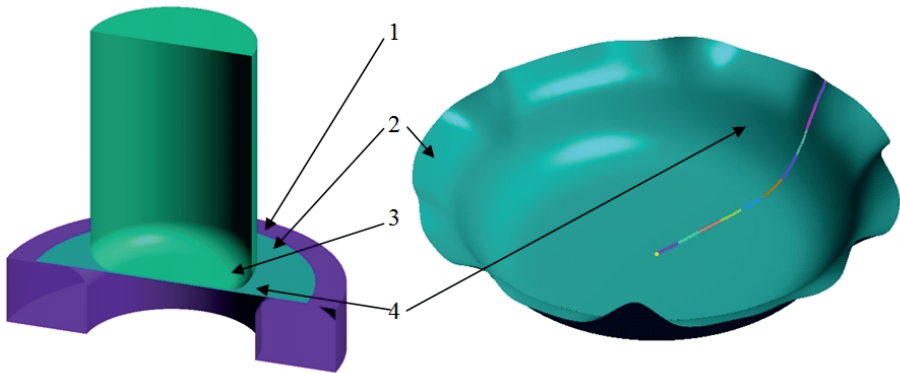
Использование комплектов специализированных программ для моделирования процессов листовой штамповки позволяет существенно интенсифицировать процесс и, следовательно, повысить производительность труда [1, 2]. Поэтому большой интерес представляет исследование потери устойчивости заготовок из анизотропного материала при вытяжке.

Теоретические исследования влияния технологических параметров и анизотропии механических свойств материала заготовки на складкообразование в первом переходе вытяжки осесимметричной детали из анизотропных материалов показывают, что данная задача комплексная и сложная в решении [3].

Пуансон, воздействуя на центральную часть заготовки, вызывает ее прогиб за счет создания изгибающего момента со стороны матрицы и пуансона. Дальнейшее опускание пуансона обуславливает появление радиальных растягивающих напряжений, достаточных для перевода фланцевой части заготовки в пластическое состояние. С этого момента начинается втягивание заготовки в матрицу с образованием боковых поверхностей вытягиваемого изделия при одновременном уменьшении диаметра заготовки. Действие радиальных растягивающих напряжений приводит к тому, что во фланце в тангенциальном (широтном) направлении возникают сжимающие напряжения. Совместное действие этих напряжений обеспечивает втягивание фланца в от-

верстие матрицы и получение изделия. Под воздействием такой схемы напряженно-деформированного состояния (НДС) с наличием максимального значения тангенциальных напряжений сжатия возможна потеря устойчивости фланцевой части заготовки и образование гофр (складок).

Напряженно-деформируемое состояние при вытяжке изображено на рис. 1. Сжато растянутая зона располагается вдоль фланца изделия 2, на свободных поверхностях 4 между кромкой матрицы 1 и пуансона 3. Образующиеся гофры мешают стабильному процессу формобразования и приводят к браку изделия. Чтобы избежать этого, используют прижимы, перетяжные ребра, а также конструктивные особенности штамповой оснастки.



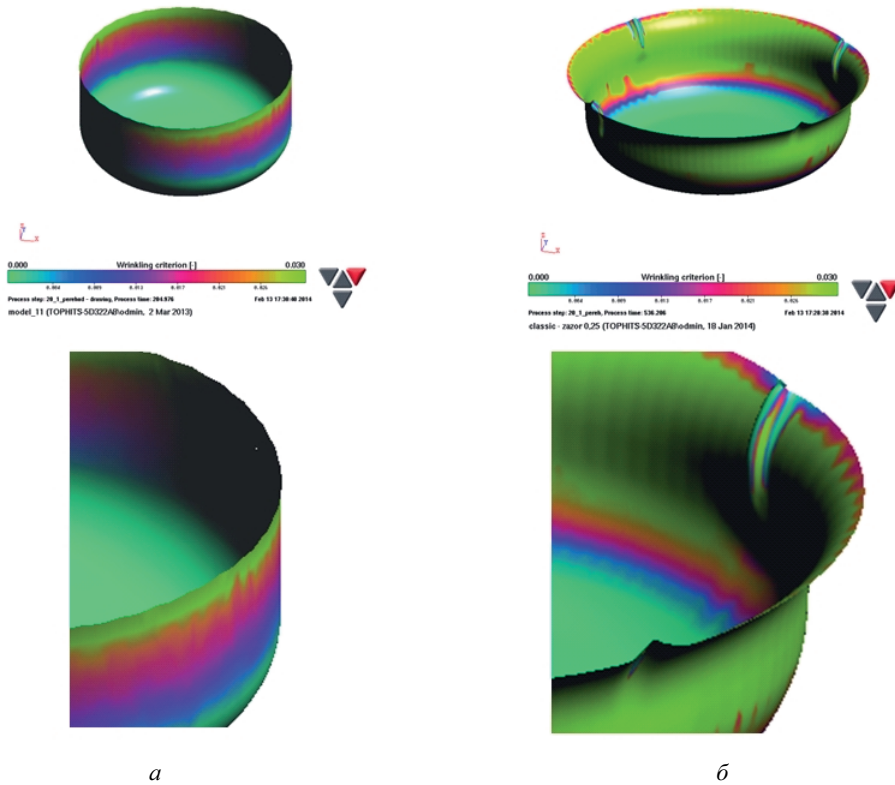
**Рис. 1.** Схема НДС при вытяжке:

1 — матрица; 2 — фланец изделия; 3 — пуансон; 4 — свободная поверхность

Исследование очага пластической деформации аналитически очень затруднительно [4, 5], поэтому в качестве инструмента для анализа был выбран метод математического моделирования. В работе проведен комплекс исследований процессов образования дефектов в виде складок, приводящих к искажению изделия и далее к разрушению, при вытяжке листовых анизотропной заготовки из круга в программном комплексе AutoForm. Цель работы — получение простого аналитического инструмента, позволяющего при помощи комплекса математического моделирования прогнозировать появление дефектов в виде складок на поверхностях деталей цилиндрической формы, получаемых методом вытяжки, без прижима в один переход.

Исследование вытяжки проведено с использованием специализированной программы для моделирования процессов штамповки листовых деталей — AutoForm, результаты представлены на рис. 2. Инструменты модели приняты абсолютно жесткими, скорость деформирования постоянна, материал заготовки АМГ6. Диаметр матрицы 102 мм, диаметр заготовки 142 мм, соответственно коэффициент вытяжки 1,4.

В процессе исследования показано, что AutoForm позволяет выявлять участки заготовки, потенциально подверженные образованию дефектов. Величину дефектов прогнозировать невозможно, однако выявлен диапазон значений критерия складкообразования, при котором наиболее вероятно образование дефекта в виде складки. Максимальное значение критерия складкообразования, представленное на рис. 3, соответствует образованию дефекта в виде складки вдоль образующей.



**Рис. 2.** Первый переход вытяжки:

*a* — толщина листа 1,1 мм без дефектов; *б* — толщина листа 0,7 мм, наблюдается складкообразование

Таким образом, варьируя различными технологическими параметрами, не допуская достижения критерием предельных значений, указанных на рис. 3 и 4, возможно исключить участки с критическим показателем критерия и стабилизации процесса, что обеспечит достижение оптимальных соотношений технологических параметров процесса формоизменения, увеличение эффективности технологического процесса и снижение массогабаритных характеристик конечного изделия, а при необходимости изменения номенклатуры изделий, в кратчайшие сроки спроектировать новый технологический процесс и подобрать новую оснастку. Рост критерия складкообразования вплоть до момента, когда складка явно видна (последний шаг) представлен на рис. 4.

В результате исследования получены данные, позволяющие прогнозировать возникновение складкообразования при различных значениях технологических параметров. Проведено варьирование различными параметрами технологического процесса, коэффициентом трения, диаметрами пуансона и матрицы, толщиной и диаметром заготовки. Получен инструмент в виде критерия складкообразования, позволяющий судить о вероятности появления дефектов в виде складок. Выявлен диапазон значений критерия складкообразования, позволяющий безопасно проводить вытяжку.

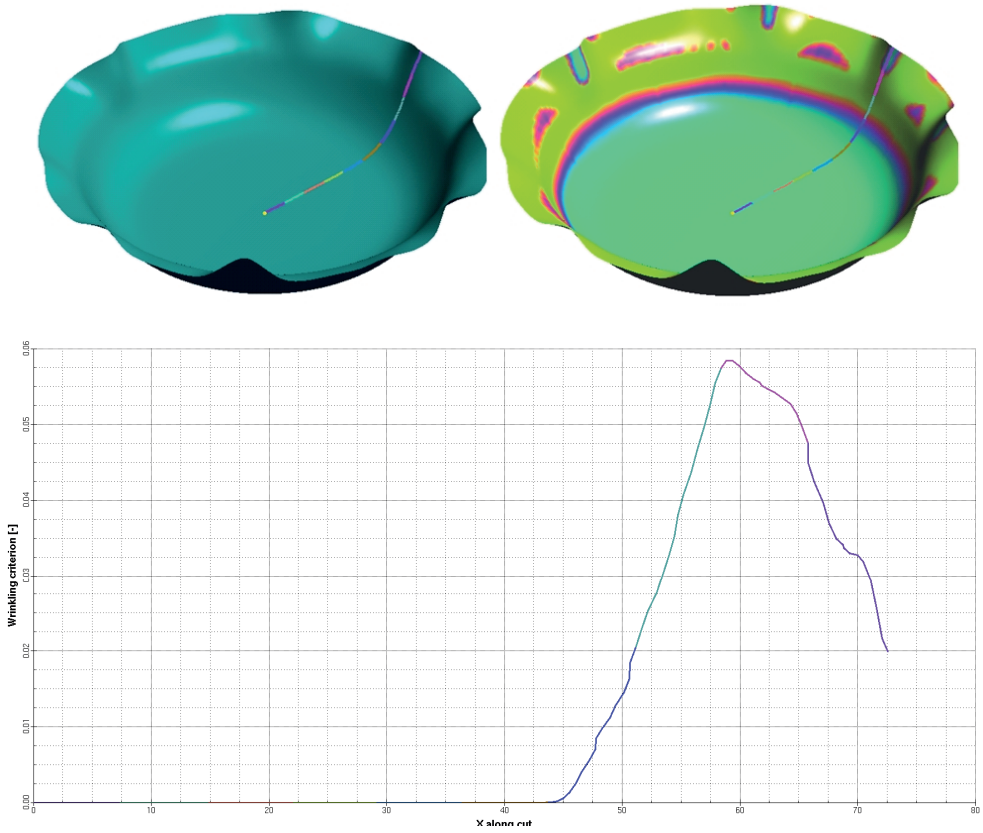


Рис. 3. Значение критерия складкообразования вдоль образующей детали при вытяжке

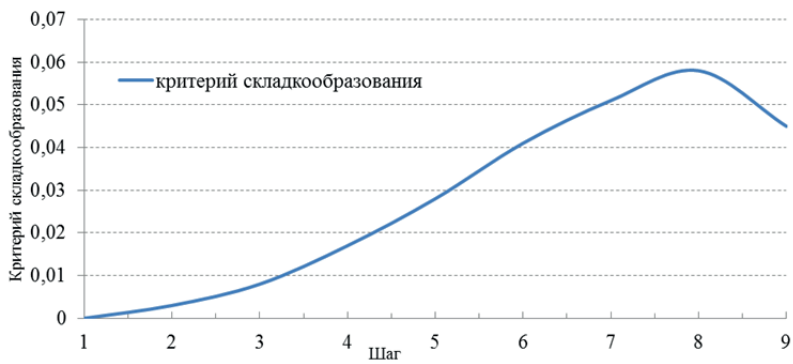


Рис. 4. Рост максимального значения критерия складкообразования при вытяжке

## Литература

- [1] Петрушина М.М., Евсюков С.А. Исследование стабильности совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки при штамповке колец с двойными стенками. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 3, DOI: 10.7463/0313.0541172 (дата обращения 01.02.2015).
- [2] Евсюков С.А., Сулейман А.А. Исследование совмещенной операции вытяжки с обжимом и раздачей. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 11, DOI: 10.7463/1113.0636247 (дата обращения 01.02.2015).
- [3] Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. Москва, Машиностроение, 1964, 365 с.
- [4] Kim J.B., Yoon J.W., Yang D. Investigation into the wrinkling behaviour of thin sheets in the cylindrical cup deep drawing process using bifurcation theory. *Int. J. Numer. Meth. In Eng*, 2003, vol. 56, pp. 1673–1705.
- [5] Hutchinson J.W., Neale .W. Wrinkling of curved thin sheet metal. *In Plastic Instability*, 1985, pp. 71–78.

УДК 621.735.34

## Изучение влияния циклического деформирования в ступенчато-клиновых бойках на характер разрушения деформируемого металла

© Толкушкин Андрей Олегович, Керимов Руслан Рахманович,  
Лежнев Сергей Николаевич

Республика Казахстан, г. Темиртау, Карагандинский государственный  
индустриальный университет

[mrgugimon@gmail.com](mailto:mrgugimon@gmail.com)

*Проведено исследование влияния циклической деформации на характер разрушения заготовок при протяжке в ступенчато-клиновых бойках. В качестве материала для заготовок использована сталь 20. По результатам эксперимента выполнен анализ влияния кантовки и количества циклов протяжки на значения ударной вязкости, а также фрактографический анализ структуры поверхности излома продеформированных образцов.*

**Ключевые слова:** *протяжка, ступенчато-клиновые бойки, циклическое деформирование, ударная вязкость.*

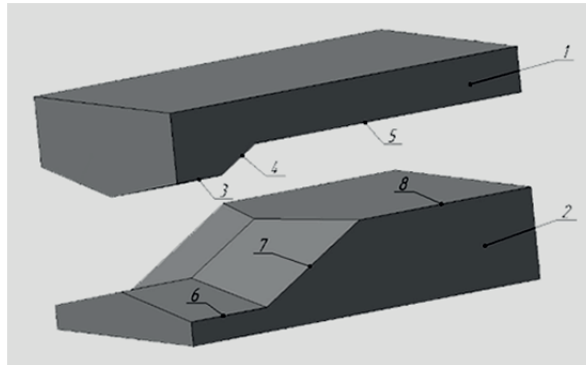
В настоящее время в мире известно множество энергосберегающих технологий, позволяющих получать высококачественные металлоизделия прокаткой, ковкой, прессованием и другими способами обработки давлением [1–3]. При ковке эта задача успешно решается при деформировании металлов в специальных инструментах, реализующих сдвиговые и знакопеременные деформации во всем объеме деформируемого металла, поскольку именно реализация интенсивной сдвиговой деформации в процессековки поковок из черных и цветных металлов обуславливает существен-

ное изменение исходной микроструктуры и повышение физико-механических свойств деформированного металла. В связи с этим производство заготовок и поковок новыми способамиковки при существенном уменьшении энергетических и трудовых затрат является экономически выгодным. Один из путей достижения поставленной цели — использование способов деформирования и инструментов, реализующих сдвиговые и знакопеременные деформации во всем объеме металла.

Ранее проводились исследования по изучению напряженно-деформированного состояния, усилий, механических свойств и микроструктуры при протяжке в ступенчато-клиновых бойках [4–6].

Основным назначением определения ударной вязкости при изгибе является оценка работоспособности материала в сложных условиях нагружения и его склонности к хрупкому разрушению [7].

Эксперимент проводился следующим образом: заготовки из стали 20 размерами  $30 \times 60 \times 250$  мм нагревались в камерной печи сопротивления до температуры началаковки  $1200^\circ\text{C}$ , затем деформировались в ступенчато-клиновых бойках с углом наклона  $30^\circ$  и с углом клина равным  $160^\circ$  (рис. 1) с различными углами кантовки.



**Рис. 1.** Ступенчато-клиновые бойки:

1 — верхний боек; 2 — нижний боек; 3 — меньшая ступень с клином верхнего бойка; 4 — наклонный участок с клином верхнего бойка; 5 — большая плоская ступень верхнего бойка; 6 — меньшая ступень с клином нижнего бойка; 7 — наклонный участок с клином нижнего бойка; 8 — большая плоская ступень нижнего бойка

Первую партию заготовок деформировали без кантовки, т. е. заготовку сразу после знакопеременного деформирования в ступенчато-клиновых бойках подавали на плоский участок этих бойков для выпрямления. После 2, 4 и 6-го циклов деформирования из деформированных заготовок были изготовлены стандартные образцы для испытания на ударную вязкость (ГОСТ 9454—60).

Вторую партию заготовок деформировали в том же инструменте, но с кантовкой на  $180^\circ$ , т. е. после каждого прохода заготовку кантовали на  $180^\circ$  и производили знакопеременное деформирование. Из деформированных заготовок были также изготовлены стандартные образцы для испытания на ударную вязкость и сжатие.

Испытания на ударную вязкость проводили с помощью маятникового копра.

Работу  $A_n$ , затраченную на деформацию и разрушение образца, определяли с точностью  $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Ударную вязкость  $a_n$  рассчитывали по формуле [7]:

$$a_n = \frac{A_n}{F}, \quad (1)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания.

Из работ [8, 9] известно, что чем больше систем скольжения дислокаций одновременно задействуются при пластическом течении металла, тем выше механические и технологические свойства материала. Максимального увеличения числа задействованных систем скольжения дислокаций можно добиться при циклическом деформировании металла в ступенчато-клиновых бойках за счет реализации знакопеременных деформаций, как в продольном, так и в поперечном направлении. Кроме того, необходимый эффект достигается быстрее, если деформировать заготовки с кантовкой на  $180^\circ$ . Так, с увеличением количества циклов деформирования заготовок в ступенчато-клиновых бойках по предлагаемым схемам ударная вязкость металла прогрессивно возрастает.

Результаты расчетных значений ударной вязкости представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетных значений ударной вязкости и накопленной деформаций

Способ деформирования	Число циклов	Среднее значение ударной вязкости, Н/мм
В ступенчато-клиновых бойках без кантовки	2	176,69
	4	191,71
	6	206,61
В ступенчато-клиновых бойках с кантовкой на $180^\circ$	2	188,03
	4	202,57
	6	212,56

По статистически обработанным результатам испытаний было определено среднестатистическое значение ударной вязкости и накопленной деформации

$\bar{X} = \sum_i^n X_i/n$  (где  $X_i$  — результат отдельного испытания,  $n$  — число испытаний) и

построен график зависимости ударной вязкости от числа циклов (рис. 2).

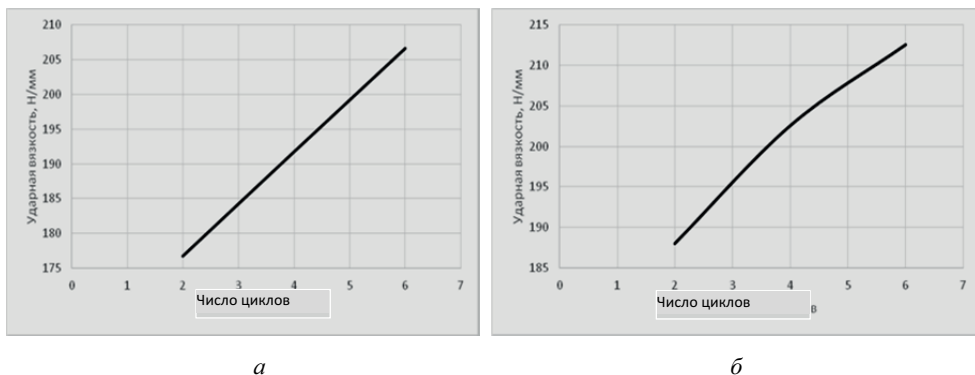
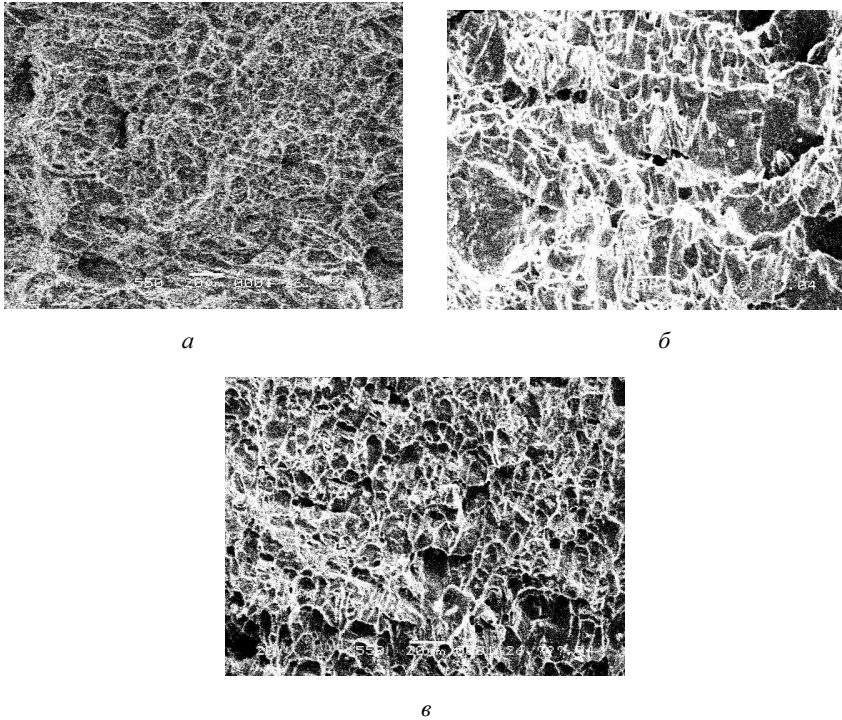


Рис. 2. График зависимости ударной вязкости от количества циклов: а — без кантовки; б — с кантовкой на  $180^\circ$



Результаты описанных выше экспериментов были подтверждены и фрактографическим исследованием поверхности разрушения, которые показали, что на начальных стадиях обработки в ступенчато-клиновых бойках (рис. 3, *а*) изломы образцов, кроме волокнистой составляющей разрушения, имеют достаточно большую долю хрупкой составляющей. По мере увеличения циклов деформирования (рис. 3, *б*) доля хрупкой составляющей уменьшается за счет повышения пластических характеристик материала [7]. Этот же эффект усиливается при деформировании образцов с кантовкой (рис. 3, *в*).



**Рис. 3.** Структура излома:  
*а* — структура излома образца после двух циклов деформирования; *б* — структура излома образца после восьми циклов деформирования без кантовки; *в* — структура излома образца после восьми циклов деформирования с кантовкой на  $180^\circ$

Фрактографическое исследование поверхности излома заготовок показало, что с увеличением количества циклов происходит повышение пластических характеристик металла с одновременным снижением хрупких.

### Литература

- [1] Lezhnev S., Volokitina I., Koinov T. Research of influence equal channel angular pressing on the microstructure of copper. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2014, vol. 49, no 6, pp. 621–630.

- [2] Lezhnev S., Naizabekov A.B., Volokitin A.V., Volokitina I.E. New combined process “pressing-drawing” and its impact on the properties of deformable aluminum wire. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 1505–1510.
- [3] Lezhnev S., Naizabekov A.B., Panin E.A., Volokitina I.E. Influence of combined process “rolling-pressing” on microstructure and mechanical properties of copper. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 1499–1505.
- [4] Лежнев С.Н., Панин Е.А., Толкушкин А.О. Разработка и компьютерное моделирование новой технологии деформирования заготовок типа плит и пластин из черных и цветных металлов и сплавов. *Сб. докладов VI Международ. конгресса «Цветные металлы и минералы — 2014»*. Красноярск, 15–19 сентября 2014 г. Красноярск, 2014, с. 1213–1221.
- [5] Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Panin E.A., Tolkushkin A.O. Simulation of the new technology of forging of blanks such as slabs and plates made of ferrous metals and alloys. *3rd International Conference on Recent Trends in Structural Materials COMAT*, Nov 19<sup>th</sup> — 21<sup>st</sup> 2014, Parkhotel Plzen, Czech Republic, EU.
- [6] Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Толкушкин А.О. Изучение влияния процесса деформирования заготовок в ступенчато-клиновых бойках на микроструктуру и механические свойства стали 20. *Сб. докл. IV Международ. науч.-практ. конф. «Инновации в материаловедении и металлургии»*. Екатеринбург, 15–18 декабря 2014 г. Екатеринбург, 2014, с. 181–184.
- [7] Богатов А.А. *Механические свойства и модели разрушения металла*. Екатеринбург, ГУО ВПО УГТУ-УПИ, 2002, 329 с.
- [8] Найзабеков А.Б. *Научные и технологические основы повышения эффективности процессовковки при знакопеременных деформациях*. Алматы, 2000, 336 с.
- [9] Тюрин В.А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов. *КШП ОМД*, 2007, № 11, с. 15–20.

УДК 620.171.2:621.7.044.3

## **Использование инверсного анализа для определения параметров реологической модели материала для расчета процессов сферхпластической формовки**

© Шитиков Андрей Андреевич, Власов Андрей Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[AA-Shitikov@yandex.ru](mailto:AA-Shitikov@yandex.ru)

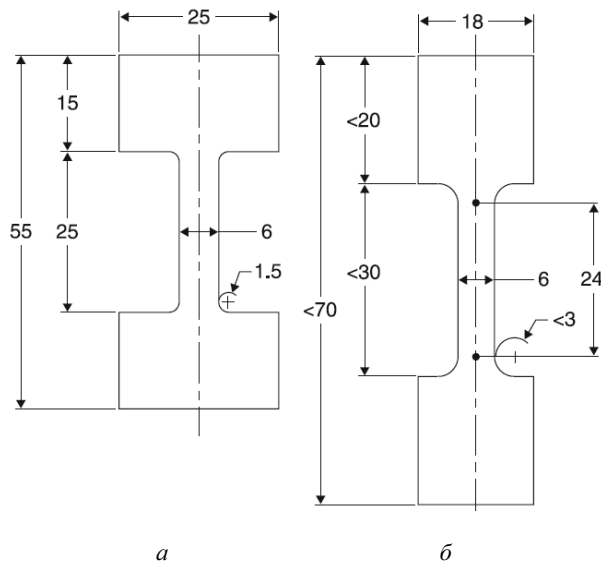
*Предложен способ определения параметров реологической модели материала в условиях сверхпластичности в широком интервале скоростей деформации, требующий небольшого объема экспериментальных исследований. Суть этого способа заключается в технологическом испытании на формовку полусферы при линейно нарастающем давлении формовки и дальнейшем подборе параметров модели путем инверсного анализа с помощью метода конечных элементов и методов многопараметрической оптимизации.*

**Ключевые слова:** *испытания материалов, реологическая модель, кривая упрочнения, сверхпластичность, инверсный анализ, многопараметрическая оптимизация.*

Для расчета и оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением в настоящее время широко используются различные программные комплексы математического моделирования на основе метода конечных элементов. Точность расчета в подобных комплексах во многом определяется полнотой и качеством вводимых исходных данных: реологической модели материала, теплофизических свойств, параметров законов трения, условий протекания процесса и т. д.

Реологическая модель отражает зависимость напряжения течения от степени и скорости деформации, а также от температуры. В программных комплексах реологическая модель задается в виде набора кривых упрочнения, каждая из которых представляет собой зависимость напряжения течения от степени деформации при постоянной температуре и скорости деформации. Также возможно задание реологической модели в виде различных аппроксимирующих выражений.

В настоящее время для построения кривых упрочнения материалов в состоянии сверхпластичности используются испытания на растяжение плоских образцов по следующим стандартам: JIS H7501, ASTM E2448, ISO 20032. Формы образцов представлены на рис. 1.

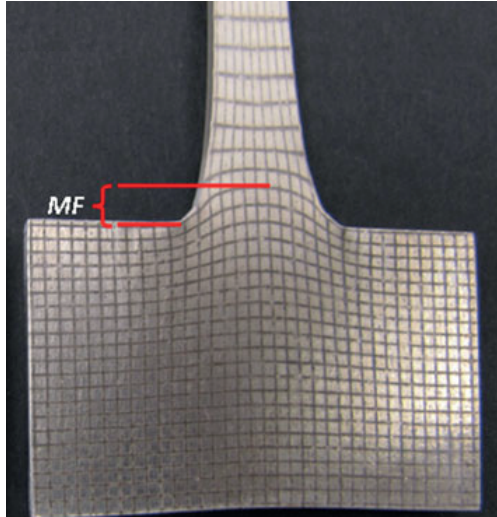


**Рис. 1.** Формы образцов для испытаний по стандартам ASTM E2448 (а) и ISO 20032 (б)

При испытании одного образца определяется только одна кривая упрочнения.

В реальных технологических процессах формовки в состоянии сверхпластичности скорость деформации может изменяться на несколько порядков (например, при выдувке купола при постоянном давлении на три порядка [1]). Для адекватного моделирования подобных процессов необходимо получить несколько кривых упрочнения при разных скоростях, что требует проведения длительных испытаний (например, растяжение образца со скоростью  $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  до степени деформации 1 занимает более 13 ч). Кроме того при испытаниях на растяжение по указанным стандартам не удастся избежать распространения очага деформации на нерабочую часть образца

(рис. 2 [2]). Это приводит к ошибкам определения удлинения образца и, как следствие, к ошибкам построения кривой упрочнения.



**Рис. 2.** Распространение очага деформации на нерабочую часть образца [2]

Подобные нелинейные эффекты можно учитывать при инверсном анализе результатов испытаний на растяжение [3], что приводит к еще большей трудоемкости определения параметров реологической модели.

В данной работе предлагается альтернативный способ определения параметров реологической модели материала в условиях сверхпластичности в широком интервале скоростей деформации. Способ заключается в технологическом испытании на формовку в условиях сверхпластичности полусферы при линейно нарастающем давлении формовки. При формовке производится запись фактического давления в полости штампа и фактического количества поданной формующей среды.

После формовки измеряют толщины полученной детали и с помощью инверсного анализа подбирают параметры в аппроксимации реологической модели материала, добиваясь совпадения фактических толщин, с толщинами, полученными при моделировании, а также фактической кривой изменения объема полости штампа с кривой изменения объема при моделировании. Подбор параметров производится итерационно методом Нелдера — Мида [4].

Для автоматизации инверсного анализа написана программа-оболочка к программному комплексу DEFORM. Метод опробован для модельного сплава ПОС 61 (61 % Sn — Pb) при определении параметров реологических моделей, содержащих от 4 до 10 параметров.

## Литература

- [1] Jovane F. An approximate analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm: theory and experiments. *Int. J. Mech. Sci.*, 1968, vol. 10, pp. 403–427.

- [2] Abu-Farha F., Nazzal M., Curtis R. Optimum specimen geometry for accurate tensile testing of superplastic metallic materials. *Experimental Mechanics*, 2011, vol. 51, pp. 903–917.
- [3] Ponthot J.-P., Kleinermann J.-P. A cascade optimization methodology for automatic parameter identification and shape/process optimization in metal forming simulation. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 2006, no 195, pp. 5472–5508.
- [4] Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 1965, vol. 7, pp. 308–313.

УДК 53.084.823

## Способы получения конических переходников

© Яковлева Евгения Олеговна, Евсюков Сергей Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[хрумка@inbox.ru](mailto:хрумка@inbox.ru)

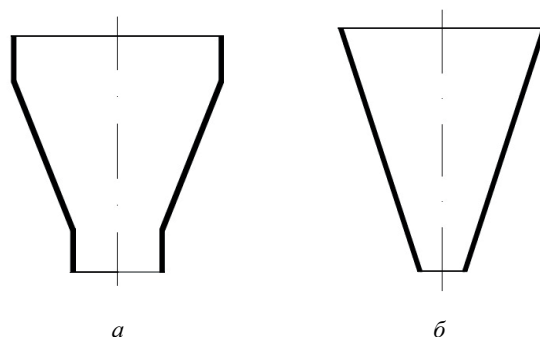
*Рассмотрены различные способы получения конических переходников. Проведены исследование и анализ данных способов. Подробно рассмотрено совмещение операций листовой штамповки в одном штамповом переходе, а также рассмотрены схемы напряженного состояния при совмещении операций раздачи и обжима при деформировании трубной заготовки и операций раздачи, обжима и вытяжки при деформировании листовой заготовки. Показаны основные недостатки, преимущества и возможности различных комбинаций.*

**Ключевые слова:** конические переходники, листовая штамповка, совмещение операций.

В настоящее время перед машиностроением стоит задача повышения эффективности производства и качества получаемых изделий. В различных отраслях промышленности широкое распространение получили осесимметричные изделия, изготавливаемые методами обработки давлением (например, конические переходники для соединения трубопроводов с цилиндрическими частями в местах соединения и без них, рис. 1), к которым предъявляются высокие требования по качеству, точности геометрических размеров, чистоте поверхности, уровню механических свойств. Эти требования по экономическим причинам следует выполнять при минимальном количестве технологических операций.

Вырезка по шаблону с последующей гибкой и сваркой по образующей, многопереходная вытяжка с последующим обжимом и раздачей — способы, характеризующиеся большим отходом металла, вторичное использование которого затруднительно [1].

Для получения высокого коэффициента формоизменения применяются несколько способов интенсификации: разупрочнение заготовок за счет пропуска электрического тока, дифференциальный нагрев, применение эффективных смазок, наложение ультразвуковых колебаний и т. д. Однако все эти способы сложно осуществить.



**Рис. 1.** Конические переходники:  
*a* — с цилиндрической частью; *б* — без цилиндрической части

Наиболее простые, часто используемые и эффективные способы получения конических переходников — это применение совмещенных операций в холодном состоянии.

Совмещение нескольких различных операций в одном штамповом переходе позволяет решить следующие задачи:

- повысить предельное формоизменение;
- расширить технологические возможности штамповки путем уменьшения напряжений и деформаций, не превышающих предельные;
- улучшить качество получаемой детали;
- уменьшить номенклатуру штамповой оснастки и количество оборудования, необходимого для изготовления детали;
- повысить производительность труда за счет сокращения подготовительно-заключительного, вспомогательного и машинного времени.

Значительной экономией металла при изготовлении переходников можно добиться за счет процесса совмещения операций обжима и раздачи для трубной заготовки [2].

При совмещении в одной операции обжима и раздачи заготовку одновременно деформируют в двух отдельных участках (в двух очагах деформации): в одном происходит увеличение диаметра заготовки — раздача, в другом — уменьшение диаметра заготовки — обжим. В этих двух очагах деформации (рис. 2), а также в недеформируемом участке заготовки, находящемся между ними, действуют сжимающие меридиональные напряжения. При совпадении очагов деформации обжима и раздачи, в которых действуют окружные соответственно сжимающие и растягивающие напряжения, граница очагов деформации проходит в сечении, где окружные напряжения равны нулю.

Такая схема деформирования позволяет сократить количество штамповых переходов и получить минимальный отход материала.

Существует способ получения переходников совмещением операций вытяжки, обжима и раздачи в одном штамповом переходе из предварительно вытянутого стаканчика с последующей отрезкой дна (рис. 3) [3].

В операции совмещения при обжиме характерна сжимающая схема напряжений (рис. 4), при которой наблюдается утолщение стенки. При раздаче реализуется сжато-растянутая схема. Наличие сжимающих напряжений при обжиме приводит к уменьшению растягивающих напряжений при вытяжке, что исключает образование трещин.

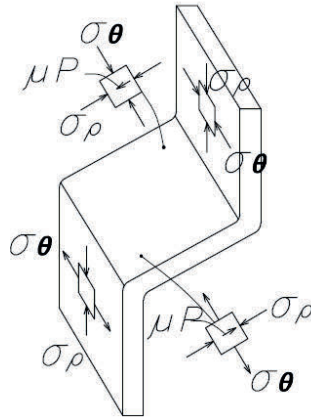


Рис. 2. Схема напряжений при совмещении раздачи и обжима

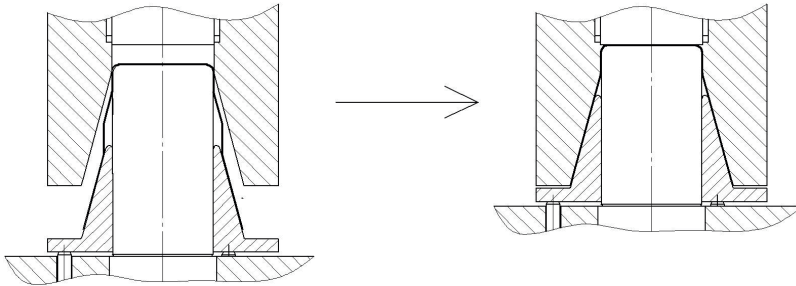


Рис. 3. Схема совмещения операций вытяжки, обжима и раздачи

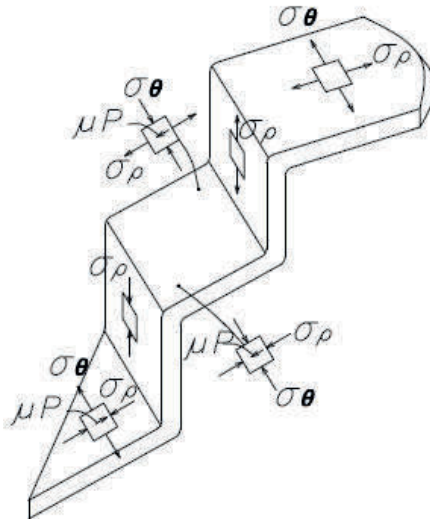


Рис. 4. Схема напряжений при совмещении вытяжки, обжима и раздачи

В данном процессе образуется три очага деформации. При этом очаг деформации раздачи отделен трубчатой частью от очагов деформации обжима и вытяжки. Очаг деформации обжима непосредственно переходит в очаг деформации вытяжки. В каждом очаге деформации возникают, характерные для отдельной элементарной операции, напряжения: для раздачи — растягивающие окружные и сжимающие меридиональные, для обжима — сжимающие окружные и меридиональные, для вытяжки — сжимающие окружные и растягивающие меридиональные.

Изготовление детали данным способом позволяет значительно увеличить коэффициент предельного формоизменения, однако характеризуется большим отходом материала, поэтому можно сделать вывод о необходимости в разработке нового технологического процесса, позволяющего получить значительный коэффициент формоизменения при небольшом отходе материала.

### Литература

- [1] Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. *Технология и автоматизация листовой штамповки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, 479 с.
- [2] Попов Е.А. *Использование трубной заготовки вместо листовой // Новые процессы обработки металлов давлением*. Москва, 1962, с. 144–150.
- [3] Евсюков С.А., Сулейман А. А. Исследование совмещенной операции вытяжки с обжимом и раздачей. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2013, № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/636247.html> (дата обращения 11.06.2015).



УДК 621.791

### Применение сварки трением с перемешиванием для получения неразъемных соединений алюминиевых сплавов

© Баранов Андрей Александрович, Люшинский Анатолий Владимирович

Россия, г. Раменское, АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»

[rpkb@rpkb.ru](mailto:rpkb@rpkb.ru)

*Рассмотрены особенности формирования соединения алюминиевых сплавов Д16 и АМгб методом сварки трением с перемешиванием. Приведены основные параметры режимов сварки: скорости вращения инструмента и скорости перемещения относительно свариваемых деталей. Исследованы микроструктуры соединений и их свойства. Спроектированы технологическая оснастка и инструмент для выполнения работ. Показаны изделия, перспективные с точки зрения применения разработанной технологии.*

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, рабочий инструмент, достоинства СТП.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) получила широкое распространение при создании неразъемных соединений деталей из алюминиевых, медных и других сплавов [1]. Ее используют как альтернативу сварке неплавящимся W-электродом для соединения сплавов, относящихся к категории несвариваемых или ограниченно свариваемых сваркой плавлением (например, сварка алюминиевых сплавов Д16 и АК4) [2], или в конструкциях, в которые нежелательно вводить присадочный материал в сварное соединение (силовые элементы конструкций, фюзеляж, шпангоуты). Основными достоинствами данного способа сварки являются [3]:

**Металлургические и производственные:**

- сварка проходит в твердой фазе;
- низкие деформации свариваемых изделий;
- высокая размерная стабильность и повторяемость процесса;
- не наблюдается «выгорание» легирующих элементов;

- высокие прочностные свойства сварного шва;
- мелкозернистая рекристаллизованная структура сварного шва;
- отсутствие трещин;
- высокая скорость сварки;
- не требуется дополнительная термическая и механическая обработка шва.

**2. Экологические:**

- не требуются защитные газовые среды;
- не требуется флюсов;
- отсутствует выделение вредных веществ.

**Энергетические и экономические:**

- низкое потребление энергии (2,5 % от энергии, потребляемой при лазерной сварке, 10 % от энергии, потребляемой при дуговой сварке);
- снижение веса конструкций;
- не требуется присадочных материалов;
- уменьшение производственного цикла на 50...75 % по сравнению с обычными способами сварки, например дуговой.

В ОАО «РПКБ» проводятся исследования по возможности получения неразъемного соединения из сплавов АМг6 и Д16 различной толщины. Для этого используется оборудование в виде модернизированного фрезерного станка TOS FA3V (рис. 1) и специально спроектированная оснастка, обеспечивающая возможность сборки-сварки образцов.

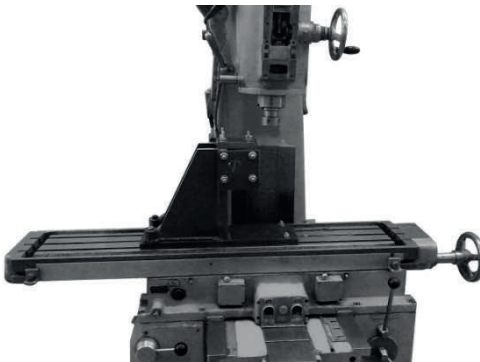


Рис. 1. Фрезерный станок TOS FA3V с оснасткой



Рис. 2. Инструмент для сварки трением с перемешиванием

Инструмент для СТП (рис. 2) спроектирован и изготовлен из быстрорежущей стали, в виде сплошного цилиндра, на рабочем торце которого выполнены опорный бурт с винтовой канавкой и рабочий стержень в форме усеченного конуса с винтовыми канавками и сложной спиралью - для лучшего перемешивания и течения пластифицированного металла на его боковой поверхности. Диаметр опорного бурта и геометрия рабочего стержня зависят от толщин, типа свариваемых деталей. Данный инструмент запатентован.

В процессе сварки инструмент отклонен от нормали к свариваемым заготовкам на угол 1...5° таким образом, что вершина угла указывает на направление сварки, скорость вращения инструмента 355...710 об/мин, скорость подачи инструмента 40...160 мм/мин. Скорость вращения и подача инструмента зависят от толщин и типа материала свариваемых деталей.

На изготовленных из сварных образцов шлифах по стандартной методике была отчетливо видна ярко выраженная луковичная структура сварного шва. На микрошлифах (рис. 3, 4) выявлены зоны: зона ультрамелкодисперсной структуры в сварном шве, тонкая полоса зоны перемешивания по границе сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ).

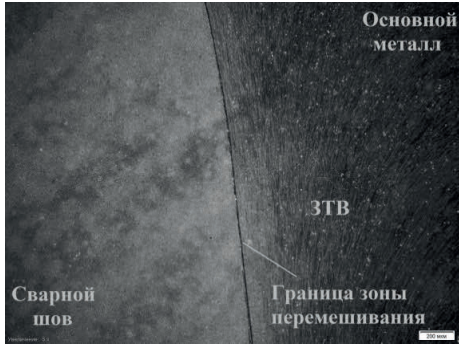


Рис. 3. Структура сварного соединения сплава Д16

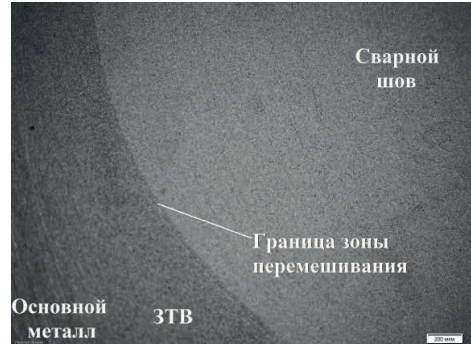


Рис. 4. Структура сварного соединения сплава АМг6

По результатам измерений твердости и прочности металла шва сварных образцов из АМг6 твердость составила 70...78 HV, предел прочности 225...250 МПа, для основного металла 60...68 HV и предел прочности 195...220 МПа.

У образцов из сплава Д16АТ наблюдалось разупрочнение металла сварного шва: твердость 82...90 HV, предел прочности 260...285 МПа, для основного металла твердость 88...97 HV, предел прочности 280...310 МПа. Падение твердости и прочности составило 7...8 %. После термической обработки значения прочности и твердости сварных образцов приблизились к значениям основного металла. При сварке сплава Д16АМ значения прочности и твердости металла сварного шва находились на уровне основного металла.

На ОАО «РПКБ» производится внедрение технологии сварки трением с перемешиванием в качестве альтернативы технологии фрезерования из монолита при производстве изделий, что позволит повысить коэффициент использования материала.

По итогам исследований можно сделать вывод о возможности применения технологии сварки трением с перемешиванием для изготовления деталей из алюминиевых сплавов, в частности, как альтернативный способ для аргодуговой сварки. Это приводит к сокращению времени производственного процесса, затрат на процесс сварки и средства индивидуальной защиты работника, к повышению качества сварного соединения.

### Литература

- [1] Люшинский А.В. *Современные технологии сварки. Инженерно-физические основы.* Москва, Интеллект, 2013, 240 с.
- [2] Волченко В.Н. *Сварка и свариваемость: в 3 т. Т.1. Свариваемость материалов. Справочное издание /* Под ред. Э.Л. Макарова. Москва, Металлургия, 1991, 528 с.
- [3] Бойцов А.Г., Качко В.В., Курицын Д.Н. Сварка трением перемешиванием. *РИТМ*, 2013, № 10 (88), с. 38–44.

## Методы контроля качества сварных соединений полупроводниковых изделий

© Бокарев Дмитрий Игоревич

Россия, г. Воронеж, Воронежский государственный технический университет

[dmi-bokarev@yandex.ru](mailto:dmi-bokarev@yandex.ru)

*Рассмотрены способы неразрушающего и разрушающего контроля качества (прочности) сварных соединений внутренних выводов полупроводниковых изделий. Технические средства и схемы испытаний, методика обработки и анализ качества микросоединений индивидуальны и зависят от конструктивных особенностей полупроводниковых приборов и требований, предъявляемым в них. При анализе причин отказов какого-либо прибора сначала используют все возможные методы испытаний без разрушения, а затем уже применяют способы контроля с разрушением.*

**Ключевые слова:** контроль качества, сварное соединение, полупроводниковые изделия, критерии оценки, надежность

Для отраслей промышленности, занимающихся изготовлением полупроводниковых изделий (ППИ), одним из наиболее важных вопросов является обеспечение высокого качества и надежности проволочного монтажа, так как в настоящее время от 35 до 60 % всех отказов приборов связано с низким качеством присоединения и дефектами внутренних выводов. Поэтому при разработках технологических процессов и оборудования для монтажа внутренних выводов очень важно в зависимости от применяемого метода сборки правильно выбрать необходимые методы управления процессом микросварки и контроля полученных соединений, причем как на стадии отработки технологии, так при приемке готовых приборов и оценке их надежности [1].

Для быстрого и своевременного обнаружения отказов и их устранения необходимо четко знать типы и причины отказов в ППИ, а также методы их обнаружения. Правильное определение типов и причин отказов позволяет своевременно ввести изменения в технологический процесс изготовления ППИ, полностью устранить отказы или снизить их интенсивность в данном ППИ. В случае невозможности устранения отказов целесообразно изменить технологический процесс или конструкцию прибора [2].

В настоящее время в технологии производства ППИ единые критерии оценки качества микросоединений пока отсутствуют. В каждом конкретном случае выбирают свои технические средства и схемы испытаний, методика обработки и анализ качества микросоединений [1].

К числу критериев качества проволочных соединений, выработанных практикой, относятся:

- размеры соединения (степень деформации привариваемого участка проволоки, высота и форма петли, значение смещения места сварки от центра контактной площадки), контролируемые визуально;
- механическая прочность соединения, оцениваемая по результатам разрушающих и неразрушающих видов испытаний;

- характер обрыва соединения при контроле разрушающим методом;
- устойчивость проволочных соединений к воздействию механических, температурных нагрузок при сборке приборов, их испытаниях и эксплуатации, оцениваемая по изменению механической прочности или контактного сопротивления [3].

При контроле прочности микросоединений статическими и динамическими испытаниями необходимо учитывать расположение контактных площадок на разных уровнях. Установлено [4], что при испытаниях на растяжение важную роль играет угол отрыва проволочной перемычки, так как при малых углах измеренная прочность сварного соединения оказывается в несколько раз меньше действительного значения.

Многообразие методов контроля подразделяется на разрушающие и неразрушающие [5, 6]. К *неразрушающим* методам относятся: визуальный контроль под микроскопом; оценка электрических параметров контактного соединения (сопротивления, емкости, спектра шума); контроль ультразвуковым резонансным методом; контроль по тепловым параметрам; контроль по минимально заданному усилию на отрыв; обдув струей газа под давлением; рентгеновский контроль; электромагнитное воздействие [7, 8–12].

*Визуальный контроль* качества сварных соединений в настоящее время остается одним из основных методов 100 %-ного контроля сформированных сварных соединений. В качестве основного критерия в данном случае используют величину и стабильность деформации присоединенной проволоки. Стабильность деформации проволоки после сварки считают показателем точности поддержания режимов и воспроизведения условий процесса сварки, т. е. стабильности прочности и других характеристик полученных соединений. Также определяют плохое совмещение проволоки с контактными площадками кристалла или корпуса, чрезмерное натяжение или провисание проволоки. Деформация проводника определяется по формуле

$$\varepsilon = 1 - 0,8 \frac{d_{\text{пр}}}{B_{\text{деф}}} 100 \%,$$

где  $d_{\text{пр}}$  — диаметр проводника;  $B_{\text{деф}}$  — ширина деформированной зоны проводника в месте сварки.

В [13] рассмотрена возможность контроля качества соединений по *топографии* поверхности сварного соединения. Для исследования формы сварного соединения (отношение диаметра привариваемой проволоки к минимальной высоте ее деформированной части) необходимо использование растрового электронного микроскопа.

Сварные соединения при пропускании через них электрического тока характеризуются рядом *электрических параметров*: омическим сопротивлением, емкостью, спектром шума. Контактное электросопротивление сформированного сварного соединения коррелируется с прочностью и воспроизводимостью качества соединений, поэтому измерение электросопротивления или падения напряжения дает возможность контролировать качество сварного соединения.

Контроль качества *ультразвуковым методом* основан на свойстве электрического импеданса изменяться в зависимости от условий прохождения ультразвуковых колебаний в исследуемом сварном соединении. Известны контактный и бесконтактный способы контроля данным методом.

*Контроль по тепловым параметрам* зоны соединения [8] основан на том, что соединения ППИ при прохождении по ним электрического тока нагреваются. Температура нагрева зависит от сопротивления, на которое влияет качество соединения

проволоки с пленочной металлизацией. Поэтому знание реальной картины теплового поля в контактах позволяет судить о качестве соединений.

Наиболее распространенным способом контроля качества по тепловым параметрам зоны соединения является *визуализация тепловых полей*. Современные методы визуализации тепловых изображений можно подразделить на два класса: 1) одновременное наблюдение теплового изображения всех соединяемых элементов; 2) последовательное наблюдение теплового изображения всех соединяемых элементов.

Следует отметить, что методы контроля соединений по тепловым параметрам являются весьма сложными и трудоемкими. Они могут применяться в лабораторных исследованиях сварных контактов, полученных различными способами монтажа.

При контроле прочности сварных соединений *разрушающим* методом проводят:

- *механические испытания* на сдвиг (срез) и отрыв (под углом 30, 45, 90 и 180° к поверхности подложки);
- *микроскопические исследования* на шлифах с применением обычных металлографических или электронных микроскопов (при этом выявляются плохая адгезия напыленных пленок и степень их растворения, пустоты, непровары, наличие хрупких интерметаллидов, микротрещины, форма и размеры сварного соединения);
- *химический анализ* (как обычный, так и с помощью электронного микронзонда).

Методы контроля прочности сформированных сварных соединений основаны на приложении механической силы к выводу или перемычке, соединяющей две сварные точки. При этом известны различные способы приложения силы: механическое натяжение, обдув струей газа, воздействие линейных ускорений, центробежная сила, электромагнитный метод.

Наиболее распространенным является метод контроля прочности соединений механическим натяжением проволоки. Для его реализации требуется простое технологическое оборудование; кроме того, применение метода позволяет получить количественную оценку прочности. Суть метода состоит в том, что к проволочному выводу или перемычке прикладывается возрастающее механическое усилие до тех пор, пока не будет достигнуто заданное усилие натяжения или пока не произойдет разрушение соединения или проволочного вывода. При испытаниях на отрыв оцениваются физические свойства соединений и их чувствительность к надрыву. При испытаниях на срез в первую очередь оценивается степень снижения прочности за счет уменьшения сечения проводника в месте сварки. Однако даже при этой схеме испытания разрушение может произойти по сварному соединению при малой площади сварной точки или плохом сцеплении проводника с пленкой. Обычно принято считать, что прочность соединения на срез должна быть не менее 70 % прочности привариваемого проводника на растяжение при условии разрушения его вблизи сварной точки.

При контроле прочности сварных соединений в ППИ испытаниям, как правило, подвергают не отдельное сварное соединение, а проволочную перемычку, соединяющую два сварных соединения.

Результаты испытаний на механическую прочность тесно связаны с формой петли соединения, что необходимо учитывать при автоматизации сварки [14–16]. Этот факт вытекает из анализа схемы нагружения соединения вертикально действующей силой, приложенной к крючку-захвату при испытании разрушающим способом. Однако фактические усилия, развиваемые в проволоке, а следовательно, и результаты испытаний зависят от длины соединения и высоты петли. Более подробно определение фактических усилий, действующих на каждое сварное соединение при неразрушающем контроле, рассмотрено в работе [1].

Промежуточное положение занимают *испытания ППИ на надежность*: испытания на удар и вибрацию, климатические испытания, испытания на термоудары, испытания на старение, длительные электрические испытания до первого отказа и др.

При анализе причин отказов какого-либо прибора сначала используют все возможные методы испытаний без разрушения, а затем уже применяют способы контроля с разрушением [2].

### Литература

- [1] Бокарев Д.И., Горлов М.И., Зенин В.В. Контроль прочности микросоединений в изделиях электронной техники. *Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах: Межвуз. сб. науч. тр.* Воронеж, ВГТУ, 2001, с. 140–150.
- [2] Назаров Г.В., Гревцев Н.В. *Сварка и пайка в микроэлектронике*. Москва, Сов. радио, 1970, 192 с.
- [3] Чернышев А.А., Голубенко Р.А. Автоматизация сварки микропроволокой при сборке интегральных схем. *Зарубежная электронная техника*, 1986, № 2, с. 32–61.
- [4] Кулешов В.Т., Мистейко Я.Н. Неразрушающий контроль качества микросварных соединений. *Электронная промышленность*, 1974, вып. 106 с. 26.
- [5] Горлов М.И. *Контроль качества изделий полупроводниковой электроники: учеб. пособие*. Воронеж, 1998, 144 с.
- [6] Дубовой Н.Д., Осокин В.И., Очков А.С. и др. *Измерения и контроль в микроэлектронике*. Москва, 1984, 267 с.
- [7] Балашов, Ю.С., Зенин В.В., Ю.Е. Сегал. *Сборочные операции и их контроль в микроэлектронике: учеб. пособие*. Воронеж, 1999, 160 с.
- [8] Зенин В.В., Колычев А.И., Худяков А.Н. *Контроль качества микросоединений в изделиях электронной техники: обзор*. Москва, 1986, № 54, 52 с.
- [9] Кулешов, В.Т., Мистейко Я.Н. Неразрушающий контроль качества микросварных соединений. *Электронная промышленность*, 1974, вып. 10, с. 26.
- [10] Горлов М.И., Готовцев И.Я., Грищенко В.Т. и др. Методы неразрушающего контроля качества соединений внутренних выводов полупроводниковых приборов и интегральных схем. Электромагнитный метод контроля качества сварных соединений. *Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, метрология, стандартизация*, 1979, вып. 3, с. 11–24.
- [11] Бердичевский Б.Е., Дубицкий Л.Г., Сушинцев Г.М., Агеев А.П. *Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры*. Москва, 1976, 296 с.
- [12] Беляев В.Н., Бокарев Д.И., Горлов М.И., Зенин В.В., Сегал Ю.Е., Фоменко Ю.Л. *Установка для контроля прочности микросоединений полупроводниковых изделий*. Положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение по заявке № 2000104214/28 от 18.02.2000.
- [13] Грачев А.А., Денисюк В.А. Применение растрового электронного микроскопа для оценки качества соединений проводник-пленка, выполненных ультразвуковой сваркой. *Автоматическая сварка*, 1975, № 9, с. 28–29.
- [14] Осенков В.Н., Зенин В.В., Ковшиков В.И. Влияние геометрической нестабильности элементов конструкции микросоединений на прочность контактов при проволочном. *Прогрессивные способы микросварки и микропайки в радиоэлектронике и приборостроении: мат. семинара*. Москва, 1982, С. 14–18.
- [15] Старкин В.И., Валов А.М. Контроль качества микросварных соединений. *Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование*, 1979, вып. 5, с. 52–59.
- [16] Дудник А.И. Статистический анализ прочности термокомпрессионных межсоединений. *Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование*, 1981, вып. 4, с. 53–67.

## Опыт применения современного оборудования для пайки в среде водорода узлов электровакуумных приборов

© Вашин Сергей Александрович, Корепин Геннадий Федосеевич

Россия, Московская обл., г. Фрязино, ОАО «НПП “Исток” им. Шокина»

[axe-vashin0@mail.ru](mailto:axe-vashin0@mail.ru)

*Представлены практические результаты применения современного оборудования «MOV 342 H<sub>2</sub>» для получения вакуумноплотных паяных соединений узлов электровакуумных приборов (ЭВП). Проведено сравнение данной печи с отечественным оборудованием «Электропечь ОКБ 8085». Показано, что качество пайки в среде водорода при использовании управления от ПК мало зависит от оператора и определяется разработанной программой пайки конкретного узла.*

**Ключевые слова:** вакуумноплотное соединение, водородная печь «MOV 342 H<sub>2</sub>», ЭВП.

Пайка в среде водорода много лет используется в электронной промышленности для получения вакуумноплотных соединений [1, 3]. Эта технология давно себя зарекомендовала для получения неразъемных соединений в ЭВП. Цель данной работы — показать технологические возможности оборудования «MOV 342 H<sub>2</sub>» для пайки в защитной среде водорода и поделиться опытом его применения для узлов ЭВП. Сравнить эту печь с отечественным прибором «Электропечь ОКБ 8085» применяемым для пайки в настоящее время.

Пайка в среде водорода с использованием ручного управления технологическим процессом имеет основной недостаток: качество выполнения процесса напрямую зависит от квалификации оператора и его индивидуальных особенностей [1]. Впервые в вакуумном приборостроении была внедрена печь «MOV 342 H<sub>2</sub>» немецкой фирмы «PVATEPlaAG» (рис. 1), управляемая от ПК и осуществляющая нагрев узлов по программе. Особенностью работы во время нагрева данного оборудования является то, что до 650 °С нагрев идет по термопарам, встроенным в печь рядом с нагревателями, а после того, как на узле температура выравнивается и достигает 620...650 °С, происходит переключение на термопары, контролирующие температуру на узле. Кроме того, имеется возможность контроля температуры четырьмя термопарами, из них две термопары являются управляющими, что дает возможность выравнивать температуру в двух частях нагреваемого узла или узлов. Основные технические и технологические параметры данной печи приведены ниже.

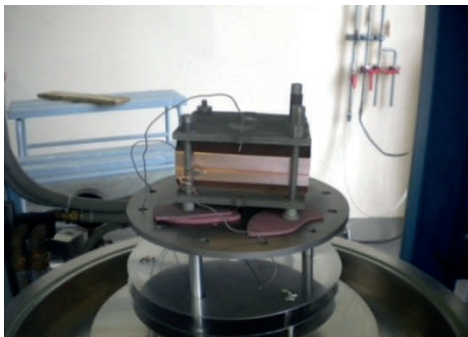
Мощность, кВт .....	94
Размеры рабочей зоны колпака, мм .....	Ø280;500
Предельное давление, мбар, не более .....	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Контроль температуры (число термопар) .....	4
Управление нагревом .....	Автоматическое
Равномерность прогрева по объему, °С .....	±5
Максимальная температура нагрева, °С .....	1300
Точность поддержания температуры, °С .....	±1



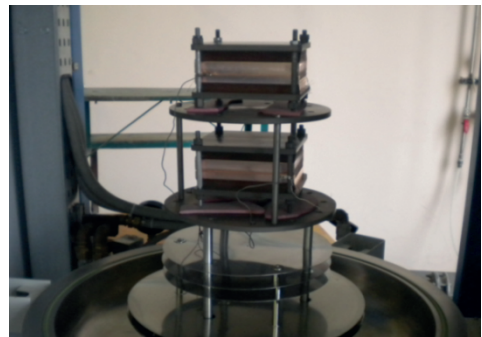


Рис. 1. Водородная печь «MOV 342 H<sub>2</sub>» фирмы «PVATePlaAG»

Используя преимущества печи «MOV 342 H<sub>2</sub>», удалось разработать и внедрить технологию пайки заготовок коллекторов узлов ЭВП (рис. 2, *а*), помимо этого с помощью оправки произвести пайку двух коллекторов за один цикл процесса (рис. 2, *б*). В данном узле использовался припой ПЗлМ-35В (температура плавления припоя около  $T_{пл} = 1020$  °С). Как показывал опыт, для получения вакуумно-плотного и прочного соединения необходима выдержка узла в печи 3 мин при температуре 1040 °С (контроль температуры осуществлялся на внешней поверхности узла в зоне припоя).



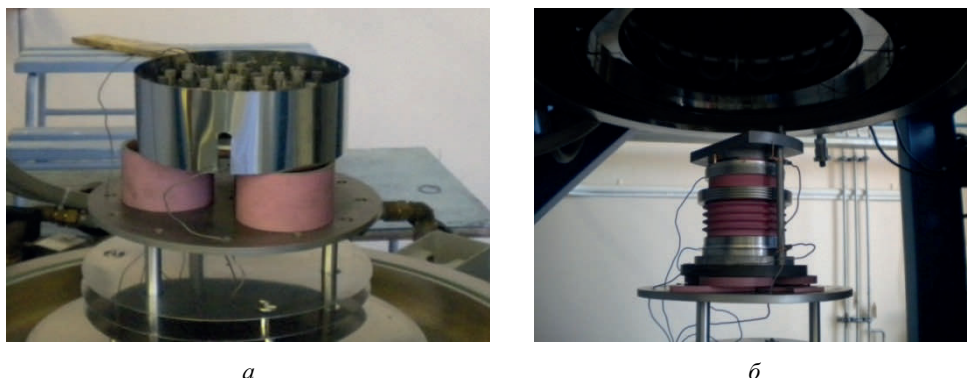
*а*



*б*

Рис. 2. Пайка заготовок коллекторов узлов ЭВП

Задача по пайке корпусов устройств антенных и изоляторов (рис. 3), а также их реставрация была решена с помощью печи «MOV 342 H<sub>2</sub>». При разработке этих технологий использовали плавный ступенчатый подъем температуры (не более 4...8 °С/мин) и медленное охлаждение (не более 2...8 °С/мин), что достигалось программным управлением от ПК. Так как скорость охлаждения паяного соединения в твердом состоянии определяет его окончательную структуру, величину и распределение внутренних напряжений [2].



**Рис. 3.** Пайка узлов ЭВП:  
*а* — антенное устройство; *б* — изолятор

Основной проблемой пайки изоляторов стала трудность расплавления припоя, находящегося внутри самого узла. Кроме того, этот припой (материал ПСрМПд-68-27-5В, температура плавления 810 °С) представлял собой проволоку толщиной 1 мм, а наружный припой — 0,8 мм. Для расплавления внутреннего припоя пришлось повысить температуру узла до 850 °С (по температуре верхнего шва); при этом скорость выхода на рабочую температуру пайки узла составляла 11...14 °С/мин; длительность выдержки при рабочей температуре пайки — 1,5...2 мин.

Пайка устройств антенных имела некоторые сложности, так как к данному узлу предъявляются высокие требования к плоскостности поверхностей после пайки (0,05 мм). Данная технология отработывалась следующим образом:

- 1) управляющие термопары устанавливались в отверстия (глубина отверстий 8 мм) оправки;
- 2) скорость выхода на рабочую температуру пайки узла составляла 6 °С/мин;
- 3) длительность выдержки при рабочей температуре пайки (830 °С, показания по термопарам оправки) составляла 6 минут;
- 4) осуществлялся быстрый выход из зоны пайки (нагреватели выключены до температуры 790 °С);
- 5) обеспечивалось плавное остывание (ниже 8 °С/мин) при температуре от 790 до 500 °С;
- 6) устанавливался режим пайки, учитывающий тепловую инерцию узла, применяемой оснастки, особенности конструкции устройств антенных.

В ходе работы были выявлены преимущества и недостатки печи «MOV 342 H<sub>2</sub>» (см. таблицу). Несмотря на небольшие размеры рабочей зоны этой водородной печи,

ее можно использовать для большинства узлов, которые паяются в настоящее время на отечественном оборудовании («Электропечь ОКБ 8085», мощность 108 кВт).

**Преимущества и недостатки печи «MOV 342 H2» по сравнению с печью «Электропечь ОКБ 8085»**

Параметр	«MOV 342 H2»	«Электропечь ОКБ 8085»
Визуальный контроль	Отсутствует	Имеется
Контроль нагрева в нескольких точка	Имеется	Отсутствует
Программное управление нагревом	Имеется	Отсутствует
Равномерность нагрева печи по рабочему объему, °С	±5	—
Размеры рабочей зоны колпака, мм	Ø280; 500	Ø500; 750
Максимальная температура нагрева, °С	1300	1000–1040
Точность поддержания температуры, °С	±1	—

Недостатком данной печи является отсутствие визуального контроля за процессом пайки, что не позволяет производить пайку узлов с минимальной выдержкой во время самого процесса пайки; требуется высокая квалификация в первую очередь ИТР, занимающихся разработкой технологии, а также обслуживающего персонала и рабочих в части знаний работы с ПК на новом оборудовании.

Проведенный анализ оборудования позволяет сделать практические выводы для последующей разработки отечественного оборудования высокого класса с учетом замеченных достоинств и недостатков, оптимизировать технологии пайки проблемных узлов заготовок коллекторов, изоляторов и антенных устройств, в том числе показать возможность реставрации этих узлов.

**Литература**

- [1] Вашин С.А. Внедрение технологий пайки в защитной атмосфере водорода и электронно-лучевой сварки узлов ЭВП на базе современного оборудования. *Тез. докл. V Науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2015, с. 41–42.*
- [2] Лашко Н.Ф., Лашко С.В. *Пайка металлов.* Москва, Машиностроение, 1967, с. 367.
- [3] Ковалевский Р.Е., Чекмарев А.А. *Конструирование и технология вакуумно-плотных паяных соединений.* Москва, Энергия, 1968.

УДК 621.791.927.55

## Особенности формирования антифрикционных покрытий на базе сплавов баббита при плазменно–порошковой наплавке

© Гуркин Сергей Вадимович, Коберник Николай Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[thefis@yandex.ru](mailto:thefis@yandex.ru)

*Предложен новый способ нанесения антифрикционных покрытий на базе сплавов баббита при плазменно-порошковой наплавке, обеспечивающей высокую производительность, чистоту и эксплуатационные качества сплава, более гладкую поверхность для снижения стоимости обработки. Установлено влияние подслоев на адгезионную прочность и воздействие режимов на пористость.*

**Ключевые слова:** баббит, плазменно-порошковая наплавка, адгезионная прочность, пористость.

В настоящее время возрастает актуальность использования восстановленных деталей при ремонте автомобилей, автотракторной и сельскохозяйственной техники, пищевого и промышленного оборудования. При восстановлении изношенных деталей значительно уменьшается количество технологических операций (в 5–8 раз), что по сравнению с изготовлением новых деталей способствует экономии металла, энергетических ресурсов и других природных ресурсов. Повышение надежности и долговечности работы машин и механизмов за счет уменьшения интенсивности их изнашивания связано с проблемами повышения износостойкости и надежности узлов трения [1].

Антифрикционные материалы предназначены для изготовления подшипников (опор) скольжения, которые широко применяют в современных машинах и приборах из-за их устойчивости к вибрациям, бесшумности работы, небольших габаритов. К преимуществам подшипников скольжения можно также отнести возможность работы при высоких скоростях вращения и нагрузках, в воде и в агрессивных средах, обеспечение высокой точности установки валов, малую чувствительность к ударным нагрузкам, незаменимость в случаях, когда по условиям сборки подшипник должен быть разъемным (на шейках коленчатых валов).

Технология изготовления качественных подшипников скольжения для железнодорожного транспорта сегодня во многом не соблюдается. Согласно анализу ВНИИЖТ аварии на железнодорожном транспорте часто обусловлены именно преждевременным выходом из строя подшипников скольжения.

В настоящее время для нанесения антифрикционных сплавов на основе баббита применяется литье, и в редких случаях дуговая наплавка неплавящимся электродом и напыление. Используют три разных способа литья: заливку сифонным способом в металлическую стальную форму, центробежное литье и турбулентную заливку [3]. При сифонной заливке существенно различается плотность структурных составляю-

щих баббита, он имеет повышенную усталостную прочность. При центробежном способе на все структурные составляющие действуют центробежные и центроостремительные силы, что вызывает процессы расслоения — перераспределение интерметаллидов по удельному весу. Из-за неравномерного распределения кристаллов  $\beta$ -фазы (SnSb) и отсутствия кристаллов  $\gamma$ -фазы (Cu<sub>3</sub>Sn) баббит имеет повышенный коэффициент трения. В результате химический, структурный и фазовый состав не соответствует составу применяемой марки баббита, а его служебные свойства неудовлетворительны [2]. Дуговая наплавка является малопроизводительным процессом, при напылении возникают поры и недостаточна адгезионная прочность.

Исходя из сказанного предлагается применение технологии плазменно-порошковой наплавки. Данная технология обладает рядом преимуществ: высокой производительностью, возможностью применения порошкообразного присадочного материала, максимальной чистотой и эксплуатационными качествами сплава, более гладкой поверхностью для снижения стоимости обработки, пригодностью для автоматических процессов.

В ходе исследований была осуществлена наплавка баббита Б83 и показано влияние режимов на пористость. Проведены испытания на адгезионную прочность на образцах, наплавленных на разные подслои, и выявлено их влияние на адгезию.

#### Литература

- [1] Иванов А.В., Пирозерская О.Л. Перспективные способы наплавки и механической обработки восстанавливаемых деталей. *Диагностика и ремонт*, 2010, № 3 (13), с. 7–9.
- [2] Потехин Б.А., Глущенко А.Н., Илюшин В.В. Свойства баббита марки Б83. *Технология металлов*, 2006, № 3, с. 17–23.
- [3] Потехин Б.А., Илюшин В.В., Христолюбов А.С. Влияние способов литья на структуру и свойства оловянного баббита. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2009, № 8, с. 16–21.

УДК 620.179.1

## Тепловизионный контроль многослойных конструкций

© Заец Николай Петрович, Рогов Николай Викторович,  
Чижов Игорь Александрович

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

[zaecnp@mail.ru](mailto:zaecnp@mail.ru)

*Рассмотрена проблема неразрушающего контроля многослойных конструкций. Показана актуальность развития теплового метода неразрушающего контроля. Описаны два основных этапа исследований: математическое моделирование и проведение эксперимента. На этапе моделирования определены зависимости оптимального*

*наблюдения и режима нагрева объекта контроля. Выполнено сравнение результатов математического и натурального моделирования. Даны рекомендации по практическому проведению теплового неразрушающего контроля. Результатом проведенного эксперимента стало подтверждение адекватности математической модели и выработка рекомендаций для проведения тепловизионного контроля.*

**Ключевые слова:** моделирование, многослойная конструкция, целостность конструкций, тепловой контроль, неразрушающий контроль, методика.

В настоящее время на воздушных судах различного назначения, как отечественного, так и иностранного изготовления в большом количестве применяются многослойные конструкции. Данные конструкции обеспечивают высокую жесткость при относительно малой массе, в связи с чем их применение продолжает увеличиваться. Существующие методы неразрушающего контроля многослойных конструкций имеют низкую производительность и ряд других недостатков. Средства теплового неразрушающего контроля (ТНК) обладают высокой производительностью. Основные дефекты многослойных конструкций (расслоения, наличие воды в сотах заполнителя, отрыв обшивки от заполнителя) могут быть выявлены методом теплового неразрушающего контроля [1–3].

Цель проведения исследований — повышение эффективности оценки технического состояния многослойной конструкции воздушного судна военного назначения. В настоящее время отсутствуют методики по выявлению отрыва заполнителя от обшивки. Особенностью разработки методик данного типа является необходимость учета геометрических параметров, материалов конкретного объекта контроля, условий проведения контроля.

На первом этапе исследования было определено, что для эффективного проведения ТНК необходимо применение дополнительного источника тепловой стимуляции. Исходя из особенностей покрытий воздушных судов, вида поверхности элемента, а также технических возможностей нагрева был выбран конвективный источник нагрева. Математическое моделирование нагрева исследуемой конструкции позволило определить возможность проведения ТНК в случае кратковременного нагрева. Варьирование температурой нагревающего потока и времени нагрева привело к следующим выводам:

- увеличение времени нагрева и температуры нагревающего воздушного потока приводит к росту разности температур дефектной и бездефектной зон, но уменьшает время наблюдения максимальной разности температур;
- увеличение времени нагрева или температуры воздушного потока слабо влияют на время достижения максимальной разности температур дефектной и бездефектной зон.

Следующим этапом исследования стало проведение полнофакторного эксперимента, что подтвердило результаты математического моделирования и возможность обнаружения дефектов в многослойных конструкциях из стеклопластиков. Пример выявления дефектов приведен на рис. 1. На рисунке представлена термограмма многослойного элемента со стеклопластиковой обшивкой, полученная при активном одностороннем тепловом контроле, с применением конвективного источника нагрева. На термограмме отчетливо видны искусственные дефекты диаметром 20 мм.

Эксперимент позволил выявить дефекты диаметром 20 и 15 мм, температурную аномалию над искусственным дефектом диаметром 5 мм получить не удалось.

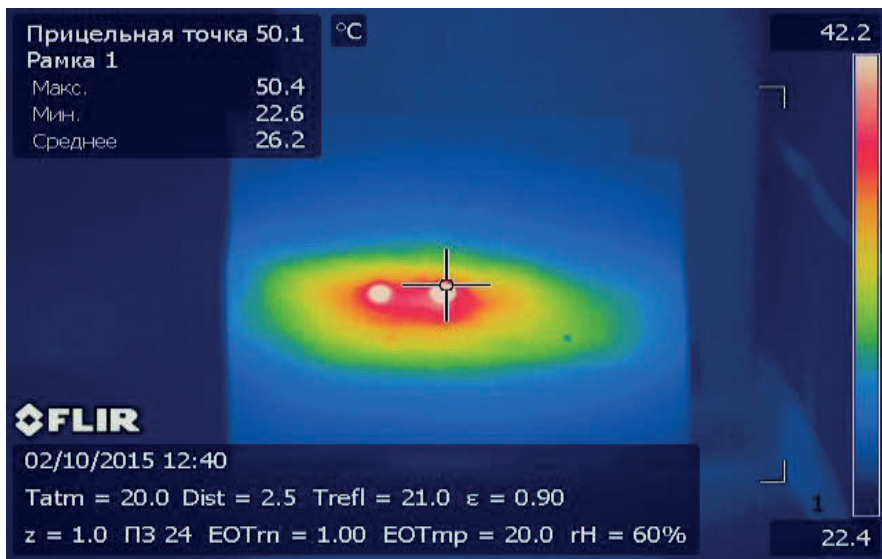


Рис. 1. Термограмма многослойной конструкции

Нестационарность тепловых процессов, которая приводит к непрерывному изменению цветовой палитры объекта контроля на мониторе инфракрасной камеры, создает объективное затруднение в определении дефектных зон. Для упрощения контроля было предложено значение верхней границы интервала температур задавать таким образом, чтобы на время оптимального наблюдения дефектные зоны на термограммах были представлены в белом цвете.

### Литература

- [1] Вавилов В. П., Климов А. Г., Ширяев В.В. Активный тепловой контроль воды в авиационных сотовых конструкциях. *Дефектоскопия*, 2002, № 12, с. 73–84.
- [2] Вавилов В. П. *Инфракрасная термография и тепловой контроль*. Москва, Спектр, 2013, 544 с.
- [3] Нестерук Д. А. *Тепловой контроль воды в авиационных сотовых панелях в процессе эксплуатации самолетов*: дис. ... канд. техн. наук (05.11.13 — приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий). Томск, 2005.

УДК 621.791.753.5

## **Модифицирование металла шва с помощью дополнительной горячей присадки, содержащей наноразмерные тугоплавкие частицы**

© Линник Антон Александрович, Коберник Николай Владимирович

Россия, Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[lurc@list.ru](mailto:lurc@list.ru)

*Работа посвящена разработке и исследованию способа модифицирования металла шва наноразмерными тугоплавкими частицами при сварке под флюсом с применением дополнительной горячей присадки для повышения механических свойств металла шва. Проанализирован опыт применения подобных частиц, обоснован и опробован метод ввода тугоплавких частиц в сварочную ванну.*

**Ключевые слова:** *сварка, модифицирование, тугоплавкие частицы, дополнительная горячая присадка.*

Строительство опасных производственных объектов в настоящее время связано с соблюдением повышенных требований к механическим свойствам, и прежде всего к ударной вязкости металла сварного шва, в том числе и при отрицательных температурах. Наибольшее снижение значений ударной вязкости наблюдается на участке перегрева и в корневой части сварного шва, где имеет место интенсивный рост зерна. Для обеспечения необходимых значений ударной вязкости металла шва и околосшовной зоны применяют различные подходы. Наряду с подбором режимов сварки используют комплексное легирование или модифицирование, а также различные приемы, направленные на захлаживание сварочной ванны.

Развитие нанотехнологий в России за последние несколько лет дает возможность применения тугоплавких частиц наноразмерного диапазона в качестве модификаторов, как при литье, так и при сварке. Размеры частиц сопоставимы с размерами зародышей кристаллизации при затвердевании сварочной ванны, что за счет наличия большого количества центров кристаллизации должно привести к измельчению структуры металла шва. Исходя из успешного опыта применения тугоплавких частиц наноразмерного диапазона в литье [1, 2], в последнее время все большее внимание уделяется их использованию при сварке.

По данным литературного обзора, имеется положительный эффект от введения подобных частиц при реализации различных способов сварки [3–5], однако во всех работах частицы вводятся в высокотемпературную часть сварочной ванны или через дуговой промежуток. Наиболее популярным способом доставки наноразмерных тугоплавких частиц является введение их в составе композиционных гранул [5, 6], которые представляют собой механическую смесь микроразмерного порошка никеля и наноразмерного порошка тугоплавких соединений и оксидов. Однако открытым остается вопрос дозирования вводимых микроразмерных гранул.



Наиболее перспективными в этом случае становится метод ввода частиц в составе композиционных гранул, содержащихся в шихте порошковой проволоки, при реализации процесса сварки под слоем флюса с дополнительной горячей присадкой. Частицы вводятся в хвостовую часть ванны, не приводя к выгоранию, а также к потере влияния частиц на структуру и механические свойства в отличие от способов ввода через дуговой промежуток. Кроме того, такой способ позволяет точнее дозировать количество вводимых частиц, а также приводит к снижению погонной энергии и захлаживанию сварочной ванны.

Была проведена серия экспериментов по реализации способа введения наноразмерных тугоплавких частиц, входящих в состав порошковой проволоки при сварке под флюсом с дополнительной горячей присадкой. Сварка проводилась на стальных пластинах толщиной 8 мм без разделки кромок с зазором 4 мм. Для удержания сварочной ванны сварка производилась на остающейся подкладке. В качестве дополнительной горячей присадки, вводимой в хвостовую часть ванны, использовалась порошковая проволока, содержащая различные наноразмерные тугоплавкие частицы (WC, TiN, TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); кроме того, для исключения влияния никеля была использована проволока с содержанием микроразмерного порошка никеля, а для исключения действия дополнительной горячей присадки — проволока сплошного сечения. После сварки были проведены исследования ударной вязкости металла шва.

В результате выполненных исследований удалось выяснить, что введение наноразмерных тугоплавких частиц в целом приводит к увеличению ударной вязкости металла шва. Открытым на данный момент остается вопрос, связанный с определением количества вводимых частиц для достижения максимального значения ударной вязкости металла шва в рамках рассматриваемой технологии.

## Литература

- [1] Манолов В., Черепанов А., Лазарева Р., Константинова С. Влияние нанопорошковых инкуляторов на структуру и свойства сплава AlSi7Mg. *Литейное производство*, 2011, № 11, с. 11–14.
- [2] Makarov S.V., Sapozhkov S.B. Production of electrodes for manual arc welding using nanodisperse materials. *World Applied Sciences Journal*, 2014, no 29 (6), pp. 720–723.
- [3] Алов А.А., Бобров Г.В. Модифицирование металла шва при сварке алюминия. *Сварочное производство*, 1959, № 6, с. 1–6.
- [4] Хренов К.К., Позняк Л.А., Юзвенко Ю.А., Самотрясов М.С. Особенности модифицирования титаном сварных швов при автоматической сварке среднеуглеродистой стали. *Сварочное производство*, 1959, № 6, с. 6–8.
- [5] Трошков А.С., Соколов Г.Н., Сычева С.С., Лысак В.И. Структура и свойства низкоуглеродистого металла, наплавленного под керамическим флюсом, содержащим композиционные микрогранулы Ni–нанодисперсный WC. *Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст.*, 2012, № 9 (96), с. 187–190.
- [6] Гушин Д.А., Гребенчук В.Г., Гребенчук И.В. Анализ и поиск перспективных направлений модифицирования металла сварных швов при автоматической сварке под флюсом мостовых металлоконструкций. *Современные решения обеспечения безопасности мостов: науч. тр. ОАО ЦНИИС*, вып. 261. Москва, ОАО ЦНИИС, 2011, с. 18–25.

УДК 621.791

## Модифицирование металла шва ультрадисперсными тугоплавкими частицами

© Панкратов Александр Сергеевич, Коберник Николай Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[aspankratov@yahoo.com](mailto:aspankratov@yahoo.com)

*В последнее время с развитием нанотехнологий активно развивается модифицирование металла шва сварного соединения ультрадисперсными тугоплавкими частицами. Работа продолжает исследования по введению ультрадисперсных тугоплавких частиц модификаторов различного состава при высокопроизводительном процессе автоматической сварки под флюсом проволочным электродами.*

**Ключевые слова:** сварное соединение, ультрадисперсные тугоплавкие частицы, нанотехнологии.

В последнее время с развитием нанотехнологий активно развивается модифицирование металла шва сварного соединения ультрадисперсными тугоплавкими частицами. Существует ряд работ, посвященных введению частиц различного состава при разных способах сварки. Авторы этих работ отмечают положительный эффект от введения ультрадисперсных частиц в сварочную ванну.

Одной из трудностей, возникающих при использовании ультрадисперсных частиц в качестве модифицирующих, является их транспортировка и доставка в сварочную ванну. При этом желательно избежать контакта частицы с высокотемпературной зоной сварочной дуги. Одним из способов транспортировки является применение композиционных гранул. Гранула состоит из транспортирующей частицы макроразмера из чистого металла и модифицирующей тугоплавкой частицы наноразмерного диапазона.

Работа продолжает исследования по введению ультрадисперсных тугоплавких частиц модификаторов различного состава при высокопроизводительном процессе автоматической сварки под флюсом проволочным электродами. Частицы вводились с помощью предварительной засыпки композиционных гранул в разделку. Это обеспечивает их изоляцию жидкой прослойкой сварочной ванны от дуги.

В ходе исследований определяли влияние состава и количества вводимых частиц на эксплуатационные характеристики сварных соединений. Для этого после сварки из сварных швов вырезали образцы для исследования структуры, а также образцы для испытаний на ударную вязкость (KCV).

Анализ полученных результатов показал положительный эффект применения ультрадисперсных тугоплавких частиц в качестве модификаторов. Отмечается измельчение зерна, а также повышение среднего значения KCV при уменьшении разброса значений.

Однако также было отмечено, что существует критическая точка, после которой увеличение количества вводимых частиц приводит к падению значения KCV при измельчении зерна.

### Литература

- [1] Коберник Н.В., Чернышев Г.Г., Михеев Р.С., Чернышева Т.А. Влияние способа изготовления присадочного материала на формирование наплавленных покрытий из композиционных материалов. *Сварка и диагностика*, 2009, № 4, с. 18–22.
- [2] Михеев Р.С., Коберник Н.В., Ковалев В.В. Получение износостойких поверхностных структур с использованием композиционных материалов. *Физика и химия обработки материалов*, 2014, № 4, с. 35–45.

УДК 621.791.12;18

## Состав, структура и свойства диффузионных соединений, полученных прессовой посадкой, деталей из титановых сплавов авиационного назначения

© Пицык Виктор Сергеевич, Муравьев Василий Илларионович

Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре  
государственный технический университет

[BiktopSergeevich@yandex.ru](mailto:BiktopSergeevich@yandex.ru)

*Рассмотрены особенности формирования структуры и свойств неразъемных соединений, полученных прессовой посадкой с последующей термической обработкой. Показано, что формирование в зоне соединения микроструктурной деформированной структуры в сочетании со значительными остаточными напряжениями при термической обработке приводят к аномально высокой скорости диффузии, что обеспечивает получение неразъемных диффузионных соединений со структурой и свойствами, аналогичными основному металлу.*

**Ключевые слова:** *прессовая посадка, диффузионное взаимодействие, термическая обработка, титановые сплавы, автовакуум, неразъемные соединения.*

Авиа- и ракетостроение всегда предъявляло высокие требования к массогабаритным показателям конструкции, в связи с чем различные сплавы на основе титана, благодаря комплексу уникальных свойств, находят все большее применение. Титан и сплавы на его основе в авиастроении применяют при изготовлении различных элементов фюзеляжа, элементов реактивных двигателей, несущих элементов и трубопроводных систем высокого давления.

Создание сложных, объемных конструкций, таких как авиационная техника, не представляется возможным без применения неразъемных соединений. Наибольшее распространение получили различные методы сварки и пайки, однако они имеют ряд

недостатков, ограничивающих их повсеместное использование. Основным и общим недостатком данных способов является формирование в зоне соединения областей с различной структурой и физико-механическими свойствами. Таким образом, создание неразъемного соединения, исключающего образование гетерогенных областей, является актуальной задачей. Наибольший интерес в этом отношении представляют методы диффузионной сварки.

Создание подобного соединения невозможно без решения материаловедческой задачи — выявления закономерностей влияния структуры, состава и технологии получения диффузионных соединений на их свойства. Для достижения основной цели был сформулирован комплекс задач: оценить влияние параметров процесса получения соединения на его качество, структуру и свойства; оценить энергетическое состояние соединения; выявить особенности формирования структуры и определить характер влияния различных видов термической обработки на данные особенности.

В исследованиях рассматривались заготовки типа отверстие–вал из сплава ВТ-20 и трубные заготовки из сплава ПТ7М. В качестве метода получения диффузионных соединений использовался перспективный способ, основанный на предварительной тугой посадке заготовок (значение натяга значительно превышает стандартное) с последующей термической обработкой [1–3]. Энергетическое состояние оценивалось посредством измерения микротвердости в зоне соединения. Особенности формирования структуры выявлялись по результатам оптической и растровой микроскопии. Плотность и герметичность соединений оценивалась по результатам капиллярной и рентгенографической дефектоскопии. Оценка физико-механических свойств соединений: для трубных заготовок осуществлялась посредством испытаний на статическое растяжение (ГОСТ 10006—80) и сжатие (ГОСТ 8695—75); для заготовок типа отверстие–вал — по результатам испытаний на выпрессовку.

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1) в зоне соединения после холодного прессования с натягом формируется область с равноосной субмикроструктурной структурой и более высоким значением внутренней энергии по сравнению с основным металлом, что говорит о наличии в зоне соединения остаточных напряжений. Кроме того, в зоне диффузионного взаимодействия присутствует значительное число микродефектов типа пор и трещин. Для исключения микродефектов в зоне соединения и снятия остаточных напряжений требуется последующая термическая обработка;

2) формирование пограничного слоя с субмикроструктурной структурой в сочетании с последующим скоростным автовакуумным нагревом до температуры предпревращения обеспечивают аномально высокую скорость самодиффузии, что, в свою очередь, обеспечивает формирование соединения со структурой, аналогичной основному металлу и обладающей более высокими физико-технологическими свойствами. Прочность при выпрессовке образцов типа отверстие–вал превысила прочность цельной заготовки при испытаниях на статическое растяжение на 2 %. При испытаниях на статическое растяжение трубных образцов разрушение происходило по основному металлу, предел прочности составил 538 МПа, результаты испытаний на статическое сплющивание подтверждают результаты других испытаний;

3) после холодного прессования распределение микротвердости в зоне соединения носит характер, близкий к нормальному распределению. На пике кривой (область диффузионного взаимодействия), увеличение по сравнению с основным металлом составляет порядка 29 %. После термической обработки (автовакуумный нагрев, нагрев под слоем защитной эмали) происходит изменение характера распределения — кривые

пиковых значений не имеют, что подтверждает перераспределение внутренней энергии в зоне соединения и снятие остаточных напряжений. Автовакуумный нагрев позволяет сохранить значение микротвердости в диапазоне от 320...330 HV (микротвердость основного металла в исходном состоянии 255 HV);

4) результаты радиографической и капиллярной дефектоскопии не выявили наличия внутренних дефектов в диффузионных соединениях, что говорит об их высокой плотности и герметичности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований в рамках программы мол\_a*

### **Литература**

- [1] Муравьев В.И., Пицык В.С. Исследование процессов объемного взаимодействия заготовок типа отверстие-вал в автовакууме при температуре предпревращения. *Уч. зап. Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2014, № 2, с. 96–104.
- [2] Муравьев В.И., Пицык В.С. Влияние прессовой посадки на процессы «схватывания» в зоне соединения трубных заготовок. *Уч. зап. Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*, 2014, № 1, с. 52–61.
- [3] Муравьев В.И., Бахматов П.В., Пицык В.С. Получение соединения втулка-вал запрессовкой с последующим спеканием. *Вестник машиностроения*, 2013, № 12, с. 73–79.

УДК 621.762

## Модель реакции СВС-Аз (на примере получения нанопорошка нитрида алюминия)

© Барамыкина Мария Викторовна, Титова Юлия Владимировна

Россия, г. Самара, Самарский государственный технический университет

[baramykina@list.ru](mailto:baramykina@list.ru)

*Работа посвящена физико-техническим характеристикам нитрида алюминия. Благодаря своим ценным физико-техническим характеристикам нитрид алюминия широко применяется в технике высоких температур в качестве огнеупорного и электроизоляционного материала. В настоящей статье рассмотрены некоторые закономерности СВС-реакции, протекающей в азидной системе с целью получения нанопорошка AlN.*

**Ключевые слова:** нанопорошок, нитрид алюминия, физико-технические характеристики, синтез, свойства.

Ценные физико-технические характеристики нитрида алюминия вызвали широкий интерес к изучению свойств нитрида алюминия и материалов на его основе. Для получения материалов используют системы AlN — оксид, AlN — борид, AlN-металлические волокна, AlN — стеклянные волокна, пластинчатые кристаллы оксида хрома, кристаллы муллита. Это позволяет получить ряд композиционных материалов с заранее заданными свойствами и тем расширить область применения нитридоалюминиевой керамики.

Нитрид алюминия обладает люминесцентными свойствами, фосфоролюминесценцией, фотоэлектрическим эффектом и катодолюминесценцией, что в последнее время привлекло к нему пристальное внимание в связи с перспективой широкого применения в люминесцентных устройствах. Нитриды характеризуются более высоким квантовым выходом по сравнению с фосфидами.

Один из методов получения порошка нитрида алюминия — метод СВС — позволяет проводить синтез в широком диапазоне температур и давлений. Синтез AlN методом СВС (самораспространяющийся синтез) является наиболее совершенным способом получения порошка AlN. Большинство работ по синтезу AlN методом СВС

выполнены на лабораторных установках с использованием шихты массой 30...600 г. При горении шихты малой массы в лабораторном реакторе вследствие больших теплотерь формируется значительный (до 600 °С) градиент температур между внутренним и внешним участками шихт. Наличие градиента температур приводит к образованию в одном спеке AlN с различным морфологическим и химическим составом.

Благодаря своим ценным физико-техническим характеристикам нитрид алюминия широко применяется в технике высоких температур в качестве огнеупорного и электроизоляционного материала. Из него изготавливают электроизоляционную соломку для термопар и электроизоляционные конструкционные детали, работающие в агрессивных средах. Высокая огнеупорность нитрида алюминия и его химическая стойкость позволяют использовать его для футеровок электролизеров, ванн, резервуаров, тиглей для получения расплавленного алюминия, олова, галлия, расплавленного стекла и борного ангидрида при 1300...2000 °С.

Пленки из нитрида алюминия применяют в микроэлектронике при изготовлении микромодулей и интегральных схем и инструментальных сталей различной твердости.

В настоящей статье рассмотрены некоторые закономерности СВС-реакции, протекающей в азидной системе с целью получения нанопорошка AlN.

Для начала проведем аналогию между СВС-реакцией и распространением волнового импульса в механической системе. Пусть по шнуру распространяется поперечный волновой импульс (рис. 1). Представим себе, что шнур состоит из некоторых достаточно малых взаимосвязанных элементов, как это показано на рисунке. Учтем, что в рассматриваемой нами системе действует сила тяжести.

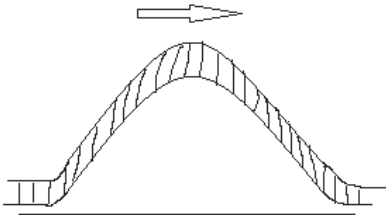


Рис. 1. Волновой импульс и его представление

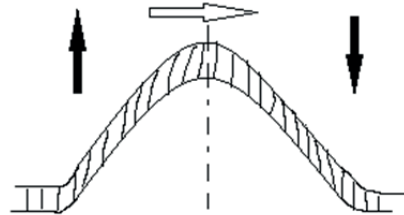


Рис. 2. Разделение импульса на две части

Если мы разделим рассматриваемый нами волновой импульс на две части, то в левой части элементы будут двигаться вверх, против силы тяжести. В правой части элементы будут двигаться вниз, по направлению действия силы тяжести, как это видно на рис. 2.

Для того чтобы элементы левой части двигались вверх, нужна дополнительная энергия. Элементы, двигаясь против силы тяжести, поглощают энергию, увеличивая общую энергию системы. Элементы правой части двигаются вниз, при этом их потенциальная энергия уменьшается и общая энергия системы также уменьшается. Таким образом, процесс распространения волнового импульса по шнуру можно представить себе следующим образом: элементы шнура сначала поглощают энергию, а затем выделяют ее.

Подобные представления вполне могут быть применены и к СВС-процессу. СВС-смесь можно представить как набор некоторых элементов — реакционных яче-

ек. При СВС-реакции эти реакционные ячейки сначала поглощают энергию, а затем выделяют ее.

Рассмотрим более подробно, как этот процесс протекает в азидной системе при СВС-синтезе нанопорошка AlN. В данном случае хлорид алюминия в смеси с мочевиной, хлоридом/фторидом аммония, порошком Al и нитридом Al размещают в СВС-реакторе и заполняют реактор азотом, достигая давления 2...6 МПа.

Смесь воспламеняют, в результате чего происходит разложение азидов натрия. Этот процесс требует затрат тепла, т. е. происходит с поглощением энергии и является аналогом подъема элементов против силы тяжести. Затем происходит разложение  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . Этот процесс также требует затрат энергии, т. е. является процессом поглощения энергии — аналогом движения элементов против силы тяжести в нашей модели. Синтез нитрида алюминия, происходящий с выделением тепла, является аналогом движения элементов вниз, т. е. по сути процессом выделения энергии.

Таким образом, можно провести аналогию между движением волнового импульса по шнуру при действии силы тяжести и распространением волны горения при синтезе нитрида алюминия в режиме СВС с использованием азидов.

### Литература

- [1] Амосов А.П., Титова Ю.В., Майдан Д.А., Ермошкин А.А., Тимошкин И.Ю. О применении нанопорошковой продукции азидной технологии СВС для армирования и модифицирования алюминиевых сплавов. *Известия вузов. Сер. Цветная металлургия*, 2015, № 1, с. 68–74.
- [2] Титова Ю.В., Шиганова Л.А. Синтез нановолокон нитрида алюминия. Современные инновации в науке и технике: *Материалы Международной научно-практической конференции*. Курск, Юго-Западный государственный университет, 2011, с. 116–119.
- [3] Титова Ю.В., Шиганова Л.А., Бичуров Г.В. Синтез тугоплавких нанопорошков методом СВС-АЗ. *Техника и технологии: пути инновационного развития. Материалы Международной науч.-практ. конф.* Курск, Юго-Западный государственный университет, 2011, с. 139–141.
- [4] Титова Ю.В., Шиганова Л.А., Майдан Д.А., Бичуров Г.В. Исследование процесса получения наноразмерного порошка нитрида алюминия в режиме СВС-АЗ. Современные материалы, техника и технология. *Материалы Международной науч.-практ. конф.* Курск, ЗАО «Университетская книга», 2011, с. 316–319.

УДК 61.35.29

## Получение нитрида кремния по азидной технологии СВС

© Белова Галина Сергеевна, Титова Юлия Владимировна

Россия, г. Самара, Самарский государственный технический университет

[galya.belova.94@mail.ru](mailto:galya.belova.94@mail.ru)

*Порошок нитрида кремния успешно получен по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из смеси  $14\text{Si} + 6\text{NaN}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ . Технология СВС получения нитрида кремния обладает высокой экономической эффективностью.*



стью: затраты на производство целевых нитридов низки, а их чистота значительно выше, чем при использовании известных традиционных технологий.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, горение, азид натрия, тепловыделение, синтез, нитрид кремния.

В настоящее время однозначно доказано существование в системе кремний — азот только одного химического соединения — нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

В соответствии с сильными ковалентными связями между атомами нитрид кремния обладает высокой твердостью, малым коэффициентом термического расширения. Его температура плавления  $1900^\circ\text{C}$ . Одним из важнейших свойств является высокая химическая стойкость. Например, при действии кислорода на порошок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при  $1000^\circ\text{C}$  в течение 3 ч окисляется 14,7 % этого порошка. Еще более устойчив нитрид кремния к окислению воздуха [1].

Также нитрид кремния отличается весьма высокой стойкостью по отношению к расплавленным металлам. Особенно стоек к расплавленному алюминию, устойчивость в котором при  $982^\circ\text{C}$  доходит до 3000 ч без какого-либо заметного разрушения, и примерно также стоек к действию расплавленного свинца, олова и цинка [2].

Описанные свойства открывают широкие перспективы использования нитридокремниевых материалов во многих областях техники. Применение керамики может повысить КПД двигателей на 40...42 %. Рабочая температура керамических двигателей внутреннего сгорания, работающих без охлаждения в течение 100...240 ч, составляет  $1000^\circ\text{C}$ , а в некоторых случаях  $1375^\circ\text{C}$ . Те же преимущества применения нитридокремниевой керамики проявляются при использовании ее в газовых турбинах. Рабочая температура деталей газовых турбин достигает  $1455^\circ\text{C}$ . Увеличение КПД газовых турбин позволяет экономить топливо, а химическая стойкость материала — использовать низкосортные топлива. Нитрид кремния применяется в качестве термоизоляционного и огнеупорного материала, спецкерамики, для производства деталей газовых горелок, втулок для выпуска металлов плавильных печей и футеровок, для изготовления термпарных чехлов, фильтров и подшипников.

В работах [3] показана перспективность использования горячепрессованного нитрида кремния в качестве основы инструментальных материалов, предназначенных для чистовой и получистовой обработки резанием углеродистых конструкционных и инструментальных сталей различной твердости.

Во многих публикациях нитридокремниевую керамику называют материалом будущего. Широкие исследования нитридокремниевых материалов, которые ведутся во всем мире, способствуют быстрому прогрессу в этой области. Благодаря своим необычным свойствам, особенно в сравнении с другими материалами инженерной керамики, нитрид кремния применяется там, где требуется высочайшая механическая прочность или очень высокие нагрузки при частых сменах температуры.

Методами получения нитрида кремния являются:

- 1) синтез нитрида кремния из простых веществ;
- 2) плазмохимический синтез;
- 3) самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

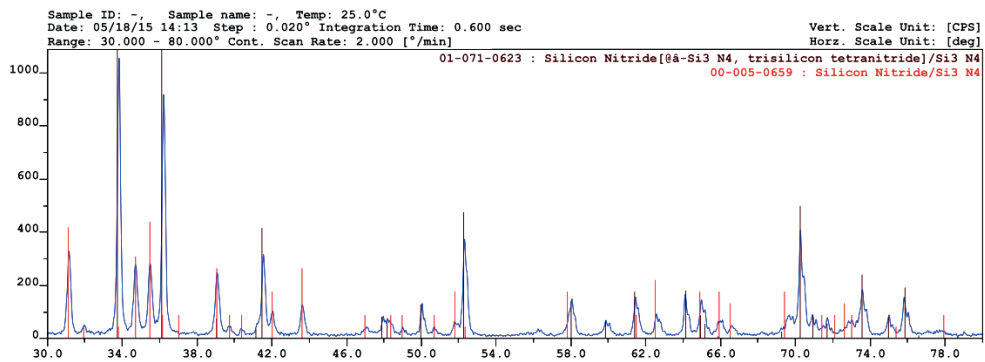
Наиболее экономичным и производительным методом получения нитрида кремния является самораспространяющийся высокотемпературный синтез [4, 5]. В основе метода лежит реакция экзотермического взаимодействия двух или нескольких хими-

ческих элементов, протекающая в режиме направленного горения. Процесс СВС характеризуется высокой температурой (2000...4000 °С) и большой скоростью распространения фронта горения (0,5...0,15 см/с). Высокие температуры горения обеспечивают полноту превращения исходных элементов в конечные продукты и способствуют испарению примесей, поэтому целевые продукты имеют высокую чистоту. Большие скорости горения обеспечивают высокую производительность процесса. Отсутствие длительного и энергоемкого нагрева в печи — одно из главных преимуществ технологии СВС.

При получении нитридов в режиме СВС существуют некоторые трудности. Они связаны с тем, что нитридные пленки, покрывающие частицы исходного порошка азотируемого элемента в ходе синтеза, являются защитными и сильно тормозят процесс, что приводит к не догоранию. Вследствие этого процесс СВС проходит в две стадии: распространение волны горения и объемное догорание. Чтобы получить однофазные нитриды необходимо обеспечить полноту процесса на стадии догорания [6–9].

Тем не менее технологии СВС нитридов в сравнении с другими традиционными способами синтеза имеют ряд важных технологических достоинств: степень чистоты материала повышается до 97...98 %; уменьшается количество примесей до десятых долей процента, содержащихся в исходном сырье, за счет самоочистки в процессе синтеза; снижается содержание свободного непроазотированного элемента и кислорода в 2 раза и более; открываются перспективы синтеза новых нитридных модификаций. Поэтому способ СВС обладает высокой экономической эффективностью: затраты на производство целевых нитридов низки, а их чистота значительно выше, чем при использовании известных традиционных технологий.

На рис. 1 представлена рентгенограмма порошка нитрида кремния, полученного по реакции



**Рис. 1.** Рентгенограмма порошка нитрида кремния, синтезированного из смеси  $14\text{Si} + 6\text{NaN}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$

На рисунке видно, что продукты горения смеси  $14\text{Si} + 6\text{NaN}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$  состоят из двух фаз:  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  и  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ . Степень чистоты целевого продукта — нитрида кремния — составляет 100 %.

Литература

- [1] Самсонов Г.В. *Нитриды*. Киев, Наукова думка, 1969, 380 с.
- [2] Косолапова Т.Я., Андреева Т.В., Бартницкая Т.С. *Неметаллические тугоплавкие соединения*. Москва, Металлургия, 1985, 244 с.
- [3] Андриевский Р.А., Леонтьев М.А. Газовыделение из порошков нитрида кремния различного происхождения. *Порошковая металлургия*, 1984, № 8, с. 9–12.
- [4] Ксенофонтов А.Н., Космачева Н.В., Бичуров Г.В. Формование  $\alpha$ -нитрида кремния в режиме СВС с использованием азидата натрия и галоидных солей аммония. *Цветные металлы*, 2001, № 12, с. 103–104.
- [4] Бичуров Г.В. СВС тугоплавких нитридов с использованием азидата натрия и галоидных солей. *Изв. вузов. Сер. Цветная металлургия*, 2001, № 2, с. 55–61.
- [5] Амосов А.П., Бичуров Г.В. *Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 526 с.
- [6] Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. *Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 567 с.
- [7] Бичуров Г.В., Шиганова Л.А., Титова Ю.В. *Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридных композиций*. Москва, Машиностроение, 2012, 519 с.
- [8] Левашов Е.А., Рогачев А.С., Юхвид В.И. *Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза*. Москва, Издат. дом МИСиС, 2011, 377 с.

УДК 620.18: 669-419:621.771

## **Влияние параметров ламинарной структуры на хладостойкость многослойных материалов**

© Власова Дарья Владимировна, Плохих Андрей Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

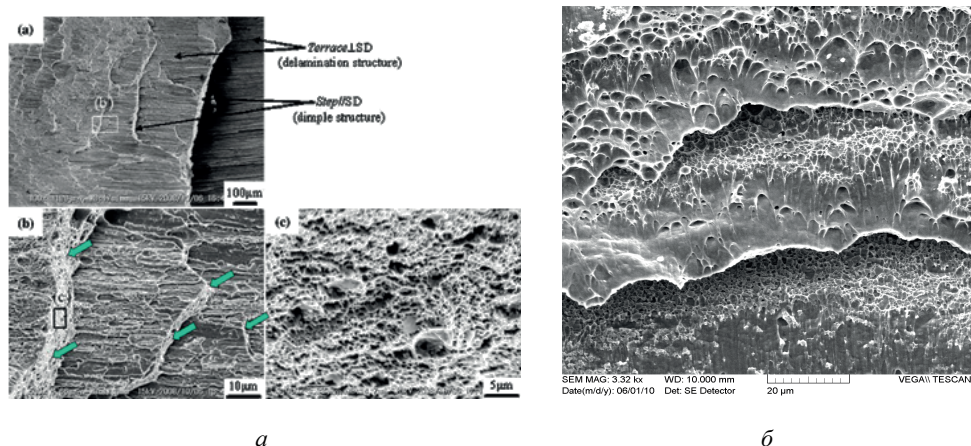
[vlasova-dari@list.ru](mailto:vlasova-dari@list.ru)

*Использование многослойных металлических материалов дает возможность значительно увеличить ресурс деталей и конструкций, работающих в условиях высоких нагрузок с одновременной экономией дорогостоящих легирующих элементов. В работе изложены результаты исследования ударной вязкости многослойных металлических материалов с ламинарной структурой на стальной основе, полученных методом прокатки, при криогенных температурах. Также было изучено влияние различных степеней структурирования на значения ударной вязкости этих материалов.*

**Ключевые слова:** многослойные материалы, механические свойства, ударная вязкость, структура.

Такой области промышленности, как машиностроение, постоянно требуются материалы с более высоким и стабильным комплексом свойств. Использование многослойных материалов дает существенное преимущество перед монометаллическими при создании перспективных образцов техники. К числу таких материалов можно отнести конструкционные металлические материалы, получаемые путем синтеза многослойных композитных заготовок.

В последнее время стали известны результаты, показывающие положительное влияние особого вида структур на значения ударной вязкости ферритных сталей в области низких климатических температур [1, 2]. В частности, при проведении специальных видов термомеханической обработки в низколегированных сталях формируется слоистая структура, за счет которой резко возрастают значения ударной вязкости, и формируется специальный вид излома, имеющего террасное строение (рис. 1, *a*). Также известно, что при определенных условиях теплой или горячей деформации сплавов с ОЦК-решеткой без рекристаллизации возможно образование такой субструктуры, которая в ходе последующих ударных испытаний вызывает появление трещин расслоения поперек основной трещины и способствует тем самым росту энергоемкости и снижению температуры вязкохрупкого перехода. Авторы работ [3, 4] полагают, что трещины расслоения возникают в ходе движения основной трещины и их образование меняет характер напряженного состояния. Ситуация схожа с разрушением слоистого образца, когда трещина разрушения ориентирована перпендикулярно слоям, но движется в параллельном им направлении [5].



**Рис. 1.** Электронная микрофотография поверхности разрушения: *a* — террасное строение излома [2]; *б* — композиция 08X18+08X18Н10 (второй технологический цикл)

Высокие значения ударной вязкости, в том числе в области низких климатических температур, были также получены на образцах многослойных композиций 08X18 + 08X18Н10, У8 + 08X18Н10, 40X13 + 08X18Н10. Последние были изготовлены по экспериментальному технологическому маршруту, включающему мерную резку заготовок из листов (по 50 попеременно чередующихся слоев каждой марки), обработку их поверхности, сборку нарезанных листов в пакет, вакуумирование пакета и последующее пластическое деформирование горячей прокаткой. Указанные композиции прошли два полных технологических цикла.

Запас ударной вязкости в этих материалах в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, оказывается весьма значительным. Для оценки влияния сложной структуры на ударную вязкость, в соответствии с ГОСТ 9454—78, были испытаны стандартные образцы IV типа размером  $2 \times 8 \times 55$  мм с V-образным концентратором. Это было сделано в связи с тем, что полноразмерные образцы с U-образным концентратором копром мощностью 300 Дж не разрушались.

Фактографический анализ поверхности части образца, претерпевшего разрушение, показывает, что механизм формирования излома практически аналогичен механизму разрушения при растяжении образца. При этом поперечный удар приводит к растяжению слоев с образованием места разрушения типа «лезвие ножа», которое сопровождается, как известно, чисто вязкое разрушение (рис. 1, б).

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что значения ударной вязкости (работы деформации) увеличиваются от цикла к циклу весьма значительно. Максимальное увеличение, почти в 3 раза, наблюдается для композиции У8 + 08Х18Н10, что делает такие материалы перспективными для различных изделий с высокими требованиями характеристик надежности.

### Литература

- [1] Kimura Y., Inoue T., Yin F., Tsuzaki K. Inverse Temperature Dependence of Toughness in an Ultrafine Grain-Structure Steel. *Science*, 2008, vol. 320, pp. 1057–1060.
- [2] Inoue T., Yin F., Kimura Y., Tsuzaki K. *Metall. Mater. Trans. A*, 2010, vol. 41A, pp. 341–355.
- [3] Мирзаев Д.А., Шабуров Д.В., Яковлева И.Л. Исследование причин повышения вязкости ферритной стали 08Х18Т1 в результате повторной горячей прокатки. *ФММ*, 2004, т. 98. с. 90–98.
- [4] Мирзаев Д.А., Шабуров Д.В., Яковлева И.Л. Влияние повторной горячей прокатки на ударную вязкость ферритной стали 08Х18Т1, охрупченной при исходной горячей прокатке. *Деформация и разрушение*, 2006, № 3, с. 24–30.
- [5] Яковлева И.Л., Терещенко Н.А., Мирзаев Д.А. Ударная вязкость и пластические свойства составных слоистых образцов по сравнению с монолитными. *ФММ*, 2007, т. 104, № 2, с. 212–221.

УДК 621.78

## Моделирование конвективного теплообмена при струйном нагреве алюминиевого рулона горячим воздухом

© Горшенин Андрей Сергеевич

Россия, г. Самара, Самарский государственный технический университет

[andersonag1@yandex.ru](mailto:andersonag1@yandex.ru)

Приведена разработка математической модели конвективного теплообмена при термообработке алюминиевого рулона. Сформулированы физическая и математическая постановка задачи теплообмена, приведены допущения, расчетная схема теплообмена, дифференциальные уравнения теплопроводности, граничные и началь-

ные условия. Полученная математическая модель позволяет исследовать теплообмен для любой ширины рулона.

**Ключевые слова:** термообработка, конвективный теплообмен, алюминиевый рулон, струйный нагрев.

При непрерывном литье алюминиевой ленты происходит образование неоднородной структуры металла, т. е. дендритной ликвации, появлению микропор, трещин [1]. Для устранения таких дефектов, ухудшающих качество слитков, проводят термическую обработку, одним из видов которой является отжиг. Исследование теплообмена при отжиге круглых алюминиевых слитков подробно описано в [2, 3]. Помимо круглых слитков в качестве алюминиевого полуфабриката используется также лента, которую также подвергают отжигу. В связи с этим возникает необходимость подробно изучить теплообмен при термообработке алюминиевой ленты. Для исследования процесса теплообмена прежде всего необходимо получить математическую модель теплообмена между алюминиевым рулоном и горячим воздухом.

Сформулируем физическую постановку задачи теплообмена в системе горячий воздух — алюминиевый рулон.

В печи происходит термическая обработка садки — алюминиевой ленты, скрученной в рулон, из литейной машины. Термическая обработка — нагрев для отжига (гомогенизации), температура процесса 600 °С. Подвод теплоты происходит струями горячего воздуха в два боковых торца рулона. Следствием данной физической постановки задачи являются следующие допущения:

- 1) на торцах рулона происходит равномерный нагрев конвекцией;
- 2) нагрев листов рулона осуществляется теплопроводностью вдоль оси рулона;
- 3) передача теплоты происходит вдоль рулона, по радиусу рулона теплота не передается из-за термических сопротивлений.

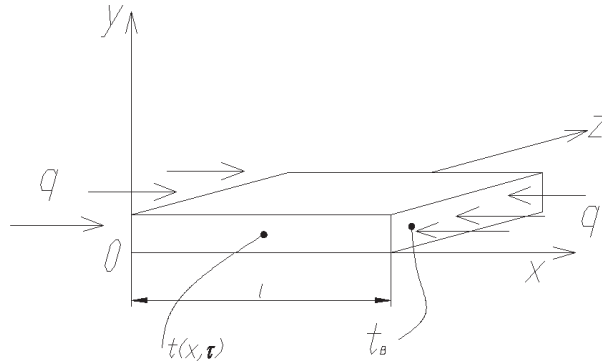
Сформулируем математическую постановку задачи.

Лист рулона можно представить пластиной в прямоугольных координатах. Примем следующие условные обозначения:  $t_b$  — температура горячего воздуха, °С;  $t$  — температура алюминиевого листа, °С;  $\tau$  — время нагрева, ч;  $l$  — ширина рулона, м. Лист омывается горячим воздухом с температурой  $t_b$ , °С, с постоянной скоростью  $W$ , м/с. Теплота  $q$  равномерно подводится по всему торцу листа. В процессе нагрева температура листа алюминия изменяется от начальной  $t_0$  до конечной температуры  $t$ .

Расчетная схема теплообмена к постановке задачи теплообмена в системе горячий воздух — алюминиевый рулон представлена на рис. 1.

Анализ расчетной схемы показывает, что температура листа изменяется только по координате  $X$ . Так как горячий воздух равномерно омывает торцы листа, изменения температуры по координате  $Z$  нет, т. е.  $t \neq f(Z)$ . По координате  $Y$  изменения температуры также нет, т. е.  $t \neq f(Y)$ , поскольку тело термически тонкое. Таким образом, температура листа изменяется только по оси рулона:  $t = f(X)$ . Нагрев рулона нестационарный, т. е.  $t = f(X, \tau)$ . Нагрев происходит горячим воздухом с постоянной температурой  $t_b = \text{const}$ .

В начальный момент времени нагрева  $\tau = 0$  температура рулона  $t$ , являющаяся функцией координаты  $X$  и времени нагрева  $\tau$ , принимает значение  $t_0$ ,  $t = f(X, \tau) = f(X) = t_0$ .



**Рис. 1.** Расчетная схема теплообмена к постановке задачи в системе горячий воздух — алюминиевый рулон

Все это позволяет сформулировать постановку задачи теплообмена в системе горячий воздух — алюминиевый рулон. Постановка задачи включает описание процесса, расчетную схему теплообмена (см. рис. 1), дифференциальное уравнение теплопроводности, начальные и граничные условия:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \\ t|_{x=0} = t_b; \\ t|_{x=l} = t_b; \\ t|_{\tau=0} = t_0. \end{cases} \quad (1)$$

Для более компактной записи, удобной для дальнейшего математического анализа, перейдем к безразмерным переменным. В данном случае в процессе нагрева переменными величинами являются время  $\tau$ , координата  $X$ , температура алюминиевого листа  $t$ . Безразмерной переменной, характеризующей время нагрева, является критерий Фурье  $Fo = a\tau/l^2$ , где  $a$  — коэффициент теплопроводности;  $\tau$  — время нагрева, ч;  $l$  — ширина рулона, м. Безразмерную координату запишем так:  $\bar{x} = x/l$ , где  $x$  — продольная координата. Температуру в безразмерном виде запишем как  $T = \frac{t_b - t}{t_b - t_0}$ .

Проведенные преобразования позволяют записать постановку задачи нагрева алюминиевой пластины в безразмерной форме:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}; \\ T|_{\bar{x}=0} = 0; \\ T|_{\bar{x}=1} = 0; \\ T|_{Fo=0} = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку поставленная задача имеет нулевые, т. е. однородные граничные условия, это позволяет применять для ее решения метод Фурье. Используя данный метод и выполнив математические преобразования, запишем в окончательном виде решение задачи нагрева алюминиевого листа:

$$t = t_a - (t_b - t_0) 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos k\pi)}{k\pi} \sin(k\pi\bar{x}) \exp^{-(k\pi)^2 Fo}, \quad (3)$$

где  $k = 1, 5, 9, \dots, \infty$ ;  $\bar{x}$  — безразмерная ширина рулона.

Полученная математическая модель в системе горячий воздух — алюминиевый рулон позволяет исследовать теплообмен при нагреве ленты в процессе термообработки. Исследование проводилось для всего диапазона ширины рулона, предусмотренного ГОСТ 13726—97 от 0,5 до 2,0 м. В ходе исследования задавались промежутки времени и определялось изменение температуры по ширине рулона. Результаты исследования для рулонов шириной 0,5 и 2,0 м приведены на рис. 2, 3.

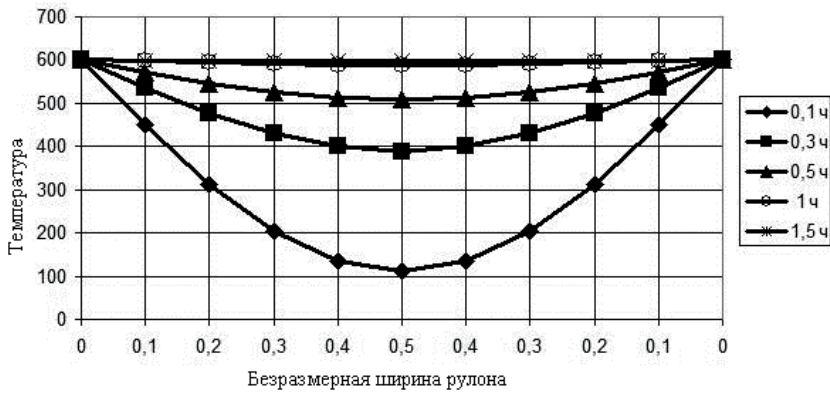


Рис. 2. Изменение температуры рулона шириной 0,5 м при нагреве горячим воздухом

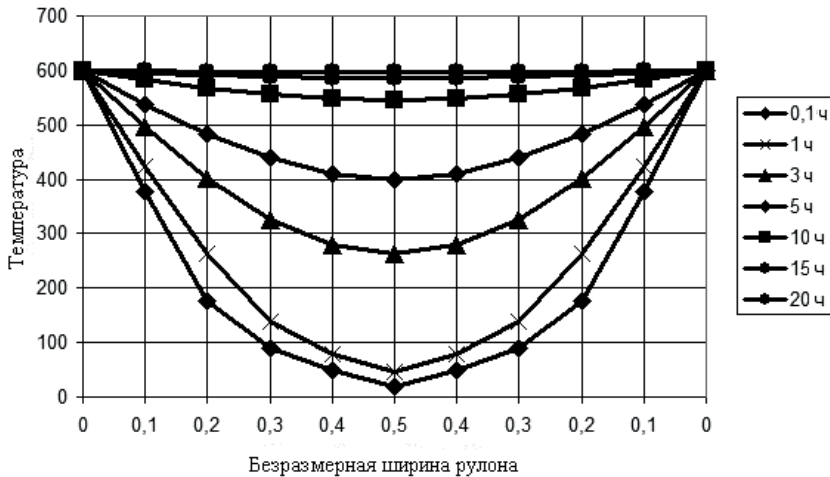


Рис. 3. Изменение температуры рулона шириной 2,0 м при нагреве горячим воздухом



## Литература

- [1] Одинцов М.В. Анализ процесса литья алюминия в кристаллизаторе с подвижным дном. *Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. заоч. науч. конф.* Санкт-Петербург, март 2011 г. Санкт-Петербург, Реноме, 2011, с. 126–129.
- [2] Горшенин А.С. Совершенствование процесса охлаждения алюминиевых слитков воздухом на основе моделирования регулируемого конвективного теплообмена. Дис. ... канд. тех. наук. 05.14.04 : защищена 07.11.2013 : утв. 11.03.2014. Самара, 2013, 151 с.
3. Горшенин А.С. Математическое моделирование при охлаждении ряда алюминиевых слитков. *Вестник СГАУ*, 2012, № 2 (33), с. 179–183.

УДК 669.295

## Исследование влияния состава и режимов термической обработки на свойства высоколегированных титановых сплавов со структурой механически стабильной бета-фазы

© Гуляев Алексей Михайлович, Гавзе Аркадий Львович

Россия, г. Москва, ОАО «Научно-исследовательский институт стали»

[mail@niistali.ru](mailto:mail@niistali.ru)

*Приведены результаты исследования комплекса механических свойств титановых сплавов системы Ti-Al-Cr-Mo-V, закаленных с различных температур в воду для выбора режимов термической обработки, обеспечивающих максимальные показатели пластичности и ударной вязкости плит и листовых полуфабрикатов в целях использования исследуемых материалов для деталей, подвергающихся интенсивным ударным нагрузкам.*

**Ключевые слова:** высокопрочные титановые сплавы, термическая обработка, средства индивидуальной защиты.

Установлено, что титановые сплавы с молибденовым эквивалентом  $K_{\beta} = 20 \dots 26$  при содержании алюминия 2,5...3,2 % независимо от типа бета-стабилизирующих элементов (изоморфных или эвтектоидообразующих) имеют одинаковые зависимости механических характеристик от температуры закалки.

Наиболее чувствительной характеристикой к изменению температуры закалки является ударная вязкость, максимальные значения которой соответствуют интервалу 850...900 °С (рис. 1). Структура сплавов в этом состоянии — полиэдрический твердый бета-раствор (100 %  $\beta$ -фазы). При этом наблюдаются наибольшие значения пластических характеристик (относительного удлинения и относительного поперечного сужения) при временном сопротивлении разрыву  $\sigma_{вр} = 850 \dots 900$  МПа.

Исследования влияния температуры испытания на свойства и характер разрушения образцов с U-образным надрезом при ударном изгибе показали, что исследованные сплавы в большей или меньшей степени, как и все металлические материалы с

ОЦК-решеткой, имеют склонность к хладноломкости. Однако очень высокий уровень ударной вязкости большинства исследованных сплавов при нормальной температуре дает основание надеяться на возможность их использования для деталей, подвергаемых интенсивным ударным нагрузкам при климатических условиях.

Оценка технологических характеристик закаленных сплавов с  $\beta$ -структурой указывает на возможность получения защитных деталей сложной формы типа корпусов защитных шлемов из листовых полуфабрикатов вытяжкой в холодном состоянии. В настоящее время такие детали изготавливают из сплавов с псевдо- $\alpha$ -структурой ОТ4-1 и ПТ-3В с пределом прочности  $\sigma_{вр} = 600 \dots 700$  МПа.

Баллистические испытания преград из исследуемых сплавов, проведенные с применением средств поражения калибров от 7,62 до 57 мм, показали их существенное преимущество по сравнению с используемыми в настоящее время титановыми сплавами с псевдо- $\alpha$  и  $(\alpha+\beta)$ -структурами, особенно при малых углах встречи поражающих средств с преградой.

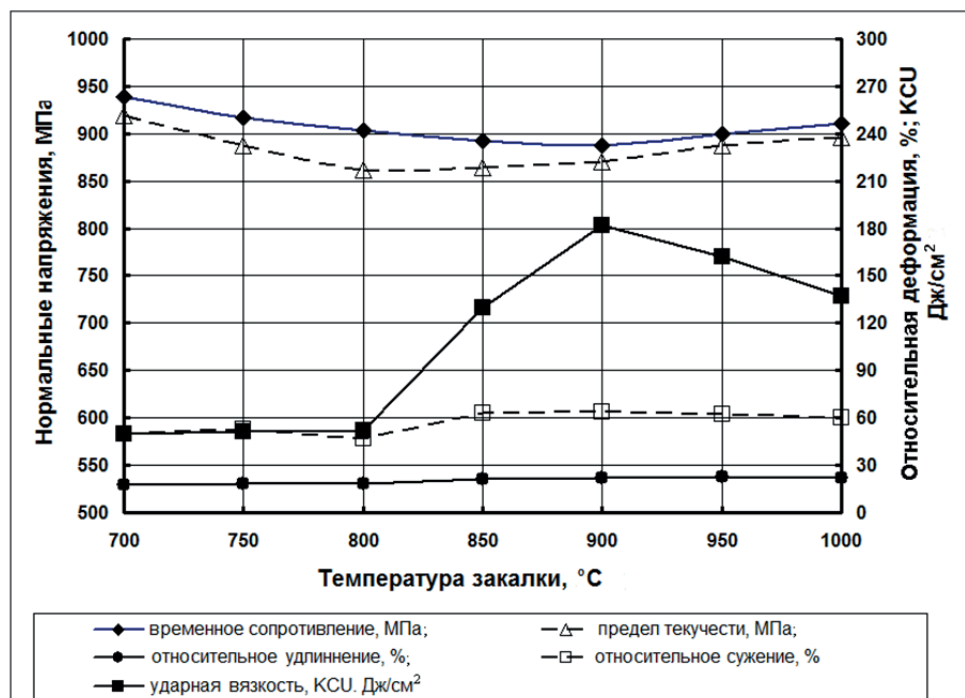


Рис. 1. Зависимость механических характеристик от температуры закалки

Результаты проведенной работы указывают на перспективность исследований, направленных на разработку новых композиций титановых сплавов со структурой механически стабильной бета-фазы для использования их в качестве защитных преград, в том числе для деталей средств индивидуального бронирования сложной формы.

Литература

- [1] Андреев А.Л., Аношкин Н.Ф., Добаткин В.И. *Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов*. Москва, Металлургия, 1978.
- [2] Гавзе А.Л., Степанов Е.И., Чусов С.Ю., Яньков В.П. Оценка свойств высоколегированных титановых сплавов, закаленных на бета-структуру, в качестве материалов для броневой защиты. *Вопросы оборонной техники. Науч.-техн. сб.* Вып. 1 (160) – 2 (161). Москва, 2011.
- [3] Гавзе А.Л., Яньков В.П., Чусов С.Ю., Бородина О.А. Механические и защитные свойства титановых сплавов со структурой метастабильной бета фазы. Сб. материалов V Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» 26–29 ноября 2013 г. Москва, ИМЕТ РАН, 2013, с. 295–297.

УДК 537.632/.636

**In-situ-исследования мартенситного перехода  
в сплаве Гейслера  $Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga$  в оптическом микроскопе  
в сильных магнитных полях до 14 Тл**

© Дильмиева Эльвина Тимербулатовна, Крапошин Валентин Сидорович,  
Коледов Виктор Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[kelvit@mail.ru](mailto:kelvit@mail.ru)

*Разработана оригинальная установка — оптический микроскоп, работающий в сильных магнитных полях до 14 Тл. Данная установка позволяет фиксировать на видеокамеру процесс эволюции мартенситных доменов при структурном переходе, а также в in-situ-режиме определять температуру образцов в большом количестве точек, что позволяет строить температурную карту образцов в процессе фазового перехода. В качестве образца для разработки методики исследований использован сплав Гейслера  $Ni_{2.16}Mn_{0.84}Ga$ . Приведен анализ графиков зависимости температуры в локальных точках образца и видеокадров при включении/выключении поля 14 Тл.*

**Ключевые слова:** мартенситный переход, Ni-Mn-Ga, in-situ-измерения, световой микроскоп, биттеровский магнит.

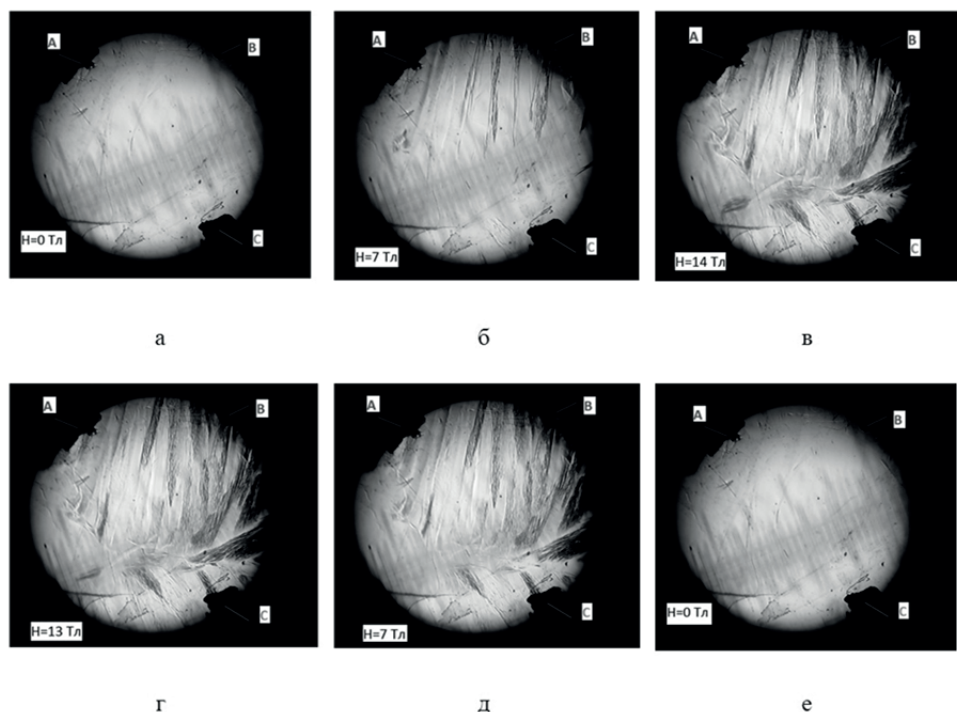
В последние годы активно ведутся исследования сплавов Гейслера и других магнитоупорядоченных веществ на наличие максимального магнитокалорического эффекта (МКЭ). МКЭ заключается в том, что при включении/выключении магнитного поля температура и энтропия магнитного вещества резко изменяются. МКЭ максимален вблизи фазовых магнитных и магнитоструктурных превращений.

МКЭ открыт в начале XX века. По данным системы Scopus, начиная с 1999 года экспоненциально растет количество работ, посвященных исследованию и применению материалов с МКЭ. С МКЭ связывают далеко идущие перспективы создания новых технологий охлаждения и нагрева вблизи комнатной температуры для широ-

кого применения в быту и промышленности. Эти работы обобщены в обзорах [1–3]. Имеется также обзор [4], в котором описаны десятки экспериментальных прототипов реальных магнитокалорических машин, созданных в различных странах мира. Однако, ни один из этих прототипов пока не может конкурировать с существующими традиционными системами на основе фреонов.

На пути широкого применения твердотельных магнитных материалов с МКЭ лежит ряд принципиальных трудностей. Основная проблема заключается в том, что недостаточно изучена физика взаимодействия подсистем твердого тела при фазовых превращениях в достаточно сильных магнитных полях.

Создание магнитокалорических машин невозможно без точного количественного ответа на вопросы: «Сколько и при какой температуре тепловой энергии можно преобразовать с помощью известных материалововедам соединений?», «С какими максимальными скоростями протекают магнитные, термомеханические, тепловые процессы в магнитных материалах в сильных магнитных полях?». И самое главное — «Каковы эти процессы?» Ответы на некоторые из этих вопросов могут быть получены только новыми прямыми экспериментальными методами.



**Рис. 1.** Эволюция мартенситной доменной структуры при магнитоуправляемом ФП в сплаве Гейслера  $\text{Ni}_{2.16}\text{Mn}_{0.84}\text{Ga}$  при начальной температуре образца  $T = 37^\circ\text{C}$ :

*a, б, в* — переход аустенит-мартенсит при включении магнитного поля до 14 Тл; *г, д, е* — переход мартенсит — аустенит при выключении магнитного поля до 0 Тл; *A, B, C* — микротермопары

Для проведения прямого эксперимента по изучению мартенситных переходов в сплавах Гейслера в магнитном поле была разработана специальная установка — оптический микроскоп, позволяющий фиксировать эволюцию мартенситного перехода

в сильных магнитных полях и одновременно строить температурную карту образца в большом количестве точек. Это дает возможность сопоставить движение границ зародышей фаз с локальным изменением температуры сплава. Установка состоит из оптической системы, видеокамеры, трех микротермопар типа Т и биттеровского магнита до 14 Тл. В качестве образца для разработки методики исследований был выбран перспективный сплав Гейслера  $\text{Ni}_{2.16}\text{Mn}_{0.84}\text{Ga}$ , фазовый мартенситный переход которой находится вблизи комнатной температуры в диапазоне 20...40 °С. В результате эксперимента зафиксирована эволюция мартенситного перехода в сильных магнитных полях до 14 Тл, а также изменения температуры образца в трех точках (рис. 1).

Анализ графиков зависимости температуры в локальных точках образца и видеокадров при включении/выключении поля 14 Тл показывает, что при зарождении низкотемпературной мартенситной фазы (рис. 1, а–в) локальная температура повышается на 1–2 градуса. При появлении высокотемпературной аустенитной фазы локальная температура понижается (рис. 1, г–е). Можно сделать вывод, что изучение сложных процессов при магнетоиндуцированных магнетоструктурных ФП позволит глубже понять природу взаимодействия магнитной подсистемы и кристаллографической структуры материалов, определяющих величину МКЭ.

#### Литература

- [1] Moya X., Kar-Narayan S., Mathur N.D. Caloric materials near ferroic phase transitions. *Nature Materials*, 2014, vol. 13, pp. 439–450.
- [2] Planes A., Manosa L., Acet M. Magnetocaloric Effect and its Relation to Shape-memory Properties in Ferromagnetic Heusler Alloys. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2009, vol. 21, p. 233201.
- [3] Tishin A.M., Spichkin Y.I. *The Magnetocaloric Effect and its Applications*. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2003.
- [4] Yu Bingfeng, Liu Min, Egolf Peter W., Kitanovski A. A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. *International Journal of Refrigeration*? 2010, vol. 33, pp. 1029–1060.

УДК 669.245

## Влияние легирующих добавок на повышение эксплуатационных свойств жаропрочных никелевых сплавов (состояние проблемы)

© Дин Кай Цзянь, Семенов Михаил Юрьевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

[kjding222@163.com](mailto:kjding222@163.com)

*Рассмотрены литературные данные о легировании жаропрочных сплавов на основе никеля. Установлено, что наряду с основными легирующими элементами, такими как алюминий, хром, кобальт, в состав указанных сплавов вводятся микролегиру-*

*щие добавки рения, циркония, ниобия, иттрия, бора, а также редкоземельных металлов, влияющих на эксплуатационные свойства данных сплавов. Наиболее существенно на длительную прочность влияет легирование рением. Таким образом, при разработке математических моделей образования пор при эксплуатации жаропрочных сплавов необходимо учитывать влияние их химического состава на скорость диффузионных процессов.*

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, никелевые сплавы, легирование, длительная прочность, алюминий, рений, редкоземельные металлы.

Жаропрочные никелевые сплавы относятся к классу материалов, называемых также в зарубежной научной литературе суперсплавами (superalloys). Эти сплавы, созданные преимущественно на основе элементов VII группы периодической системы (таких, как Ni, Co, Fe), характеризуются высокими жаропрочностью и жаростойкостью, в связи с чем применяются для деталей, эксплуатирующихся в условиях высоких температур (близких к температурам плавления) и механических нагрузок. Характеристики сред, в которых эксплуатируются указанные материалы, обуславливают необходимость обеспечения высокой стойкости к газовой коррозии [1].

Никелевые суперсплавы применяются в конструкциях моторов реактивных самолетов, стационарных паро- и газовых турбин, ядерных реакторов, нефтехимического оборудования и т. д. Наиболее широко никелевые жаропрочные сплавы используют для изготовления дисков и лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД).

Особые свойства никеля, открывающие возможность для разработки на его основе сплавов с наиболее высокой жаропрочностью, обуславливают его преимущества перед другими металлами как основы для жаропрочных сплавов. Так никель характеризуется высоким модулем нормальной упругости, высокой пластичностью, низким коэффициентом линейного расширения, высокой теплопроводностью, и, что особенно актуально, низким коэффициентом самодиффузии. Кроме того никель обладает высокой жаростойкостью, обусловленной низкой химической активностью по отношению к компонентам взаимодействующих газовых сред. К преимуществам никеля относится (в отличие от железа и кобальта) отсутствие полиморфных превращений в пределах рабочих температур жаропрочных сплавов, а также высокая растворимость в ГЦК решетке твердого раствора  $\gamma$ -Ni легирующих элементов (особенно переходных металлов) [2].

Вместе с тем современные жаропрочные материалы не удовлетворяют требованиям к эксплуатационным свойствам деталей перспективных ГТД шестого поколения, которые, как предполагается, будут характеризоваться соотношением тяги (кгс) к массе, равным 20:1. Для сравнения, это соотношение для двигателей четвертого поколения (1970–1975) составляет 8:1, а для современных двигателей пятого поколения (1985–2000) — 10:1. Для достижения таких характеристик новых ГТД требуется повысить рабочую температуру лопаток и дисков турбин примерно на 300...400 К. Одновременно необходимо повысить ресурс деталей двигателя в 2–3 раза [3].

Таким образом, перед прикладной наукой в области металловедения жаропрочных сплавов стоит актуальная задача обеспечить дальнейшее повышение работоспособности материалов в условиях комплексного воздействия высоких температур, напряжений и агрессивной среды.

Как показал анализ научной литературы по данной проблеме, основной характеристикой жаропрочности является предел длительной прочности, который определя-

ется для различного времени испытаний под воздействием силовой нагрузки и высокой температуры (например,  $\sigma_{100}$  [МПа] — для 100 ч испытаний;  $\sigma_{1000}$  — для 1000 ч и т. д.).

Повышение длительной прочности жаропрочных сплавов на основе никеля обеспечивается различными путями, в том числе за счет повышения прочностных свойств твердого раствора, а также введения частиц карбидов (типа MeC, Me<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Me<sub>6</sub>C), боридов и интерметаллидов [4, 5].

На прочность твердого раствора положительно влияют практически все легирующие элементы никелевых жаропрочных сплавов, особенно существенно присутствующие в достаточно большом количестве Co, Cr, Al. Следует отметить важное значение для повышения прочности твердого раствора микролегирующих добавок Zr, Nb, а также редкоземельных металлов (РЗМ) лантана и церия, которые стабилизируют границы зерен и препятствуют их росту [6]. Микроскопические добавки церия, лантана и иттрия являются также рафинирующими: они эффективно очищают границы зерен от нежелательных примесей.

Добавки таких тугоплавких металлов, как вольфрам, молибден и в меньшей степени хром, также повышают жаропрочность твердого раствора за счет уменьшения коэффициента самодиффузии никеля [5].

К микролегирующим добавкам следует отнести бор, который обычно вводится в жаропрочные сплавы в количестве не более 0,015 % по массе и образует с хромом и молибденом высокопрочные бориды, одновременно упрочняющие сплав по гетерофазному механизму [7] и, вероятно, замедляющие рост зерен твердого раствора.

Хром, вольфрам и молибден, как общеизвестно, являются также сильными карбидообразующими элементами. Упрочнение карбидами большое значение имеет для литейных жаропрочных сплавов.

Среди интерметаллидов для упрочнения никелевых сплавов особую роль играет  $\gamma'$ -фаза на основе Ni<sub>3</sub>Al, обладающая, как и  $\gamma$ -Ni, ГЦК-кристаллической решеткой с близким значением параметра решетки, в связи с чем увеличение доли когерентных частиц  $\gamma'$ -фазы эффективно повышает длительную прочность жаропрочных сплавов (рис. 1) [2, 8].

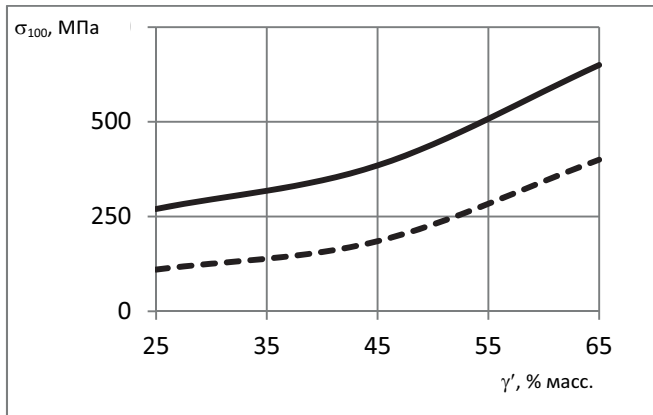


Рис. 1. Зависимость длительной прочности жаропрочного сплава от концентрации  $\gamma'$ -фазы ( $\gamma'$ ): сплошная кривая — при 800 °С, пунктирная — при 900 °С [8]

Увеличение количества  $\gamma'$ -фазы достигается за счет микролегирования титаном, ниобием, танталом и гафнием [9].

Для повышения эксплуатационных свойств монокристаллических лопаток ГТД из жаропрочных никелевых сплавов наиболее перспективным является легирование рением (табл. 1). Ренийсодержащие сплавы имеют наиболее высокий температурный уровень работоспособности и повышенные характеристики длительной прочности. Для опытного сплава с 6...7 % Re достигнуто рекордное значение длительной прочности при 1000 °С  $\sigma_{100} > 300$  МПа, что соответствует требованиям, предъявляемым к монокристаллическим лопаткам для ГТД шестого поколения. Применение ренийсодержащих сплавов обеспечивает возможность повышения температуры газа на входе в турбину до 2000–2100 К, снижение расхода охлаждающего воздуха на 30...50 % и увеличение ресурса лопаток при равном расходе воздуха в 2–4 раза [10].

Таблица 1

**Влияние содержания Re на жаропрочные свойства никелевых сплавов [10]**

Сплав	Длительная прочность при 1000 °С, МПа	
	$\sigma_{100}$	$\sigma_{1000}$
ЖС30М (0 % Re)	215	147
ЖС36 (2 % Re)	250	157
ЖС32М (4 % Re)	265	171
Опытный сплав (6...7 % Re)	284–304	186–196

Как показано в работе [11], увеличение концентрации рения приводит к замедлению роста частиц  $\gamma'$ -фазы, что обеспечивает более высокие прочностные свойства жаропрочного сплава за счет сохранения дисперсности частиц интерметаллида и, как можно предположить, сохранения их когерентности с твердорастворной матрицей.

Таким образом, в настоящее время в жаропрочных сплавах на никелевой основе применяют различные легирующие элементы, эффективно влияющие на длительную прочность. В этой связи, при разработке моделей образования пор в жаропрочных сплавах в ходе их эксплуатации при рабочих температурах ГТД необходимо учитывать влияние химического и фазового состава сплавов на диффузионные процессы.

## Литература

- [1] Pan Zhiyong, Wang Minpu, Li Zhou, and all. Effect of Trace Elements on Properties of Ni-Si Alloy. *Bulletin materials*, 2007, no 5 (21), pp. 86–90.
- [2] Deng Wei, Guo Jian-ting. Improvement of Grain-Boundary Structure in  $Ni_3Al$  alloys by microalloying and macroalloying methods. *Journal of Nuclear Techniques*, 1994, no 17 (10), pp. 587–589.
- [3] Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Ригин В.Е. *Способ производства литейных жаропрочных сплавов на основе никеля*. Пат. 2344186 Российская Федерация: МПК C22C1/02. Заявл. 17.01.2007; опубл. 27.07.2008.
- [4] Guo Jian-ting. Effect of Carbon and Boron on Mechanical Properties and Microstructure of an Ion-base Superalloy. *Journal of Acta Metallurgica Sinica*, 1990, no 26 (1), pp. 30–37.
- [5] Li Meishuan, Zhang Yaming. A Review On Effect Of Reactive Elements On Oxidation Of Metals. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2001, vol. 13, no 6, pp. 333–337.
- [6] Guo Shou-ren, Fan He-ming, Effect of Rare — Earth Elements on the Mechanical Properties and Chemical Properties of a Ni–Cr System Heat Resisting Alloys. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1987, no 5 (1), pp. 51–56.



- [7] Guo Jian-ting. Effect of Several Minor Elements on Superalloys and Their Mechanism. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, vol. 21, no 3, pp. 465–475.
- [8] Мубояджян С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. *Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД*. Екатеринбург, Квист, 2008, 207 с.
- [9] Deng Wen, Xiong Liang-yue, Guo Jian-ting. Zr and Si Microdefects in Ni<sub>3</sub>Al Alloys. *Chinese Science Bulletin*, 1994, no 39 (12), pp. 993–996.
- [10] Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. — 2000. — № 3. — С. 26–37.
- [11] Ma Shu-wei, Li Jia-rong, Hou Shu-e, and all. Effect of Re on Coarsening Behavior of  $\gamma'$  phase in Ni-base superalloy. *Journal of Aeronautical Materials*, 2000, vol. 20, no 3, pp. 11–15.

УДК 67.017

## Формирование заданного комплекса свойств из гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП

© Логачева Алла Игоревна<sup>1</sup>, Жукова Татьяна Геннадьевна<sup>2</sup>,  
Курганова Юлия Анатольевна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, ОАО «Композит»,

<sup>2</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[tat8341945@yandex.ru](mailto:tat8341945@yandex.ru)

*Рассмотрен процесс формирования заданного комплекса свойств из гранулируемого сплава ЭП741НП для диска газотурбинного двигателя. Представлено обоснование выбора режима термической обработки сплава центробежным плазменным распылением для достижения комплекса свойств, обеспечивающих оптимальную работу диска в условиях высокотемпературного нагружения.*

**Ключевые слова:** диск газотурбинного двигателя, технология гранульной металлургии, центробежное плазменное распыление, термическая обработка.

В настоящее время активно ведутся разработки по усовершенствованию дисков газотурбинных двигателей (ГТД) в авиа- и ракетостроении. Диск ГТД входит в состав ротора турбины и служит для установки рабочих лопаток, создающих крутящий момент, и передачи этого момента с лопаток на вал. Диск расположен в роторе после камеры сгорания и на него оказывает воздействие широкий спектр нагрузок.

Повышение требований к материалам по жаропрочности и связанное с этим усложнение состава сплавов привело к тому, что стало проблематичным получение заготовок деталей.

Решением данной проблемы является технология гранульной металлургии.

Гранульная металлургия — технология, позволяющая получать новые материалы, в том числе композиционные, с заданными свойствами. Эта технология включает в себя такие этапы, как получение порошков, изготовление заготовок и их последующую обработку, что дает возможность изготавливать изделия с заданным

комплексом свойств, размеров и формы без использования последующей механической обработки.

В ОАО «Композит» для получения гранул используют центробежное плазменное распыление быстровращающегося электрода на установке центробежного распыления (УЦР).

Основные этапы технологии гранульной металлургии:

- 1) контроль качества исходной заготовки для получения гранул;
- 2) распыление жидкого сплава (металла);
- 3) рассев гранул, сепарация и очистка их от металлических и неметаллических включений;
- 4) засыпка гранул и их герметизация в капсулах;
- 5) газостатическая обработка;
- 6) термическая обработка (ТО).

Определяющим этапом формирования комплекса свойств является проведение соответствующего режима ТО. Для гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП выбран следующий режим ТО:

*закалка*: загрузка при 700 °С, нагрев до 1210 °С, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе;

*старение*: загрузка при 700 °С, нагрев до 870 °С, выдержка 16 ч, охлаждение с печью до 760 °С, выдержка 16 ч, охлаждение на воздухе.

После проведения данного режима термической обработки была получена равноосная мелкозернистая структура с отсутствием карбидной сетки по границам гранул. Содержание  $\gamma'$ -фазы в количестве 57...60 % (мас.).

Были проанализированы механические свойства достигаемых при данной структуре после указанного режима термической обработки:  $\sigma_{\text{в}} = 1300$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 870$  МПа,  $\delta_5 = 10,3$  %,  $\psi = 12$  %.

## Литература

- [1] Берсенева А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И. Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул. *Вестник МАИ*, 2008, № 3, с. 2–8.
- [2] Тарасенко Л.В., Унчикова М.В. *Жаропрочные никелевые литейные сплавы равноосной и направленной кристаллизации*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, с. 4–17.
- [3] Тарасенко Л.В. *Специальные материалы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, с. 39–106.
- [4] Гарибов Г.С. Современный уровень развития порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов. *Технология легких сплавов*, 2000, № 6, с. 36–58.
- [5] Бурлаков И.О. Особенности формообразования дисков газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов с применением физической модели жидкофазного спекания гранул. *Известия Московского государственного машиностроительного ун-та*, 2008, № 1, с. 161–163.

УДК 621.74 + 669.018

## Получение композита Al–TiC в расплаве при пониженной температуре

© Ионов Максим Константинович, Латухин Евгений Иванович

Россия, г. Самара, Самарский государственный технический университет

[ionovmk@gmail.com](mailto:ionovmk@gmail.com)

*Рассмотрена проблема устойчивого инициирования синтеза карбидов титана при низких температурах расплава алюминия.*

**Ключевые слова:** композиционный материал Al–TiC; самораспространяющийся высокотемпературный синтез TiC; образование интерметаллида; устойчивое инициирование реакции; применение термитной смеси.

Сплавы на алюминиевой основе нашли широкое применение в космической, авиационной и многих гражданских отраслях промышленности и на сегодняшний день занимают второе место в мире по объемам производства. Поэтому проблема повышения механических и эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов до сих пор остается актуальной. Перспективным способом получения композиционных материалов на основе алюминия является способ синтеза упрочняющей керамической фазы непосредственно в расплаве. Известно [1], что при получении композита Al–TiC из порошковых экзотермических смесей непосредственно в расплаве алюминия при температурах ниже 900 °С реакция образования карбида титана проходит неустойчиво. Применение флюсов, например  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  или  $\text{K}_2\text{AlF}_6$ , активизирует реакцию, но приводит к загрязнению получаемого материала шлаковыми включениями, а также влияет на размер армирующей фазы TiC и фракционный состав порошка титана [2]. Актуальность получения композита Al–TiC при пониженной температуре заключается в относительных чистоте и качестве получаемого материала и в экономически выгодном производстве. Понижение температуры подавляет процессы агломерации частиц армирующей фазы TiC.

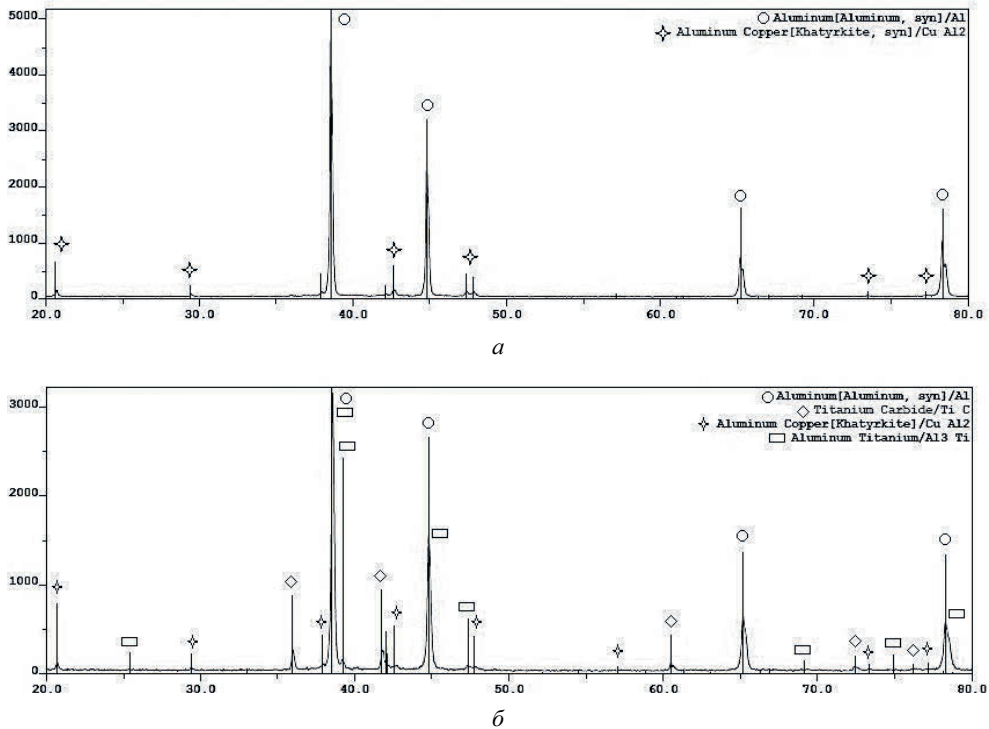
Целью данной работы является исследование возможности образования композиционного материала Al–TiC при пониженной температуре расплава с использованием термитной смеси.

Реакция титана и углерода инициируется при температурах, близких к температуре плавления титана (1 700 °С) [3]. Поэтому синтез карбида титана из порошковых экзотермических смесей непосредственно в расплаве алюминия, вероятно, начинается с образования интерметаллида и последующего локального повышения температуры. Причиной неустойчивого прохождения реакции синтеза карбида титана могут быть особенности взаимодействия расплава алюминия со смесью порошков титана и углерода.

Проблему устойчивого инициирования реакции синтеза карбида титана при низких температурах расплава алюминия можно решить следующим образом: активировать реакцию образования интерметаллида  $\text{Al}_3\text{Ti}$  применением термитных смесей.

Опыты проводили при температуре  $T = 850$  °С. Исследование фазового состава полученных образцов определяли методом рентгенофазового анализа. Результаты

рентгенофазового анализа показали, что материал, полученный без применения термита (рис. 1, *a*), имеет состав, аналогичный исходному сплаву AM5. На рис. 1, *б* видно, что применение термита обеспечило упрочнение сплава частицами TiC и Al<sub>3</sub>Ti. Без использования термита аналогичный состав получали при температурах около 950°C [1].



**Рис. 1.** Рентгенограммы материалов, полученных без использования термита (*a*) и с использованием термита (*б*)

В заключение можно отметить, что применение термитной смеси для инициирования реакции синтеза карбида титана в расплаве алюминия при температурах ниже 900 °С обеспечивает устойчивое прохождение реакции.

### Литература

- [1] Луц А.Р., Макаренко А.Г. *Самораспространяющийся высокотемпературный синтез алюминиевых сплавов*. Самара, СамГТУ. 2008, 175 с.
- [2] Луц А.Р., Амосов А.П., Ермошкин П.А. *Изв. вузов. ПМФП*, 2013, № 3, с. 28–35.
- [3] Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. *Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 567 с.

## Исследование морфологии поверхности пленок цирконата-титаната свинца, сформированных на кремниевых подложках

© Коваленко Дмитрий Александрович, Петров Виктор Владимирович

Россия, г. Таганрог, Южный федеральный университет (ЮФУ)

[kovalenko.mitya@yandex.ru](mailto:kovalenko.mitya@yandex.ru)

*Описаны совместные исследования центров коллективного пользования «Микросистемная техника и интегральная сенсорика» Южного федерального университета (ЦКП «МСТ и МСМС» ЮФУ) и НОЦ «Нанотехнологии» Южного федерального университета касательно морфологии поверхности тонких пленок цирконата-титаната свинца (ЦТС). Исследование морфологии поверхности образцов пленок ЦТС проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в зондовой нанолaborатории Ntegra (NT-MDT, Россия) в полуконтактном режиме в областях размером  $5 \times 5$  мкм. Статистические параметры морфологии поверхности определялись с помощью программы Gwyddion. По результатам АСМ были выявлены среднеквадратичный параметр шероховатости поверхности ( $R_q$ ) и значения фрактальной размерности  $D_f$  фрактальной поверхности ЦТС, которые показывают, что исследуемые поверхности сегнетоэлектрических пленок, сформированных на окисленных кремниевых подложках хотя и близки к двумерной структуре ( $D_f = 2$ ), но обладают также и некоторыми свойствами трехмерности. Кроме того, были построены профили поверхности сегнетоэлектрических пленок ЦТС, из которых видно то, что данные профили имеют в своей основе однотипные структуры.*

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, сегнетоэлектрические пленки, цирконат-титанат свинца, морфология поверхности, среднеквадратичный параметр шероховатости поверхности, фрактальная размерность.

В последнее десятилетие сегнетоэлектрические тонкие пленки нашли широкое применение при создании целого ряда устройств начиная с датчиков динамических деформаций и заканчивая устройствами с энергонезависимой памятью, обладающими сверхвысокой плотностью записывания. Особое внимание уделяется исследованию физических характеристик и методов получения пленок для создания тонкопленочных сегнетоэлектрических конденсаторов с заданными свойствами. В этой связи встает вопрос о внедрении новых методов контроля для оптимизации технологических процессов получения тонких пленок. В настоящее время находит все большее применение недавно разработанный метод атомно-силовой микроскопии (АСМ).

В лаборатории центра коллективного пользования «Микросистемная техника и интегральная сенсорика» Южного федерального университета (ЦКП «МСТ и МСМС» ЮФУ) методом реактивного высокочастотного распыления в кислородной атмосфере были получены образцы сегнетоэлектрических пленок ЦТС на окислен-

ных кремниевых подложках. Исследование морфологии поверхности образцов на основе пленок ЦТС проводили в НОЦ «Нанотехнологии» Южного федерального университета (г. Таганрог) методом АСМ в зондовой нанолaborатории Ntegra (NT-MDT, Россия) в полуконтактном режиме в областях размером  $5 \times 5$  мкм. Статистические параметры морфологии поверхности определялись с помощью программы Gwyddion.

Были обработаны 65 536 точек изображения поверхности каждого образца для построения функции. Такое число точек является достаточным для определения топологии аттрактора [1, 2]. Среднеквадратичный параметр шероховатости поверхности ( $R_q$ ) описывает отклонения реальных поверхностей от номинально гладких. Реальная поверхность состоит из беспорядочно расположенных выступов и впадин. Атомно-силовая микроскопия является одним из основных методов измерения шероховатости [3].

В результате вычислений значения фрактальной размерности  $D_f$  фрактальной поверхности ЦТС получаются равными в интервале от 2,27 до 2,43. Интерпретация дробной размерности заключается в том, что исследуемые поверхности сегнетоэлектрических пленок ЦТС, сформированных на окисленных кремниевых подложках, хотя и близки к двумерной структуре ( $D_f = 2$ ), но обладают также и некоторыми свойствами трехмерности [4]. Параметры нелинейной динамики образцов сегнетоэлектрических пленок ЦТС на окисленных кремниевых подложках представлены в табл. 1.

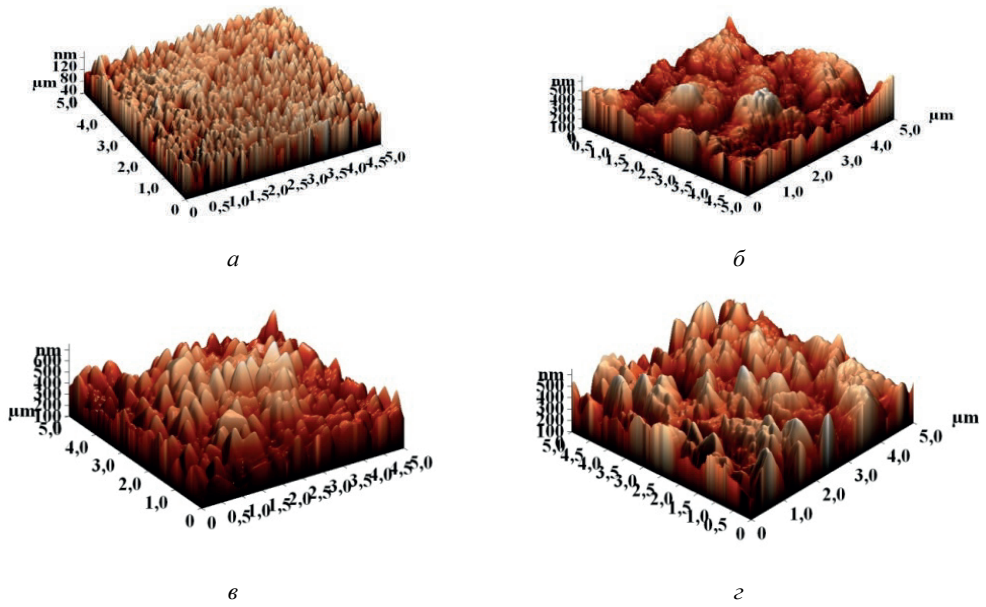
Таблица 1

**Параметры нелинейной динамики**

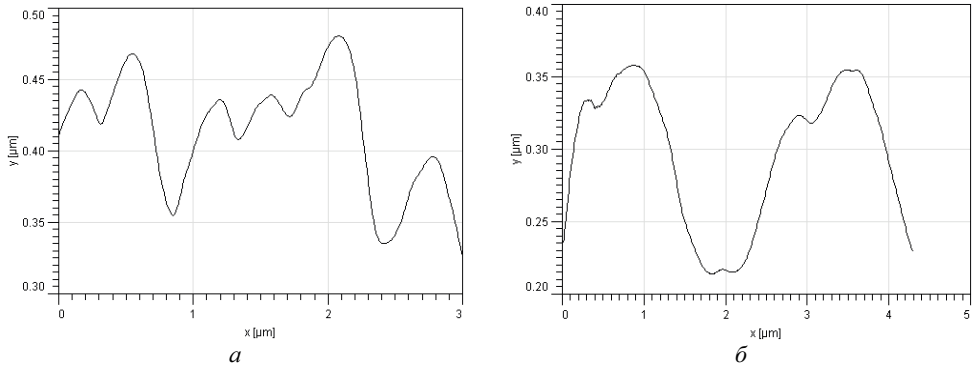
№ п/п	$D_f$	$K$	$R_q$ , нм
1	2,43	1,08	7,9
2	2,41	1,21	15
3	2,41	1,16	24,1
4	2,27	1,15	40,1
5	2,34	1,37	31,8
6	2,31	1,28	44,6

На рис. 1 представлены изображения морфологии поверхности образцов сегнетоэлектрических пленок ЦТС, сформированных на окисленных кремниевых подложках. Проведенные исследования показали, что применение различных технологических режимов формирования сегнетоэлектрической пленки ЦТС приводит к существенному изменению морфологии их поверхности.

С помощью программы Gwyddion были построены профили поверхности сегнетоэлектрических пленок ЦТС (рис. 2). На рисунке видно, что профили поверхности разных образцов отличаются друг от друга в зависимости от технологических режимов формирования той или пленки, однако имеют в своей основе однотипные структуры. В результате можно сделать вывод о том, что процесс формирования сегнетоэлектрических пленок ЦТС на окисленных кремниевых подложках происходит равномерно по всей поверхности, позволяя получать однородные сегнетоэлектрические пленки ЦТС.



**Рис. 1.** АСМ-изображения морфологии поверхности сегнетоэлектрических пленок ЦТС, полученных при различных технологических условиях



**Рис. 2.** Профилограммы образцов сегнетоэлектрических пленок ЦТС сформированных на окисленных кремниевых пластинах при технологических параметрах:  
 а —  $t = 60$  мин,  $P = 0,51$ ,  $N_{np} = 290$ ; б —  $t = 30$  мин,  $P = 0,6$ ,  $N_{np} = 290$

*Работа выполнена при поддержке базовой части государственного задания Минобрнауки России (проект № 1509, задание № 2014/174).*

## Литература

- [1] Бодягин Н.В., Вихров С.П. Пространственно-временной хаос в процессе образования твердотельного состояния. Письма в ЖТФ, 1997, т. 23, № 19, с. 77–80.
- [2] Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. *Нестационарные структуры и диффузионный хаос*. Москва, Наука, 1992, 511 с.
- [3] Bony A. *Study of Nano-Roughness for Silica-on-Silicon Technology by Scanning Electron Microscopy and Light Scattering*. Doctorate degree thesis, Université Louis Pasteur, 2004.
- [4] Торхов Н.А. Формирование структуры собственного оксида на поверхности n-GaAs при естественном окислении на воздухе. *Физика и техника полупроводников*, 2003, т. 37, вып. 10, с. 1205–1213.

УДК 621.785.53+621.793.1

## Инженерия поверхности стальных деталей с использованием химико-термической обработки и вакуумных ионно-плазменных технологий

© Ковальчук Алексей Владимирович, Константинов Валерий Михайлович

Республика Беларусь, г. Минск,  
Белорусский национальный технический университет

[a-v-kov@yandex.com](mailto:a-v-kov@yandex.com)

*Предложен способ комплексной упрочняющей обработки прецизионных стальных деталей клапана управления гидросилителя рулевого механизма автомобилей КамАЗ, включающий химико-термическую обработку в порошковой среде и последующее контролируемое магнетронное напыление покрытия на базе системы Ti-N. Способ базируется на имеющейся технологии упрочнения деталей и позволяет получить на их рабочей поверхности микрокомпозиционный материал с высоким уровнем свойств.*

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, нитроцементация, PVD покрытие, комплексная обработка, прецизионные детали.

Определяющую роль в стойкости деталей к изнашиванию играют их поверхностные слои. В этой связи перспективной для повышения эксплуатационной стойкости деталей является инженерия их поверхностей с использованием различных способов. К одному из наиболее эффективных и традиционно применяемых методов поверхностного упрочнения сталей относится химико-термическая обработка. Она позволяет получать на поверхности монофазные и многофазные, слоистые и градиентные структуры, значительно отличающиеся от основы по химическому составу и свойствам. Это позволяет использовать химико-термическую обработку для повышения свойств деталей, работающих в самых различных условиях.

Приоритетным направлением в инженерии поверхности деталей узлов трения является создание высокотвердых наноструктурированных PVD-покрытий [1, 2]. Ис-



пользование указанных покрытий для повышения износостойкости стальных изделий зачастую ограничивается механическими характеристиками основы, значения которых существенно ниже их значений для покрытий. Важность фактора подожки в формировании механических свойств поверхностей с покрытиями подтверждается многочисленными исследованиями [3–5]. Достоверно установлено влияние основы на диорометрические и трибологические свойства поверхности с покрытием, несущую способность покрытий, а также стойкость поверхностей с покрытиями в условиях воздействия агрессивных сред и высоких температур [6, 7].

Поэтому одним из перспективных направлений поверхностного упрочнения с нанесением таких покрытий является комплексная обработка, включающая предварительную упрочняющую обработку основы и последующее нанесение высокотвердого покрытия. Такие исследования на сегодня представляют значительный научный и практический интерес, а отдельные разработки уже нашли применение в различных отраслях техники. В результате комплексной обработки на поверхности стальной детали формируется микрокомпозиционный материал или топокомпозит [5], наблюдаемые свойства которого могут превосходить их значения для основы и покрытия в отдельности.

Однако создание таких поверхностных композиций в условиях реального производства с устоявшейся материаловедческой практикой и имеющимся оборудованием вызывает определенные трудности. Уровень экономического развития и технической обеспеченности машиностроительных предприятий зачастую не позволяет внедрить уже известные иностранные технологии. Себестоимость их из-за установки дорогостоящего оборудования и применения высоколегированных конструкционных и инструментальных материалов в разы превышала бы себестоимость изделий, упрочняемых по традиционным, технически менее эффективным технологиям. А экономическая целесообразность имела бы место только в случае повышения ресурса изделий на тот же порядок, что и повышение себестоимости их обработки, но не более чем ресурс узла (конструкции, машины) в целом. Все это накладывает жесткие ограничения по внедрению и использованию передовых технологий получения поверхностных композитов. Поэтому актуальными задачами являются разработка отечественных ресурсоэффективных технологий, базирующихся на уже имеющихся на предприятиях технологиях с минимальными техническими затратами, в то же время достаточными для повышения технико-экономических показателей изделий, а также переработка и адаптирование современных зарубежных технологий к реальным условиям предприятий с учетом имеющегося на них оборудования и ресурсов.

В данной работе предложен вариант замены упрочняющей обработки прецизионных деталей гидроусилителя рулевого механизма (ГУР) автомобилей, существующая технология упрочнения которых не обеспечивает свойств, соответствующих новому уровню требований.

Так, представлен вариант комплексной обработки плунжера реактивного (рис. 1) клапана управления ГУР автомобилей КамАЗ. В узле находится два плунжера, отвечающих за надежность работы всего клапана управления ГУР и по сути за надежность работы рулевого механизма в целом. Условия работы реактивного плунжера можно описать как полусухое трение под напряжением (от перекосов уплотнительных колец клапана управления и пружин).

В настоящее время плунжер реактивный изготавливается из стали 15Х на ОАО «Борисовский завод «Автогидроусилитель». Существующая технология упрочнения

плунжеров предусматривает нитроцементацию при температуре 850...870 °С в течение 4...6 ч, последующую полную закалку и низкий отпуск. Глубина получаемого при этом упрочненного слоя составляет 0,4...0,7 мм, твердость — до 55...57 HRC. Также допускается цементация на глубину 0,5...0,7 мм. Опыт применения реактивных плунжеров, упрочненных по данной технологии, показал неэффективность сочетания термической и химико-термической обработки для данной марки стали и для условий работы упрочняемых деталей.

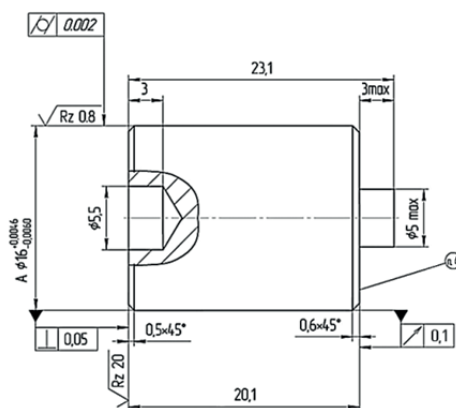
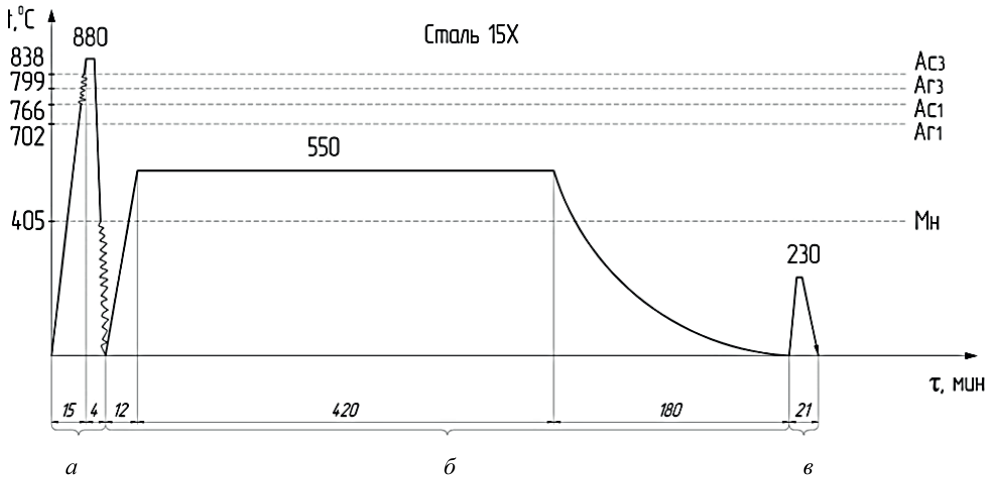


Рис. 1. Чертеж плунжера реактивного клапана управления гидроусилителя руля

В качестве альтернативы существующей технологии можно предложить формирование на рабочей поверхности деталей градиентного упрочненного подслоя, получаемого в результате низкотемпературной нитроцементации, и покрытия на основе наноструктурированного нитрида титана (рис. 2). Такая поверхностная композиция имеет гарантированно более высокий уровень свойств и обеспечивает уход от объемной термической обработки как окончательной, создающей трудности для соблюдения точности деталей. Получаемый на поверхности плунжера композит будет обладать более высоким уровнем свойств. Технология его получения базируется на существующей технологии упрочнения и позволяет совместить операцию отпуска с химико-термической обработкой. Последующее нанесение покрытия методом магнетронного напыления является довольно распространенным. В результате такой обработки отсутствует коробление деталей и необходимость в доводочных операциях.

Микротвердость поверхности детали после низкотемпературной нитроцементации может достигать 1800...2200 Мпа [8], микротвердость покрытия TiAlN — 32...38 ГПа [9]. В то же время нанотвердость получаемого в результате обработки микрокомпозиционного материала с покрытием TiAlN на поверхности детали может достигать 52 ГПа при наблюдаемых значениях модуля упругости на уровне 350 ГПа [10]. Это связано с тем, что помимо устранения продавливания покрытия (эффект снижения его несущей способности [3]) повышаются наблюдаемые значения его свойств на упрочненной основе за счет вклада основы в упругое восстановление покрытия и наноиндентационный отклик поверхности.



**Рис. 2.** Режимы упрочняющей обработки плунжера реактивного:

*а* — закалка, масло: камерная печь СНЗ-6.10.5/10; *б* — отпуск, совмещенный с низкотемпературной нитроцементацией: шахтная печь СШЗ-6.6/7; *в* — нанесение PVD покрытия: установка магнетронного напыления Caroline D12 A1

Таким образом, предложен способ упрочняющей обработки прецизионных стальных деталей ГУР с использованием химико-термической обработки и магнетронного напыления покрытия на базе нитрида титана, базирующийся на имеющейся технологии упрочнения деталей и позволяющий получить на их поверхности микрокомпозиционный материал с высоким уровнем свойств. Кроме того, предложенный способ позволяет уйти от объемной термической обработки, тем самым уменьшив припуски на механическую обработку. Способ не требует значительного материального переоснащения, а его внедрение в технологический процесс не требует остановки производства.

### Литература

- [1] Gavaleiro A., De Hosson J.T. *Nanostructured Coating*: eds. Berlin, Springer-Verlag, 2006, 648 p.
- [2] Hocking M.G., Vasantasree V., Sidky P. *Metallic and Ceramic Coatings*. Harlow, Longman scientific & technical, 1989, 670 p.
- [3] Voronin N.A. The Influence of Strain Hardening of a Base Material on the Effective Characteristics of a Topocomposite. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no 6, pp. 539–545.
- [4] Ковальчук А.В., Константинов С.В. Фактор подложки в формировании свойств PVD покрытий. Теоретические и практические проблемы развития современной науки: сб. материалов 6-й междунар. науч.-практ. конф., 30 ноября 2014 г. Махачкала, Апробация, 2014, с. 42–44.
- [5] Voronin, N.A. Topocomposites — a New Class of Structural Materials for Tribological Applications. Part 2. Methodological Problems of Creating and Designing. *Journal of Friction and Wear*, 1999, vol. 20, no 3, pp. 533–544.
- [6] Константинов В.М., Комаров Ф.Ф., Ковальчук А.В., Пилько В.В. Оценка износостойкости покрытия TiN на упрочненной и не упрочненной основе. *Вестник БарГУ*, 2013, с. 102–108.

- [7] Константинов В.М., Ковальчук А.В., Ткаченко Г.А. Повышение жесткости металлической основы систем «конструкционная сталь — нитрид титана». *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* Минск, Белорусская наука, 2013, вып. 36, ч. 2, с. 152–161.
- [8] Ковальчук А.В., Константинов С.В. Комплексное поверхностное упрочнение стальных изделий. Науч. рук. Ф.Ф. Комаров, Г.А. Ткаченко. *Литье и металлургия*, 2014, № 4 (77), с. 144–150.
- [9] Komarov F.F., Konstantinov S.V., Pilko V.V. Formation of nanostructured TiAlN, TiCrN, and TiSiN coatings using reactive magnetron sputtering. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no 3, pp. 215–223.
- [10] Комаров Ф.Ф., Ковальчук А.В., Константинов С.В., Пилько В.В. Получение и свойства покрытий TiAlN на стали. *Ползуновский альманах*, 2014, № 2, с. 10–15.

УДК621.785.53+621.793.1,620.178.15

## Исследование микротвердости поверхности армко-железа после диффузионного борирования и нанесения покрытия TiAlN

© Ковальчук Алексей Владимирович, Константинов Валерий Михайлович

Республика Беларусь, г. Минск,  
Белорусский национальный технический университет

[a-v-kov@yandex.com](mailto:a-v-kov@yandex.com)

*Исследована микротвердость поверхности армко-железа после однофазного и двухфазного борирования в порошковой среде и последующего магнетронного нанесения покрытия TiAlN. Оценены вклад основы и покрытия в наблюдаемую микротвердость поверхности, несущая способность покрытия на различных основах, а также эффект от комплексной обработки. Экспериментально показано, что повышение микротвердости основы в результате борирования приводит к непропорциональному повышению микротвердости поверхности с покрытием TiAlN.*

**Ключевые слова:** армко-железо, борирование, покрытие TiAlN, микротвердость, несущая способность.

**Введение.** Одним из критериев выбора способов поверхностного упрочнения стальных деталей является получаемый уровень микротвердости поверхности, который также коррелирует с ее износоустойчивостью. В связи с этим нашли широкое распространение способы получения на поверхности слоев или покрытий с высокими значениями микротвердости: диффузионные слои, формируемые в результате химико-термической обработки — цементации, азотирования, борирования, хромирования и многокомпонентного насыщения [1–3], а также алмазоподобные покрытия и покрытия на базе тугоплавких соединений, получаемые парофазным осаждением [4–9].

Однако использование перечисленных способов в отдельности не всегда является достаточным для формирования требуемых свойств деталей. Так, собственно химико-термическая обработка зачастую не обеспечивает получение свойств деталей,

отвечающих современному уровню требований к ним, а нанесение высокотвердых PVD-покрытий не всегда дает повышение микротвердости поверхности до уровня микротвердости самих покрытий.

Помимо факторов толщины, пористости и адгезии покрытий, это связано с тем, что микротвердость поверхности определяется в том числе микротвердостью основы и переходной зоны между основой и покрытием [10]. Следствием этого стала разработка способов комплексной обработки, включающей модифицирование основы и последующее нанесение PVD-покрытия. Такая обработка позволяет формировать комплекс свойств поверхности (износостойкость, коррозионная стойкость, жаростойкость и др.), причем покрытие и основа могут отвечать за разные свойства или формировать одни свойства объемным сочетанием. При этом может достигаться уровень свойств поверхности, недостижимый для материалов основы и покрытия в отдельности [11]. На проектировании и создании таких поверхностных композиций основано топокомпозиционное материаловедение, а такие слоистые системы носят название «топокомпозиаты» [12].

В данной работе исследована микротвердость поверхности с покрытием TiAlN на основе из армо-железа, упрочненного в результате однофазного и двухфазного диффузионного борирования при различных нагрузках на индентор.

**Материалы и методики.** Диффузионное насыщение проводили в порошковой среде besto-bor [13] в контейнерах, герметизируемых плавким затвором при 950 °С в течение 4 ч. Для проведения процесса использовали шахтную электрическую печь. Контроль температуры осуществляли с помощью потенциометра ПСР-01, градуировка ХА.

Покрытия TiAlN наносили на установке магнетронного распыления УРМ 327 в НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ под руководством заведующего лабораторией эллионики чл.-корр. НАН Беларуси, д-ра физ.-мат. наук, профессора Ф.Ф. Комарова.

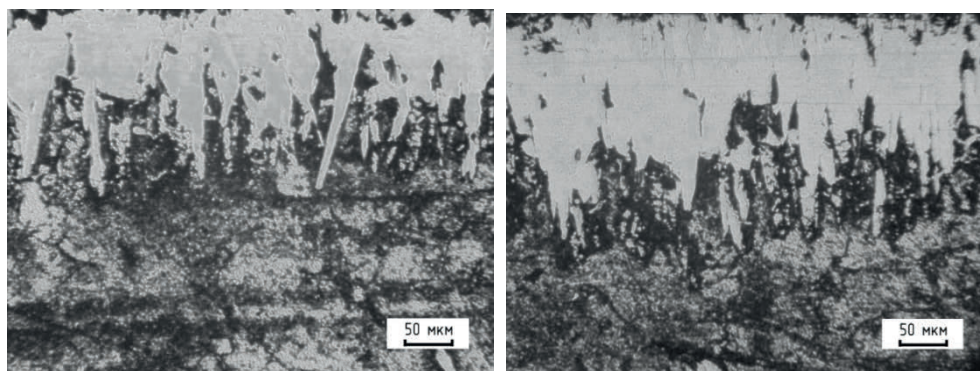
Нанесение покрытий осуществляли в следующем режиме. Ионная очистка:  $p = 0,6$  Па;  $t = 6$  мин;  $U = 2,5$  кВ;  $I = 20$  мА. Напыление:  $p = 7,2$  Па; подслой (TiAl):  $t = 1$  мин 20 с; покрытие (TiAlN):  $\alpha = 0,55$ ;  $U = 310$  В;  $I = 1,45$  А;  $t = 30$  мин. Нагрев:  $T = 300$  °С. Смещение:  $U = -100$  В. Полученная толщина покрытия составила 1,0 мкм.

Измерения микротвердости проводили по методу восстановленного отпечатка на автоматическом твердомере DuraScan 20 (Австрия).

**Результаты и их обсуждение.** В результате борирования на образцах армо-железа были сформированы компактные однофазные и двухфазные боридные слои (рис. 1) толщиной 160 и 240 мкм соответственно.

Результаты измерения микротвердости (табл. 1) показали, что наблюдаемая микротвердость покрытия на борированной основе значительно выше, а прирост значений микротвердости поверхности с покрытием TiAlN на упрочненной основе при уменьшении нагрузки на индентор с 1,961 до 0,490 Н составляет 60 % против 20 % прироста для значений микротвердости поверхности с покрытием TiAlN на неупрочненной основе.

Такие результаты хорошо согласуются с представлениями о вкладе основы в формирование эффективных свойств поверхности с покрытием, когда повышение микротвердости основы приводит к непропорциональному повышению наблюдаемой микротвердости поверхности с покрытием [11]. Достигая определенного уровня свойств основы, наблюдаемая микротвердость поверхности с покрытием может сравниться с истинной микротвердостью покрытия и даже превысить его за счет большего упругого восстановления покрытия на упрочненной основе [14].



*a*

*б*

**Рис. 1.** Микроструктуры армко-железа после однофазного (*a*) и двухфазного (*б*) борирования при 950 °С в течение 4 ч

*Таблица 1*

**Микротвердость поверхности с покрытиями TiAlN на различных основах**

№ п/п	Основа	Микротвердость основы, МПа	Микротвердость поверхности, МПа, при нагрузке, Н		
			1,961	0,981	0,490
1	Армко-железо без обработки	1 250	1 750	1 950	2 110
2	Армко-железо, однофазное борирование	10 300	12 800	15 300	19 860
3	Армко-железо, двухфазное борирование	14 480	15 300	18 540	24 335

Установлено, что микротвердость покрытий TiAlN на основе из армко-железа, предварительно подвергнутой двухфазному борированию, выше, чем на армко-железе после однофазного борирования. Это можно объяснить большей микротвердостью полученного двухфазного боридного слоя по сравнению с однофазным. Одновременно с этим при разности микротвердости однофазного и двухфазного боридных слоев, равной  $\approx 4000$  МПа, разность наблюдаемых значений микротвердости покрытий на них при нагрузке 1,961 Н составляет 2500 МПа.

Это можно объяснить тем, что однофазные боридные слои обладают большим запасом пластичности [15] и являются менее хрупкими, т. е. имеют большую деформацию разрушения, и, следовательно, могут вносить вклад в упругое восстановление покрытия при больших нагрузках. Однако при уменьшении нагрузки на индентор разность значений микротвердости увеличивается и при нагрузке 0,49 Н составляет более 4400 МПа, что указывает на первоочередную роль микротвердости основы в повышении несущей способности поверхности с PVD-покрытием.

В целом микротвердость поверхности армко-железа в результате комплексной обработки, включающей борирование и нанесение покрытия TiAlN, может увеличиваться более чем в 19 раз (при нагрузке 0,49 Н). Эффективность комплексной обработки будет определяться условиями работы упрочняемых деталей, так как наблюда-

емые значения микротвердости покрытий на упрочненной основе снижаются с увеличением нагрузки.

**Заключение.** Таким образом, получены результаты, свидетельствующие о перспективности использования однофазного и двухфазного борирования в порошковой среде совместно с последующим осаждением высокотвердых покрытий для повышения дюрометрических характеристик стальных поверхностей.

Экспериментально показано, что повышение микротвердости основы из арможелеза в результате однофазного и двухфазного термодиффузионного борирования приводит к непропорциональному повышению микротвердости поверхности с покрытием TiAlN.

### Литература

- [1] Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М. *Восстановление деталей машин: справочник*. Москва, Машиностроение, 2013, 672 с.
- [2] *Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник* / под ред. Л.С. Ляховича. Москва, Металлургия, 1981, 424 с.
- [3] Дашкевич, В.Г., Стасевич Г.В., Ковальчук А.В., Щербаков В.Г., Гегеня Д.В. Эффективные технологии поверхностной обработки изделий из стали. Научно-технологические и инновационные технологии: сб. докл. Юбилейной Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород, Изд-во БГТУ, 2014, ч. 4, с. 229–233.
- [4] Комаров Ф.Ф., Константинов С.В., Пилько В.В. Формирование наноструктурированных покрытий TiAlN, TiCrN, TiSiN методом реактивного магнетронного осаждения. *Трение и износ*, 2014, т. 35, № 3, с. 293–303.
- [5] Кавалейро А., Де Хоссена Д. *Наноструктурные покрытия*: пер. с англ. А.В. Хачояна под ред. Р.А. Андриевского. Москва, Техносфера, 2011, 752 с.
- [6] Овчинников Е.В., Струк В.А., Чекан Н.М., Эйсымонт Е.И. Алмазоподобные антифрикционные покрытия. *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч., ч. 1*. М-во обр. и науки РФ, Нац. акад. М: М-во образования РБ. Могилев, 2011, с. 192–195.
- [7] Mayrhofer P.H., Mitterer C., Hultman L. Microstructural Design of Hard Coatings. *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, no 8, pp. 1032–1114.
- [8] Horling A., Hultman L., Oden M., Sjolen J., Karlsson L. Mechanical properties and machining performance of Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N-coated cutting tools plating. *Surf. And Coat. Technol.*, 2005, vol. 191, pp. 384–392.
- [9] Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокомпозитных покрытий. *УФН*, 2009, № 1 (179), с. 35–64.
- [10] Voronin N.A. The influence of strain hardening of a base material on the effective characteristics of a topocomposite. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no 6, pp. 539–545.
- [11] Воронин Н.А. Особенности и прикладной аспект механики контактного взаимодействия жесткого сферического штампа с упруго-пластичным слоистым полупространством. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин Межвуз. сб. науч. тр. Тверь, ТГТУ, 2006, с. 32–55.
- [12] Воронин Н.А. Топокомпозиты — новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Ч. 1. *Трение и износ*, 1999, т. 20, № 3, с. 533–544.
- [13] BESTO (Белорусские среды для термодиффузионной обработки) [Electronic resource] — Mode of access. URL: <http://besto.by/vidy-obrabortok/borirovanie> (дата обращения 20.06.2015).
- [14] Ковальчук А.В., Константинов С.В. Комплексное поверхностное упрочнение стальных изделий. *Литье и металлургия*, 2014, № 4 (77), с. 144–150.
- [15] Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. *Пластичность борированных слоев*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2010, 384 с.

## Повышение длительной прочности интерметаллидного сплава ВКНА-1В после высокотемпературного отжига

© Костенко Юлия Вячеславовна<sup>1</sup>, Унчикова Марина Васильевна<sup>1</sup>,  
Базылева Ольга Анатольевна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> Россия, г. Москва, ФГУП «ВИАМ»

[kostenkojulia@list.ru](mailto:kostenkojulia@list.ru)

*Проведено исследование влияния температуры отжига на структуру, свойства и остаточные напряжения интерметаллидного сплава ВКНА-1В. Экспериментально определены периоды решеток  $\gamma'$  и  $\gamma$ -фаз, время до разрушения и остаточные напряжения. Установлено, что отжиг при температуре 1150 °С увеличивает долговечность в 2 раза по сравнению с литым состоянием и полностью снимает остаточные напряжения.*

**Ключевые слова:** интерметаллид, отжиг, мисфит, распад твердого раствора, время до разрушения.

В настоящее время задачу повышения ресурса высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей решают, разрабатывая новые жаропрочные материалы или совершенствуя никелевые суперсплавы. Интерметаллидные материалы серии ВКНА на основе  $Ni_3Al$  являются перспективными материалами, которые в наибольшей степени удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям и по сравнению с жаропрочными никелевыми сплавами, имеющими рабочие температуры 1050...1150 °С, обладают уникальной жаропрочностью при температурах 1000...1300 °С. Благодаря высокому содержанию алюминия, сплавы ВКНА имеют пониженную плотность и высокий уровень жаростойкости [1, 2].

Оптимальная с точки зрения жаропрочности структура интерметаллидных сплавов формируется в процессе кристаллизации, что позволяет исключить проведение традиционной для жаропрочных никелевых сплавов сложной упрочняющей термической обработки, состоящей из гомогенизации и двуступенчатого старения.

Вместе с тем при изготовлении деталей после механической обработки могут возникать остаточные напряжения, которые влияют на структурно-фазовое состояние и свойства материалов особенно при высоких температурах.

Целью работы являлось исследование влияния отжига на структурно-фазовое состояние и длительную прочность монокристаллического сплава ВКНА-1В.

В качестве материала для исследований использовали цилиндрические заготовки образцов из интерметаллидного сплава ВКНА-1В, полученные методом литья с жидкометаллическим охладителем с использованием затравок с монокристаллической структурой кристаллографической ориентации КГО  $\langle 111 \rangle$  [3].

Микроструктурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе JSM-840, периоды решеток ( $a_\gamma$  и  $a_{\gamma'}$ ) и количество  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фаз определяли при



комнатной температуре дифрактометрическим методом на установке ДРОН-3М с использованием компьютерной программы Outset, остаточные напряжения рассчитывали по значениям межплоскостных расстояний, которые определялись с помощью рентгеноструктурного метода.

Статические испытания на растяжение с определением времени до разрушения проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 10145 на компьютеризированных стендах ZST2/3-ВИЭТ при 1000 °С и  $\sigma = 180$  МПа.

Для термической обработки, включающей нагрев до 1000, 1100, 1150, 1200 °С, выдержку в течение 1 ч и охлаждение на воздухе, использовали камерную печь VEBKS400/100 с максимальной рабочей температурой 1350 °С.

Расчет остаточных напряжений после каждого режима термической обработки показал, что с увеличением температуры отжига происходит их уменьшение, а при нагреве до 1150 °С полное снятие.

Исследования образцов интерметаллидного сплава ВКНА-1В после термической обработки показали, что в результате распада  $\gamma$ -твердого раствора и выделения частиц вторичной  $\gamma'$ -фазы (рис. 1) объемное количество  $\gamma'$ -фазы по сравнению со значениями для сплава в исходном литом состоянии увеличивается с 88 до 90...93 %.

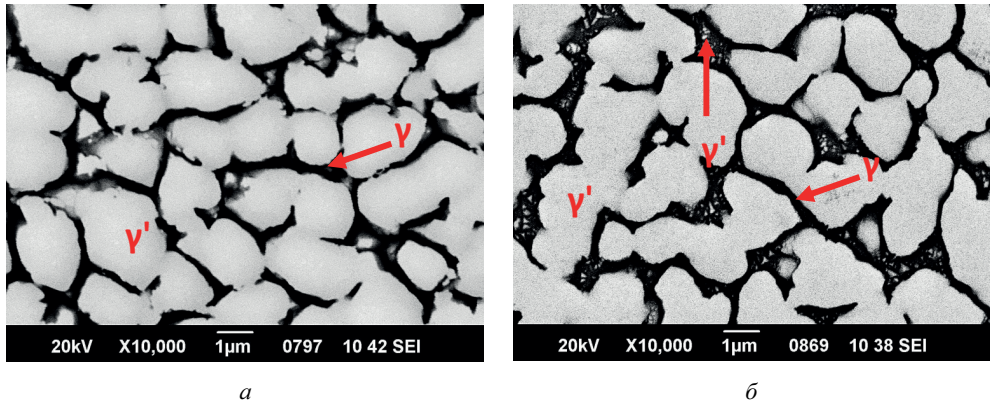


Рис. 1. Микроструктура  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фазы в междендритных областях сплава ВКНА-1В (а) после направленной кристаллизации и (б) после термической обработки при температуре 1200 °С в течение 1 ч,  $\times 10000$

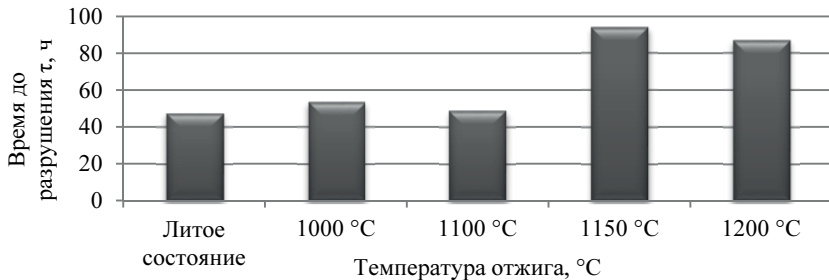


Рис. 2. Влияние температуры отжига интерметаллидного сплава ВКНА-1В на время до разрушения при испытаниях на длительную прочность при температуре 1000 °С при постоянном напряжении 180 МПа

Рентгеноструктурным анализом установлено, что с повышением температуры отжига период кристаллической решетки более стабильной  $\gamma'$ -фазы ( $a_{\gamma'}$ ) существенно не меняется, в то время, как параметр решетки  $\gamma$ -фазы ( $a_{\gamma}$ ) увеличивается, что приводит к двукратному увеличению мисфита  $D$  ( $D = (a_{\gamma} - a_{\gamma'})/a_{\gamma}$ ) и вызывает увеличение длительной прочности (рис. 2). Снижение времени до разрушения после отжига сплава при 1200 °С может быть связано с обеднением поверхности легирующими элементами.

### Литература

- [1] Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля. *МиТОМ*, 1999, № 1, с. 32–34.
- [2] Каблов Е.Н., Колобов Ю.Р. *Структура и свойства интерметаллидных материалов с наночастицами упрочнением*. Колл. авторов /Под научной редакцией . — Москва, ИД МИ-СиС, 2008, 328 с.
- [3] Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения. *Авиационные материалы и технологии*, 2012, № 5, с. 97–105.

УДК 669.018.9

## Фрактографическое исследование изломов дисперсно-упрочненного алюмоматричного композиционного материала

© Лопатина Юлия Александровна, Курганова Юлия Анатольевна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[lopatina.julia@yandex.ru](mailto:lopatina.julia@yandex.ru)

*Исследованы изломы композиционного материала на основе матриц Д16 и В95, дисперсно-упрочненных частицами карбида кремния SiC с массовой долей 20 %. Композиционный материал получен по порошковой технологии, образцы подвергались испытаниям на растяжение. Полученные изломы были изучены с помощью растрового электронного микроскопа. Установлены причины разрушения и выявлен типичный рельеф, характерный для поверхностей изломов рассматриваемой группы материалов.*

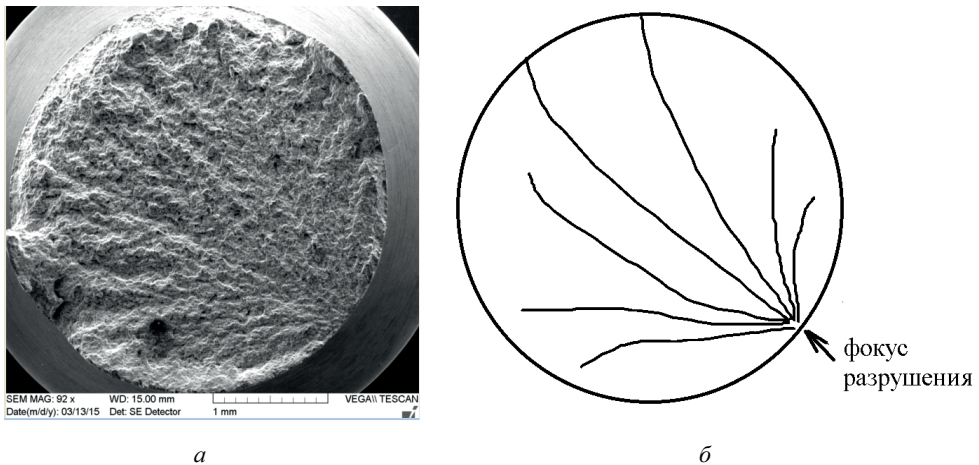
**Ключевые слова:** дисперсно-упрочненные композиционные материалы, растровый электронный микроскоп, растяжение, изломы.

В связи с постоянно растущими требованиями к повышению рабочих характеристик материалов при одновременном снижении или сохранении плотности, создание новых материалов является основной ключевой задачей современного материаловедения. Один из эффективных путей решения этой задачи — разработка технологий и

создание композиционных материалов (КМ). Наиболее универсальными являются КМ с металлическими матрицами, обладающие высокой прочностью, вязкостью разрушения, жаропрочностью, тепло- и электропроводностью. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию композиции алюминиевая матрица — частицы карбида кремния (SiC) вследствие доступности и технологичности исходных компонентов.

В данной работе рассмотрены изломы образцов КМ с матричными алюминиевыми сплавами Д16 (3,8...4,9 % Cu, 1,2...1,8 % Mg, 0,3...0,9 % Mn, < 0,3 % Zn, < 0,1 % Ti, < 0,1 % Ni, < 0,5 % Si, < 0,5 % Fe, Al — остальное, ГОСТ 4784—97) и В95 (5-7 % Zn, 1,8...2,8 % Mg, 1,4...2,0 % Cu, 0,2-0,8 % Mn, 0,1-0,25 % Cr, < 0,05 % Ti, < 0,5 % Si, < 0,5 % Fe, Al — остальное, ГОСТ 4784—97), дисперсно-упрочненные частицами карбида кремния SiC с массовой долей 20 %. Образцы получены по порошковой технологии, включающей в себя следующие этапы: предварительное смешение порошков матрицы и SiC в вибросмесителе, механическое легирование в атриторе, горячее компактирование при 450 °С, экструзия, механическая обработка. Также рассмотрены образцы, полученные по измененной технологии, исключая операцию механического легирования.

Над образцами проведены испытания на растяжение согласно ГОСТ 1497—84, вследствие чего они разрушились. Образовавшиеся поверхности разрушения были изучены на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Tescan Vega II LMN для выяснения причин разрушения и выявления типичного рельефа, характерного для изломов рассматриваемой группы материалов. В результате было установлено, что все образцы разрушились по схожей схеме (рис. 1): имеется очаг разрушения (фокус), расположенный вблизи поверхности образца, и полосы разрушения, расходящиеся от него. Рельеф поверхности разрушения представляет собой чередование выпуклостей и впадин, испещренных мелкими ямками (рис. 2). Также в ходе исследования в образцах было выявлено три типа дефектов: посторонние частицы, поры и трещины (рис. 3).



**Рис. 1.** Характер разрушения исследуемых образцов:  
*а* — внешний вид излома образца В95 + 20 % SiC, РЭМ, х90; *б* — схема разрушения

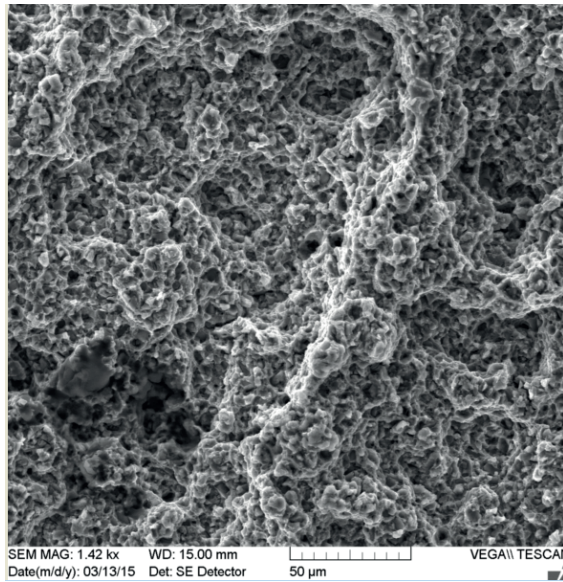


Рис. 2. Типичный рельеф поверхности разрушения, РЭМ (×1400)

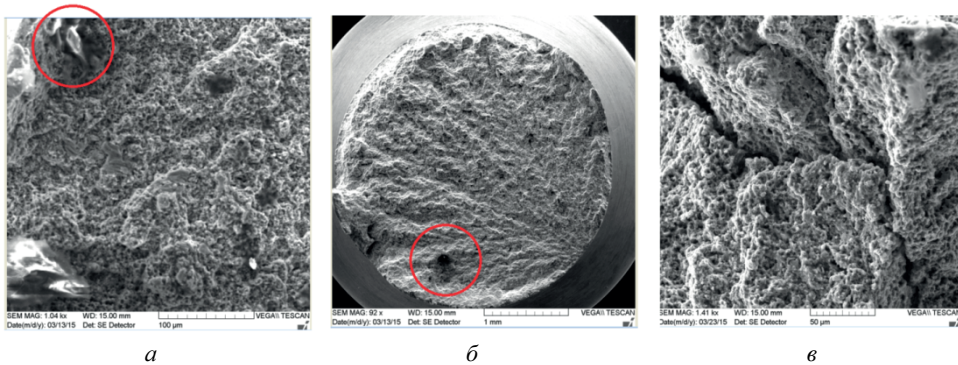


Рис. 3. Типичные дефекты:  
*a* — посторонние частицы; *б* — поры; *в* — трещина

Наличие в изломах ярко выраженного точечного очага разрушения свидетельствует о присутствии дефекта в данной области, послужившего концентратором напряжений. Учитывая расположение очага (у поверхности образца), вероятнее всего таким дефектом явилась щербинка на поверхности, оставленная инструментом при обработке. Не исключено также, что в некоторых случаях причиной разрушения стали посторонние частицы, обнаруженные вблизи фокуса. Рельеф выпуклостей и впадин, присутствие ямок на поверхности, вероятно, связаны с неоднородностью образца. В целом можно заключить, что разрушение образцов носит хрупкий характер.

## Литература

- [1] Власов А.И., Елсуков К.А., Косолапов И.А. Электронная микроскопия: учеб. пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 168 с.
- [2] ГОСТ 4784—97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Введ. 2000-07-01. Москва, изд-во стандартов, 2009, 12 с.
- [3] Кузнецов М.В. Современные методы исследования поверхности твердых тел: фотоэлектронная спектроскопия и дифракция, СТМ-микроскопия. Екатеринбург, Изд-во Института химии твердого тела УрО РАН, 2010, 43 с.
- [4] Матюнин В.М. Механико-технологические испытания и свойства конструкционных материалов: учебное пособие. Москва: Изд-во МЭИ, 2005, 140 с.
- [5] Чернышова Т.А., Курганова Ю.А., Кобелева Л.И., Болотова Л.К. *Литые дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы: изготовление, свойства, применение*. Ульяновск, УлГТУ, 2012, 295 с.
- [6] Polyanskii V.M., Kurtasova L.A. Delayed fracture and the nature of substructural defects formed in aluminum alloys due to sustained loading // *Material Science*, 1995, no 5, pp. 549–555.
- [7] Yung-Chang Kanga, Sammy Lap-Ip Chanb. Tensile properties of nanometric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulate-reinforced aluminum matrix composites. *Materials Chemistry and Physics*, 2004, no 85, pp. 438–443.

УДК 621.785

## Влияние пористости на мультифрактальные характеристики наплавочных материалов

© Маркова Екатерина Витальевна, Фомичева Наталия Борисовна

Россия, г. Тула, Тульский государственный университет

[nbf62@yandex.ru](mailto:nbf62@yandex.ru)

*В работе проведена адаптация методов фрактального и мультифрактального анализа для исследования наплавочных материалов с различной концентрацией пор.*

**Ключевые слова:** *фрактальность, мультифрактальность, пористость, наплавка, параметр однородности, параметр упорядоченности, покрытие.*

Структурообразование систем, полученных методами напыления или наплавки, находится в сложной зависимости от значительного количества параметров технологического процесса, включая стадии последующей термической обработки. Отключение какого-либо технологического фактора от его оптимального значения проявляется в формировании дефектных, аномальных структур и характеризуется повышенной загрязненностью неметаллическими включениями, выделением карбидных и интерметаллидных фаз по границам зерен, ростом зерна, структурной гетерогенностью. Очевидно, что изучение данных процессов требует перехода от качественной металлографии к точным количественным методам описания структуры.

Методология прикладного мультифрактального анализа позволяет непосредственно выявлять и описывать нарушение специфической формы симметрии —

фрактальной симметрии (Ф-симметрии), в структурах многих материалов. Для количественной оценки покрытий в работе использовали мультифрактальный анализ, который проводили с использованием программы MFRDrom.

В работах [1, 2] отмечалось, что поры могут влиять на определенные мультифрактальные характеристики аналогично включениям микроструктуры — фазам, карбидам и др. Это подтверждается обнаруженной в наших исследованиях взаимосвязью пористости (плотности) и параметров мультифрактальной параметризации.

Для исследований были взяты образцы после напыления и наплавки Fe–В и Fe–Si. Металлографический анализ показал, что все покрытия обладают пористостью. Данные мультифрактального анализа обнаружили зависимость мультифрактальных параметров от пористости покрытия.

Получено, что мультифрактальный параметр  $f_{100}$  однородности, отражающий протяженность границ, уменьшается при увеличении объема пор в материале, мультифрактальный параметр упорядоченности  $\Delta_{100}$  (характеризует «хаос» структуры) при этом имеет другой тренд: он возрастает с увеличением объема пористости.

Таким образом, в работе была получена корреляция между мультифрактальными параметрами упорядоченности и однородности, с одной стороны, и количеством пор в материале — с другой.

### Литература

- [1] Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. *Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов*. Москва — Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 116 с.
- [2] Большаков В.И., Волчук В.Н., Дубров Ю.И. Разработка и исследование метода определения механических свойств металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры. *МиТОМ*, 2004, № 1, с. 43–54.
- [3] Встовский Г.В., Гринберг Е.М., Маркова Е.В., Фомичева Н.Б. Фрактографические исследования поверхности изломов стали 09Х16Н4БЛ с использованием прикладного мультифрактального анализа. *Перспективные материалы*, 2012, № 5, с. 89–94.
- [4] Встовский Г.В., Гринберг Е.М., Маркова Е.В., Фомичева Н.Б. Мультифрактальный анализ зеренной структуры мартенситной стали 09Х16Н4БЛ после различных термических обработок *Перспективные материалы*, 2013, № 1, с. 66–71.

УДК 621.789

## Влияние фазового наклепа на структуру и свойства конструкционных сталей

© Мартынюк Алексей Михайлович, Муравьев Василий Илларионович

Россия, г. Комсомольск-на-Амуре,  
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

[ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru), [vmuravyev@mail.ru](mailto:vmuravyev@mail.ru)

*Рассмотрено влияние температурно-временных условий нагрева под закалку на структурные изменения и свойства предварительно закаленной низкоуглеродистой стали 16ХСН. Установлено, что фазовый наклеп (предварительная закалка) оказывает существенное влияние на эволюцию структуры и свойства низколегированных сталей в процессе нагрева со скоростью 700 °С/с до температуры аустенизации во временном интервале как предпревращения, так и превращений, фиксируемых быстрым охлаждением.*

**Ключевые слова:** термическая обработка, низколегированные стали, фазовый наклеп, структура материала, прочность, пластичность, твердость, микротвердость.

Эффективность использования стальных конструкций во многих отраслях машиностроения определяется их весовыми характеристиками, прочностью и надежностью. Применение традиционных методов термической обработки деталей из низколегированных сталей не обеспечивает уменьшения массы из-за пониженных показателей пластичности. Состояние предпревращения в сплавах железа позволяет резко увеличить пластичность (субкритическую сверхпластичность (ССП)), в частности и в низкоуглеродистых сталях [1]. Сложность проведения деформационного упрочнения как в интервале предпревращения, так и в аустенитной области является мало приемлемым методом при термообработке низколегированных сталей.

Технологии интенсивной пластической деформации [2] позволяют в несколько раз повысить прочность сплавов по сравнению с традиционными видами термомеханической обработки, но показатели пластичности и вязкости разрушения при этом значительно снижаются.

При выполнении ряда исследований [3–5] было обнаружено улучшение свойств сталей и сплавов в условиях резкого сокращения времени выдержки при температуре, превышающей АС3 (в интервале СП). Положительное влияние фазового наклепа на свойства конструкционных сталей и сплавов показывает их перспективность и требует дополнительных исследований.

Цель настоящей работы — исследование влияния температурно-временных условий нагрева под закалку на структурные изменения и свойства предварительно закаленной низкоуглеродистой стали 16ХСН.

Для исследований использовали слаболегированную проволоку диаметром 6 мм из стали 16ХСН с предварительным отжигом на зернистый перлит. Нагрев образцов до температуры аустенизации производился в расплаве солей 50 % NaCl + 50 % KCl

со средней скоростью 700 °C/с. Выдержка отсчитывалась с момента загрузки образца в расплав солей (с температурой аустенизации 930±5 °C). Закалка осуществлялась в проточной подсоленной воде с температурой 4...6 °C.

Микрорентгеноспектральный анализ распределения легирующих элементов в структуре образцов производили на сканирующем электронном микроскопе HITACHI VP-SEMS-3400N. Испытание на одноосное растяжение со скоростью 15,5 мкм/с на стандартных цилиндрических образцах с длиной рабочей части 50 мм по ГОСТ 1497—84 проводили на испытательной машине INSTRON 3382. Определение твердости осуществляли на твердомере Rockwell hardness tester TH300 по методу Роквелла по ГОСТ 9013—59. Определение микротвердости выполняли на микротвердомере Shimadzu HNMV-2TE по ГОСТ 9450—76, микроструктуры — на оптическом микроскопе Planar micro 2000 и сканирующем электронном микроскопе HITACHI VP-SEMS-3400N.

Расчет потенциала Гиббса  $E_g$  выполняли на основании результатов измерения микротвердости при различных нагрузках и экстраполяции удельного значения энергетических затрат на нулевую нагрузку по методике, приведенной в работе [4].

В первые доли секунды достаточно высокая скорость нагрева (700 °C/с) приводит к повышенной диффузионной подвижности атомов, особенно атомов углерода (температура 400...500 °C). В этих условиях протекают начальные процессы перераспределения и уменьшения концентрации дефектов фазового наклепа (сверх равновесной) путем аннигиляции и стока к дислокациям и границам зерен и субзерен, не сопровождающихся образованием новых границ. Свидетельство тому — резкое снижение внутренней энергии материала (потенциал Гиббса  $E_g$  уменьшается практически в 1,5 раза (табл. 1) и ослабление энергии межзеренной и межфазовой связи (модуль Юнга  $E$  уменьшается (см. табл. 1)). При этом сохраняется структура пакетно-речного мартенсита без изменения границ зерен и пакетов.

Таблица 1

**Изменение механических свойств и внутренней энергии Гиббса  
предварительно закаленной стали 16ХСН в зависимости от времени выдержки  
при нагреве до температуры аустенизации и охлаждении**

Выдержка при нагреве, с	Номер образца	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Модуль Юнга $E \cdot 10^2$ , МПа	Энергия Гиббса $E_g \cdot 10^{13}$ , Па	HV
До 1	4	631	389	40	66	1750	878	452
2 — 3	5	1374	771	14	67	3050	1277	470
5	6	1164	570	16	55	2596	1023	373
7	7	687	530	11	62	1510	867	307
10	8	1210	790	11	56	2860	1282	481
15	9	1485	820	12	60	3520	1510	508

В дальнейшем фазовое превращение пакетно-речного мартенсита сопровождается процессом полигонизации [6]. Увеличение выдержки до 2...3 с приводит к еще большей диффузионной подвижности атомов (температура аустенизации 930 °C), идет интенсивный процесс образования и движения малоугловых дислокационных субграниц.



В структуре, сформировавшейся в результате полигонизации, наблюдается значительное уменьшение протяженности мартенситных реек и образование новых малоугловых границ. Упорядочение структурной неоднородности в результате исключения неравновесной концентрации дефектов фазового наклепа и последующий процесс полигонизации структуры пакетно-реечного мартенсита приводят к максимальным значениям прочности и пластичности низкоуглеродистых сталей (см. табл. 1).

Выдержка более 3 с сопровождается процессом рекристаллизации — превращения пакетно-реечного мартенсита в феррито-перлитную структуру, которая заканчивается при выдержке 7...8 с. Об этом свидетельствует значительное уменьшение внутренней энергии материала при образовании зернистого перлита из упорядоченного пакетно-реечного мартенсита. При этом механические свойства низкоуглеродистой стали соответствуют отожженному состоянию (см. табл. 1), но с увеличением пластичности. Последующая выдержка при аустенизации ведет к превращению зернистого перлита в аустенит, превращающийся при охлаждении в пакетно-реечный мартенсит, свойства которого соответствуют закаленному состоянию (см. табл. 1).

Распределение химических элементов в структуре стали четко определяется последовательностью фазовых превращений в зависимости от времени выдержки при температуре аустенизации и последующем охлаждении. При скоростном нагреве до температур 400...500 °С характерным признаком является распределение углерода и легирующих элементов вблизи первичных границ зерен и незначительно вдоль границ реек мартенсита. В дальнейшем при выдержке 2...3 с, наблюдается равномерное распределение углерода и легирующих элементов по всему полю металла в соответствии с пакетно-реечным мартенситом, причем идентично с распределением легирующих элементов после полной аустенизации при выдержке 15 с и закалки. Выдержка при температуре аустенизации в течение 7...8 с приводит к равномерному распределению легирующих элементов по всему полю ферритно-перлитной структуры металла и идентична распределению в структуре отожженного исходного металла.

Фазовый наклеп (предварительная закалка) оказывает существенное влияние на эволюцию структуры и свойства низколегированных сталей в процессе нагрева со скоростью 700 °С/с до температуры аустенизации во временном интервале как предпревращения, так и превращений, фиксируемых быстрым охлаждением.

Обнаружены эффекты повышенной пластичности при обратном мартенситном превращении, связанные с уменьшением концентрации дефектов фазового наклепа сверх равновесной. В дальнейшем наблюдается повышение пластичности при высокой прочности, затем отожженное состояние и высокая пластичность и окончательное формирование мелкозернистой структуры с высокими прочностью и пластичностью по сравнению с традиционной заготовкой.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости проведения дополнительных исследований в направлении улучшения свойств изделий и полуфабрикатов из конструкционных сталей и сплавов в процессе технологических операций сварки и пластической деформации.

## Литература

- [1] Гуляев А.П. Состояние предпревращения в сплавах железа. *Металлургический журнал*, 1991, № 6, с. 7–10.
- [2] Терентьев В.Ф. Сопrotивление усталости сплавов титана и железа с субмикроструктурной и наноструктурой. *Металлургический журнал*, 2007, № 10, с. 21–28.

- [3] Пикеринг Ф.Б. *Физическое материаловедение и разработка сталей*: пер. с англ. Москва, Металлургия, 1982, 184 с.
- [4] Муравьев В.И. *Управление дефектной структурой сплавов на границе фазовых превращений с использованием метода акустической эмиссии*. Комсомольск-на-Амуре, ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013, 219 с.
- [5] Муравьев В.И. Определение эффективности использования фазовых превращений в технологических операциях изготовления конструкций из сталей и сплавов методом акустической эмиссии. *Уч. зап. Комсомольского-на-Амуре технич. ун-та*, 2011, № III-1 (7), с. 91–100.
- [6] Горелик С.С. Рекристаллизация и предрекристаллизационные процессы в неорганических материалах и их классификация. *Научные школы МСИиС. 75 лет становления и развития*: под ред. Ю.С. Карабасова. Москва, МИСиС, 1997, 628 с.

УДК 620.181:621.771:669.017.3

## **Изучение влияния углерода на положение критических точек в многослойных стальных материалах**

© Минаков Александр Александрович, Плохих Андрей Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[crytoicem@rambler.ru](mailto:crytoicem@rambler.ru)

*Проведены исследования по изучению изменения положения критических точек и температурных интервалов фазовых превращений, происходящих в многослойных стальных материалах под влиянием интервалов термомеханического воздействия. Показано, что определяющую роль в изменении первоначального положения критических точек и смещении температурного интервала прямого превращения играет химический состав исходной композиции многослойного металлического материала. С помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии проведены исследования образцов двух модельных композиций  $У8 + 08X18H10$  и  $08кп + 08X18H10$  после разной степени структуризации. Результаты анализа полученных термограмм показали, что для образцов модельной композиции  $У8 + 08X18H10$  наблюдалось смещение положения критических точек и температурного интервала прямого превращения в область низких температур, однако в модельной композиции  $08кп + 08X18H10$  такого эффекта не было обнаружено. По полученным данным был сделан вывод о превалирующем влиянии углерода на изменение положения критических точек и области существования аустенитной фазы в многослойных стальных материалах.*

**Ключевые слова:** *слоистые композиты, многослойные металлические материалы, горячая прокатка, диффузия, микроструктура, фазовые превращения, структурная стабильность.*

В настоящее время в машиностроении одним из перспективных направлений в области создания конструкционных металлических материалов, обладающих высоким комплексом свойств и характеристик, является разработка нового класса — многослойных металлических материалов. Эффективное использование таких материа-

лов при изготовлении деталей, испытывающих температурно-силовое нагружение, позволяет повышать ресурс их работы, достигать высоких значений служебных характеристик и в то же время экономить дорогостоящие легирующие элементы.

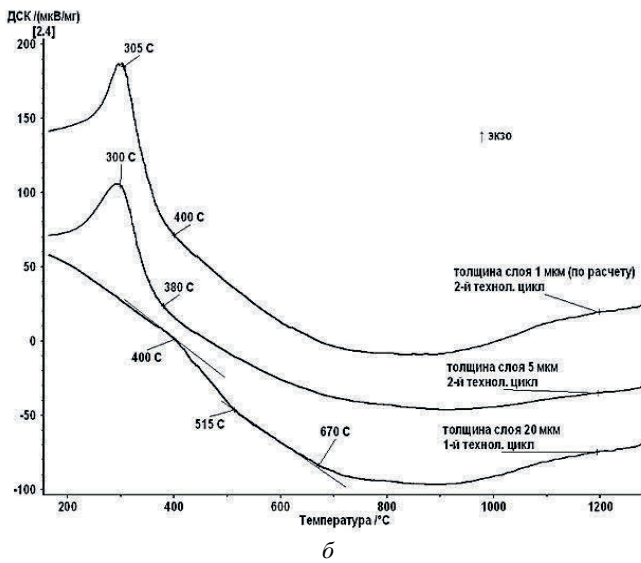
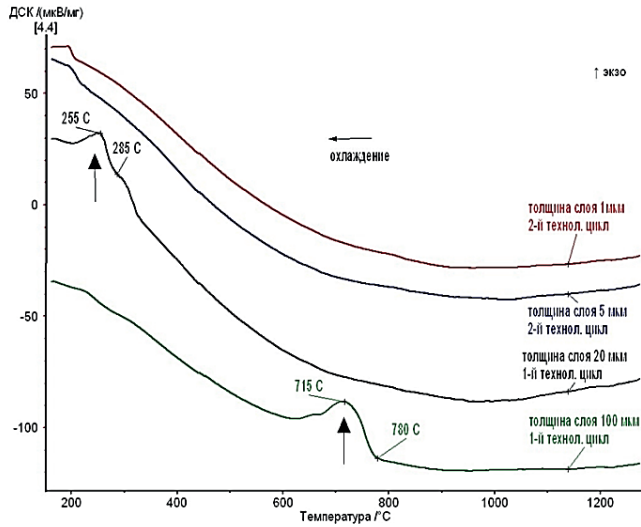
Отличительной чертой многослойных металлических материалов является их ламинарная, т. е. многослойная структура, которая состоит из сотен и тысяч слоев с толщинами микронного и субмикронного диапазона [1, 2]. Формирование такой структуры происходит в результате локализации пластического течения в отдельных слоях при применении метода горячей пакетной прокатки композитных заготовок, созданных на основе промышленно выпускаемых сталей. Тем не менее на формирование, а также сохранение ламинарности структуры влияет и ряд других факторов. Кроме непосредственного влияния горячей пластической деформации следует принять во внимание то, что в высокотемпературной области в процессе синтеза многослойного металлического материала активируются процессы диффузии легирующих элементов, имеющие направленность к усреднению химического состава по всему объему получаемого материала [3]. При этом стоит отметить, что усреднение химического состава приводит и к изменению первоначального положения критических точек, определяющих температурные интервалы используемого процесса вакуумной горячей пакетной прокатки. Таким образом, существует вероятность снижения температуры заготовок до ее межкритических значений. Применение нагрева, позволяющего поддерживать постоянной заданную температуру прокатки, может привести к структурной и фазовой перекристаллизации многослойного металлического материала, которая будет иметь повторяющийся характер.

В связи с изложенным необходимо отметить, что для многослойных металлических материалов, имеющих различный состав, весьма актуальным является исследование изменения положений критических точек, и, таким образом, температурных интервалов области существования аустенитной фазы, в которой проводится деформирование.

В качестве объектов исследования выбрали образцы, имеющие разную степень структуризации, двух модельных композиций многослойных металлических материалов на основе сталей У8 + 08X18Н10 и 08кп + 08X18Н10. Каждый из образцов изначально был составлен из 100 чередующихся между собой листов сталей с толщинами 0,5 мм по 50 шт. каждой марки. Затем по экспериментальному технологическому маршруту, который включает в себя мерную резку заготовок из листов, последующую обработку их поверхности, сборку листов в пакет, вакуумирование полученного пакета и его дальнейшее пластическое деформирование при температуре 1000 °С, получили заготовки, имеющие толщину 10 и 2 мм. При этом толщина отдельно взятого слоя в композите после проведения первого технологического цикла составила 100 и 20 мкм. Далее из полученных полос произвели сборку следующего пакета, который подвергся второму технологическому циклу. После его завершения толщина отдельного взятого слоя при прокатке заготовок до 10 и 2 мм составила уже 5 и 1 мкм соответственно. После завершения первого технологического цикла в материале сохранялось ламинарное строение, однако после проведения второго технологического цикла наблюдалось нарушение ламинарного строения с образованием полиэдрической структуры.

Основным методом исследования температурных интервалов фазовых превращений, а также изменения положений критических точек, служил метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием калориметра DSC 404 F1 Pegasus фирмы Netzsch. Был произведен нагрев образцов каждой из композиций до температуры 1000 °С в инертной среде аргона, далее проводилась выдержка в

течение 5 мин, а затем образцы охлаждались со скоростью 10 °С/мин. В работе исследовали изменения температурных интервалов прямых превращений, поэтому анализу были подвергнуты только те участки термограмм, которые были получены в режиме охлаждения.



**Рис. 1.** Термограммы охлаждения образцов:  
*a* — композиция У8 + 08Х18Н10; *б* — композиция 08кп + 08Х18Н10

Термограммы для композиции У8 + 08Х18Н10, полученные в результате исследований, представлены на рис. 1, *a*. У стослойного образца после проведения

первого технологического цикла, прокатанного до 10 мм и имеющего толщину единичного слоя 100 мкм температуры начала и конца прямого превращения составили  $A_{r1} = 780$  °С,  $A_{r2} = 715$  °С. В таком же образце, но прокатанном до 2 мм и имеющем толщину единичного слоя 20 мкм, произошло смещение температурного интервала прямого превращения в низкотемпературную область. У образцов, прошедших второй технологический цикл и имеющих толщины отдельных слоев 5 и 1 мкм соответственно, в рассматриваемом диапазоне температур не было обнаружено фазовых переходов.

Совершенно иная картина наблюдалась на термограммах, полученных в результате исследования образцов композиции 08кп + 08Х18Н10 (рис. 1, б). Так, у образца, имеющего толщину отдельно взятого слоя 20 мкм, после проведения первого технологического цикла не наблюдалось тепловых аномалий, характерных для прямого превращения. Однако у образцов, прошедших второй технологический цикл и имеющих толщины отдельных слоев 5 и 1 мкм, как можно увидеть, в низкотемпературной области наблюдались тепловые эффекты, которые характерны для прямого превращения. При этом смещения температурного интервала прямого превращения не происходило.

Из полученных результатов в ходе исследований можно сделать вывод о том, что в изменении первоначального положения критических точек и смещении температурного интервала прямого превращения определяющую роль играет химический состав исходной композиции многослойного металлического материала. Исследуемые композиции отличались по своему химическому составу только различным содержанием углерода. Однако также следует учитывать и происходящие процессы диффузии легирующих элементов в процессе получения многослойного материала и то, что легирующие элементы по-разному влияют на термодинамическую активность углерода, т. е. на подвижность его атомов [4]. Поэтому можно сделать также предположение и о том, что в исследуемых многослойных материалах ведущую роль в изменении положения критических точек и области существования аустенитной фазы играют углерод, а также перекрестное взаимовлияние углерода и никеля и углерода и хрома.

## Литература

- [1] Колесников А.Г., Плохих А.И., Михальцевич И.Ю. Исследование возможности получения субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки. *Производство проката*, 2010, № 3, с. 25–31.
- [2] Братухин А.Г., Колесников А. Г., Плохих А. И. К вопросу применения субмикро- и наноструктурированного листового проката в интересах авиационной и ракетно-космической техники. *Наука и технологии в промышленности*, 2012, № 4, с. 43–47.
- [3] Плохих А.И., Власова Д.В., Ховова О.М., Полянский В.М. Исследование влияния диффузионной подвижности легирующих элементов на стабильность структуры многослойных металлических материалов. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/262116.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [4] Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А. *Термодинамика железо-углеродистых сплавов*. Москва, Металлургия, 1972, 328 с.

## Применение термодинамического анализа к расчету размера зерна в сплаве АМгб

© Носова Екатерина Александровна, Гречников Федор Васильевич

Россия, г. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

[eanosova@mail.ru](mailto:eanosova@mail.ru), [fvgr48@mail.ru](mailto:fvgr48@mail.ru)

*Рассмотрена задача получения определенного размера зерна в сплаве АМгб при его рекристаллизации. Использована математическая модель скорости миграции границы в зависимости от внутренних напряжений в металле, температуры нагрева и продолжительности выдержки при выбранной температуре. Проведено сравнение результатов расчета с данными диаграммы рекристаллизации. Сравнение показало, что расчетные значения, полученные с использованием математической модели, имеют одинаковый порядок значений, но экспериментальные значения изменяются менее интенсивно с ростом температуры нагрева при одинаковой выдержке, чем расчетные. Анализ модели показал, что причина расхождений экспериментальной и теоретической кривой может быть связана со значительной погрешностью при нахождении коэффициента диффузии или движущих сил миграции границы зерна.*

**Ключевые слова:** рекристаллизация, алюминиевые сплавы, размер зерна.

**Актуальность.** Размер зерна, текстура, количество фаз и их распределение в сплавах алюминия определяют расход металла и точность получаемых заготовок, а также влияют на износ штампов. Как правило, хорошая штампуемость обеспечивается при наличии в листовых заготовках однородной мелкозернистой структуры [1], при этом могут быть обеспечены все остальные структурные особенности. Кроме того, важным является вопрос получения минимально возможного размера зерна в диапазоне наноразмерных величин. Получить такую структуру можно на заключительных этапах холодной прокатки за счет подбора режимов обжатий и межоперационных отжигов. Их выбор по справочникам и на основании диаграмм рекристаллизации не учитывает продолжительность отжига, что может привести к усилению неоднородности размера зерна вследствие собирательной рекристаллизации. Целью данной работы являлось установление режимов получения определенного размера зерна в зависимости от степени обжатия, температуры нагрева и продолжительности выдержки алюминиевого сплава АМгб, применяемого для получения элементов оболочек различной формы методами листовой штамповки.

**Материалы и методики.** Расчет размера зерна проводили на основании сведений, изложенных в [2]. Для проверки расчетов использовали диаграммы рекристаллизации, представленные в [3].

**Расчет размера зерна.** Согласно [2] размер рекристаллизованного зерна

$$R = \frac{\lambda Da^2}{kT} \sigma_{дв0} \left[ 1 - e^{-t_k/\lambda} \right], \quad (1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $a$  — среднее межатомное расстояние,  $\text{м}$ ;  $\sigma_{\text{дв}}$  — движущие напряжения разупрочнения (МПа),  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана;  $T$  — температура, К;  $\lambda$  — характеристика, называемая временем релаксации, это промежуток времени, в течение которого напряжения в металле ослабевают в  $e$  раз ( $e$  — основание натурального логарифма), с;  $t_k$  — продолжительность выдержки при заданной температуре  $T$ , с.

При условии очень длительной выдержки при отжиге, например при проведении термообработки в садочных печах, т. е.  $t_k \rightarrow \infty$ ,

$$e^{-t_k/\lambda} \rightarrow 0$$

и максимальный размер зерна

$$R_{\infty} = \frac{\lambda D a^2}{kT} \sigma_{\text{дв}0}. \quad (2).$$

Таким образом, зная значения коэффициента диффузии, среднего межатомного расстояния, времени релаксации, движущих напряжений при заданной температуре, можно найти максимальный размер зерна, получаемый при сочетании степени деформации, температуры нагрева и времени выдержки. Кроме того, можно подобрать режимы обработки, при которых можно получить требуемый размер зерна.

Необходимые данные для расчета размера зерна рассчитывались следующим образом.

Среднее межатомное расстояние  $a = \sqrt[3]{v_{\text{уд}}} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}}$ , где  $v_{\text{уд}} = \frac{M}{\rho}$  — удельный объем структуры;  $M$  — молярная масса сплава (г/моль),  $\rho$  — плотность сплава;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  — число Авогадро;  $M = \sum_{i=1}^{i=n} M_i q_i$ ,  $M_i$  — молярная масса каждого элемента;  $q_i$  — его мольная доля,  $n$  — количество элементов.

Например, для сплава АМг6, химический состав которого представлен в [4], молярная масса, плотность и среднее межатомное расстояние равны

$$\begin{aligned} M_{\text{АМг6}} &= M_{\text{Al}} \cdot q_{\text{Al}} + M_{\text{Mg}} \cdot q_{\text{Mg}} + M_{\text{Mn}} \cdot q_{\text{Mn}} = \\ &= 0,92 \cdot 27 + 0,07 \cdot 24 + 0,03 \cdot 55 = 26,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{АМг6}} &= \rho_{\text{Al}} \cdot q_{\text{Al}} + \rho_{\text{Mg}} \cdot q_{\text{Mg}} + \rho_{\text{Mn}} \cdot q_{\text{Mn}} = \\ &= 0,92 \cdot 2,7 + 0,07 \cdot 1,7 + 0,03 \cdot 7,2 = 2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \end{aligned}$$

$$a_{\text{АМг6}} = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}} = \sqrt[3]{\frac{26,9 \cdot 10^{-3}}{2,65 \cdot 10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}} = 2,56 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Расчет среднего межатомного расстояния для всей группы сплавов, включая АМг, АМг2, АМг3, АМг4, АМг5, показал, что значения  $a$  изменяются в пределах  $(2,551 \dots 2,5644) \cdot 10^{-10}$  м.

Время релаксации  $\lambda$  выбрали из справочника [5], в котором приведены зависимости в координатах напряжения  $\sigma$  — скорость деформации  $u$ . Расчеты показали, что для технического алюминия значения времени релаксации изменяются от 29 до 6,8 с в интервале температур 300...460 °С, а для сплава АМг6 — в пределах 20,7...5,8 с

в том же интервале температур для степени деформации 20 % обоих материалов. То есть добавки магния приводят к сокращению времени релаксации движущих напряжений в металле.

Коэффициент диффузии выбрали из справочника [6] для случая самодиффузии алюминия, т.к. пересчет весовых долей элементов в атомные показал, что в наиболее легированном магнием сплаве АМг6 на 92 атома алюминия приходится 7 атомов магния. Следовательно, при движении границы зерна происходит взаимное перемещение атомов алюминия.

Движущие напряжения в металле зависят от температуры нагрева и степени деформации. В данной работе было сделано допущение, что внутренние напряжения в сплаве не превышают предела его текучести при заданной температуре [7]. В качестве движущих напряжений были выбраны значения условного предела текучести при выбранных температурах.

На рис. 1 представлены кривые зависимости размера зерна в сплаве АМг6, построенные по экспериментальным данным, взятым из [3], и расчетным данным, полученным по формуле (2).

Анализ графиков показывает, что размер зерна увеличивается с ростом температуры при одинаковой степени деформации и длительной выдержке в течение 1 ч. При температуре около 380 °С графики пересекаются, т. е. расчетные и экспериментальные данные совпадают.

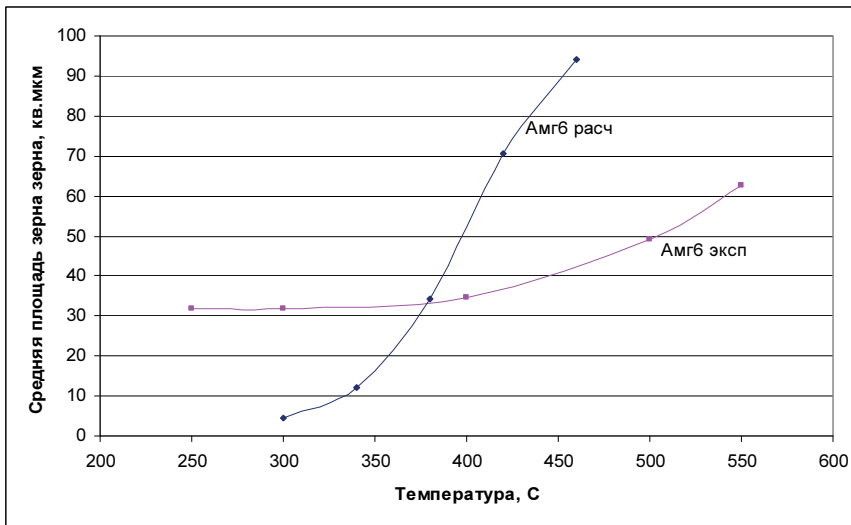


Рис. 1. Графики изменения размера зерна в сплаве АМг6

При меньших температурах экспериментальные данные имеют более высокие значения, при более высоких температурах — наоборот. Поскольку с увеличением температуры время релаксации напряжений и уровень внутренних напряжений уменьшаются, коэффициент диффузии растет, среднее межатомное расстояние практически не изменяется, а размер зерна увеличивается, то различие между графиками может быть связано с уровнем напряжений в металле, которые могут изменяться менее интенсивно при повышении температуры отжига.



**Литература**

- [1] Гречников Ф.В., Попов И.П., Ерисов Я.А. Получение алюминиевого сплава АМг10 с ультрамелкозернистой структурой прокаткой по ARB-методу. *Изв. Самарского науч. центра РАН*, 2013, т. 15, № 4–1, с. 165–169.
- [2] Колбасников Н.Г. *Теория обработки металлов давлением. Физические основы прочности и пластичности металлов: учеб. пособие*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГПУ, 2004, 266 с.
- [3] Рогельберг И.Л., Шпичинецкий Е.С. *Диаграммы рекристаллизации металлов и сплавов: справ.* Москва, ГНТИЛЧЦМ, 1950, с. 53–58.
- [4] *Авиационные материалы. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Кн. 1*. Москва, Изд-во ВИАМ, 1982, с. 38–92.
- [5] Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: справочник. Москва, Металлургия, 1973, с. 53.
- [6] Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. *Физические величины: справ.* Москва, Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
- [7] Савельева О.Г. Влияние режимов термической обработки и пластической деформации на формирование структуры алюминиевых сплавов. *Вестник СГАУ*, Самара, 2012, № 1 (32), с. 183–195.

УДК 621.77.014

**Исследование механизма разрушения  
многослойных металлических материалов  
в условиях одноосного растяжения**

© Путьрский Станислав Владимирович, Плоких Андрей Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[s.putirskiy@gmail.com](mailto:s.putirskiy@gmail.com), [plokhikh@bmstu.ru](mailto:plokhikh@bmstu.ru)

*Представлена модель разрушения многослойных металлических материалов на основе сталей. Предположение о механизме разрушения сделано на основе фрактрографических исследований излома после проведения испытаний образца в условиях одноосного статического растяжения. Описана пошаговая разработка модели разрушения в программе конечноэлементного моделирования LS-Dуна. По результатам моделирования сделан вывод о том, что реальное разрушение, происходящее путем формирования внутренних шеек в слоях многослойного материала, возможно только с локальным нарушением межслойной связи.*

**Ключевые слова:** многослойные материалы, разрушение, конечноэлементное моделирование, деформация.

Перспективным подходом в решении задачи получения многослойных металлических материалов с толщинами слоев субмикронного диапазона является использование многопроходной горячей пакетной прокатки композитных заготовок. Одна из

разработанных схем выбора исходной композиции многослойного материала позволяет проводить горячую деформацию в условиях, при которых составляющие композиции находятся в изоморфном состоянии, имея структуру аустенита. Главное условие сохранения многослойного строения при проведении горячей прокатки — специальный подбор бинарной композиции сталей, обеспечивающий повышение термодинамической активности легирующих элементов, тем самым снижая диффузионное проникновение последних через межслойные границы [1].

Исследования структуры и механических свойств многослойных материалов были проведены ранее на образцах, полученных из заготовок, состоящих из 100 чередующихся между собой слоев толщиной 0,5 мм, сталей 08X18H10 и У8 по 50 каждой марки. Образцы 1-го и 2-го цикла изготовления имели толщину 2 мм, и отличались внутренним строением. После 1-го цикла суммарное количество слоев в поперечном сечении заготовки составило 100, при толщине слоя 20 мкм, а после 2-го цикла — ~2000, при толщине слоя 0,8...1,0 мкм.

Исследование механических свойства полученных образцов при одноосном статическом растяжении (таблица) показало резкое снижение характеристик пластичности многослойного материала, на образцах, изготовленных вдоль направления прокатки. Такое снижение может быть обусловлено реализацией известного механизма образования внутренних шеек, характерного для разрушения материалов с высокой пластичностью [2].

**Механические свойства сталей и многослойного материала композиции У8 + 08X18H10 (толщина листовой заготовки 2 мм)**

Материал	$E$ , ГПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	НВ
Многослойный образец У8 + 08X18H10, горячая прокатка при 1000 °С, 1-й цикл	150	560	960	7	44	110
Многослойный образец У8 + 08X18H10, горячая прокатка при 1000 °С, 1-й цикл	180	880	1 470	4	18	450
У8 закалка от 780 °С, отпуск при 400 °С	209	1 230	1 420	10	37	370–470
08X18H10, закалка от 1020...1100 °С	196	205	510	40	40	170

Для анализа поведения материала в условиях растяжения использовался метод конечно-элементного моделирования, реализованный в программе LS-Dyna. Была разработана модель, которая состояла из ограниченного числа слоев, равного 7. Это было обусловлено тем, что полноразмерная модель многослойного материала включала бы большое количество элементов, что потребовало бы значительных вычислительных мощностей и времени для проведения расчета. При этом изначально было задано, что слои имеют разные характеристики прочности, т. е. расчет осуществлялся для материала сочетающего мягкие и твердые слои.

Первый вариант расчета был основан на гипотезе неразрывности слоев [3]. Расчеты показали, что формирование шейки в мягком слое происходит только после образования свободных поверхностей, при условии разрушения соседних, более твердых слоев (рис. 1, а). Однако реальная фрактографическая картина разрушения, которая демонстрировала бы вытягивание более мягких слоев, этого не показывает.

Поэтому во втором варианте расчета была учтена возможность расслоения. Можно видеть, что расслоение (сдвиг в плоскости слоя) локализовано в зоне наиболее близко примыкающей к месту разрушения твердого слоя (рис. 1, б). Однако наблюдаемое локальное сужение мягких слоев не соответствует реальным условиям деформации, поскольку этому препятствует соседние слои, которые не были включены в этот вариант расчета. Из этого следует важный вывод о необходимости введения запрета на перемещения по ширине материала для узлов, принадлежащих боковой поверхности модели. С этой же целью было наложено ограничение на перемещение узлов, принадлежащих верхней и нижней поверхностям слоев.

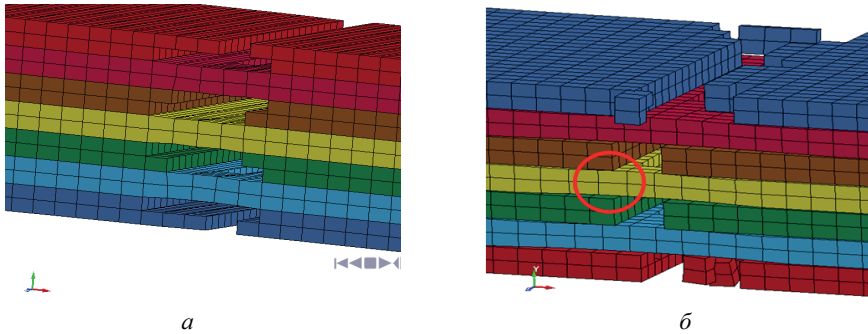


Рис. 1. Разрушение модели многослойного материала с неразрывными связями между слоями (а), с возможностью расслоения (б)

Третий вариант расчета (рис. 2) уточненной модели показал, что введенные ограничения коренным образом меняют картину деформации многослойного материала и его разрушение. На рисунке видно, что разрушению предшествует локальное нарушение связи между слоями материала и, в конечном итоге, разрушение с образованием внутренних шеек.

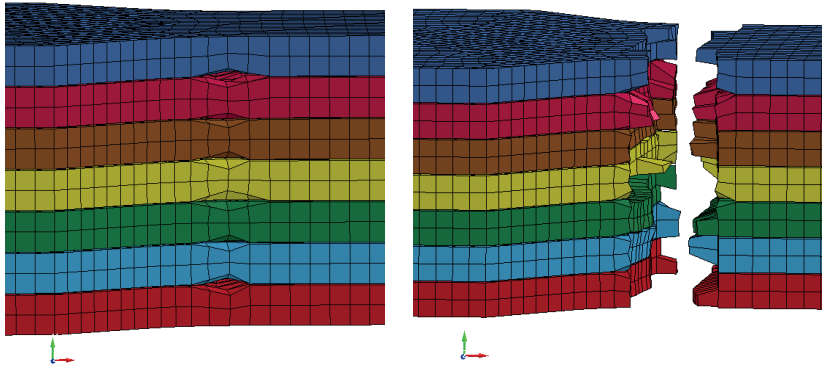


Рис. 2. Результат расчета разработанной модели

Таким образом, реальное разрушение, происходящее путем формирования внутренних шеек в слоях многослойного материала, возможно только с локальным нарушением межслойной связи. Без этого условия, материал слоев не будет иметь достаточной свободы для пластического течения и можно предположить, что в пре-

дельном случае будет разрушаться только путем образования скола, в плоскости перпендикулярной направлению проката. Следует отметить, что именно локализация деформации, вызванная наличием ненарушенных связей с соседними слоями вблизи очага разрушения, приводит к низким значениям общего удлинения многослойного образца при одноосном растяжении.

### Литература

- [1] Колесников А.Г., Плохих А.И., Комиссарчук Ю.С., Михальцевич И.Ю. Исследование особенностей формирования субмикро- и нанокристаллической структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2010, № 6, с. 44–49.
- [2] Табатчикова Т.И., Плохих А.И., Яковлев И.Л., Клюева С.Ю. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки. *Физика металлов и металловедение*, 2013, т. 114, № 7, с. 633–646.
- [3] Плохих А.И., Путьрский С.В. Моделирование процесса пластической деформации многослойных металлических материалов. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2014, т. 9, № 9 (136), с. 25–30.

УДК 621.791

## Исследование влияния параметров технологического процесса сварки алюминиевого трубопровода в целях снижения уровня дефектности сварных соединений

© Раку Алексей Андреевич, Муравьев Василий Илларионович,  
Бахматов Павел Вячеславович, Мазур Сергей Петрович

Россия, г. Комсомольск-на-Амуре,  
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

[ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

*Исследовалось влияние качества подготовки свариваемых и сварочных материалов, выполнения требований техники и технологии создания сварных соединений на качество швов. Из данных исследований следует, что наилучшее время травления как для обычной, так и для полированной проволоки составляет 45...75 с.*

**Ключевые слова:** *аргонодуговая сварка, дефекты, свариваемые и сварочные материалы, трубопровод, проволока.*

**Введение.** При проведении аргонодуговой электросварки неплавящимся электродом (АрДЭС) трубопроводов из алюминиевых сплавов АМг2М, АМг3, АМг6, ВАЛ 5 в сварных соединениях, предъявляемых на рентгенографический контроль, обнаруживаются недопустимые дефекты: поперечные трещины, несплавления и цепочки пор. Данные дефекты возникают даже в случае комиссионной проверки каче-

ства подготовки поверхности под сварку (проведение операции травления, шабрения торцов труб, механической зачистки кромок, обезжиривания ацетоном), процесса сварки, производимого с использованием современного сварочного оборудования фирмы Кетрри (Финляндия), и сварочных материалов, подготовленных в соответствии с технологической документацией. Процент сдачи деталей с первого предъявления, по данным рентгеновского контроля, не превышает 60...65 %, остальные 35...40 % деталей подвергаются исправлению (причем в ряде случаев неоднократно): разделка дефекта, подварка, рентгенографический контроль. Значительная дефектность процесса сварки трубопроводов приводит к неритмичности производства трубопроводов, что в свою очередь удлинит циклы сборки самолетов.

**Методика проведения исследований.** Исследовалось влияние качества подготовки свариваемых и сварочных материалов, выполнение требований техники и технологии создания сварных соединений на качество швов. Для этой задачи выбраны четыре марки алюминиевой сварочной проволоки диаметром 2 мм: Св АМг3, Св АМг6, Св АК5 и Св АМг6 полированная. Согласно сертификатам поставщика (ОАО «ВИЛС», г. Москва) проволока поставляется в бухте по ГОСТ 7871—75 тянутая, без термической и химической обработки в нагартованном состоянии. Также нужно особо отметить требования стандарта, предъявляемые к качеству поставляемой проволоки и методам контроля: проволока должна иметь чистую поверхность, без плен, трещин, закатов, вмятин, расслоений и резких перегибов. На поверхности проволоки допускаются местные дефекты: цвета побежалости, темные и белые пятна, не выходящие проволоку при контрольной зачистке за предельные отклонения по диаметру. Проверке размеров и качества поверхности проволоки подвергается каждая катушка, бухта или пучок партии. Химический состав проверяют химическим или спектральным методом у 3 %, но не менее двух катушек, бухт или пучков партии. Для проверки механических свойств отбирают 2 %, но не менее двух катушек, определяют временное сопротивление разрыву. Качество поверхности проволоки определяют визуально, без применения увеличительных приборов.

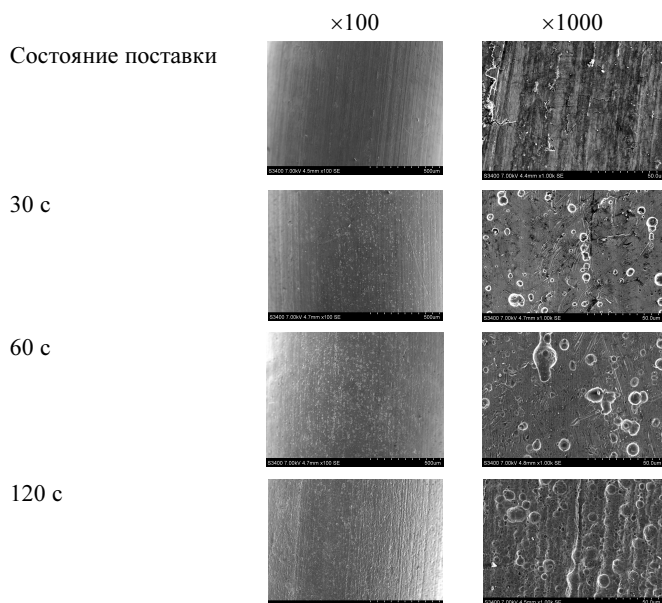
В качестве образцов основного металла было взято две марки: АМг2м и АМг3м, образцы вырезаны из одного участка соответствующих марке труб (толщина 1,2 мм) по ОСТ 1.90038—88 «Трубы авиационные из алюминиевых сплавов. Технические условия».

В заводских условиях проволока и основной металл подвергались обработке химическим способом в щелочном растворе согласно производственным инструкциям.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Анализ изображений микроструктуры поверхности образцов показал (рис. 1): поверхность исходной проволоки имеет высокую шероховатость, на поверхности присутствуют места закатов и продольные линии, возникшие при волочении проволоки; микровмятины, микротрещины протяженностью до 50 мкм, шириной до 15 мкм и достаточно глубокие. На поверхности полированной проволоки находятся разветвленные трещины шириной до 0,5 мкм и протяженностью 50 мкм и более.

При выдержке в ванне травления в течение 30 с видны значительные различия в состоянии поверхности проволоки. Происходит вытравливание поверхностного слоя, что приводит к выравниванию дефектов, сокращается количество поверхностных дефектов, шероховатость уменьшается, появляются волнообразные каналы, направленные вдоль линий волочения.

Выдержка в ванне травления до 60 с в целом улучшает поверхность проволоки относительно выдержки в 30 с. Значительно уменьшается шероховатость, увеличивается интервал чередования волнообразных каналов, количество дефектов сокращается.



**Рис. 1.** Проволока СвАМгб полированная при времени травления 30, 60 и 120 с

Поверхность образцов значительно изменяется при выдержке в ванне травления 120 с, образуется пемзообразная поверхность. Отчетливо видны округлые лункообразные места вытравливания и глубокие точечные вытравливания структурных составляющих. Таким образом, при выдержке в ванне травления в течение 2 мин вытравливается уже основной металл, и на поверхности образуется новая оксидная пленка, совершенно другая по строению, чем та, которая получается при производстве проволоки.

Анализ данных исследований показывает, что наилучшее время травления как для обычной, так и для полированной проволоки составляет 45...75 с.

**Заключение.** Сварка алюминиево-магниевых сплавов осложняется вероятностью порообразования, возникающей по причине формирования на их поверхности гидратированной оксидной пленки, сложно удаляемой традиционными методами, поэтому механизм порообразования при сварке алюминиево-магниевых сплавов отличен от механизма при сварке алюминия. Этим обусловлен большой процент дефектных деталей (свыше 30 %) из числа предъявляемых впервые и доработанных.

Установлено, что основной причиной образования пор является водород, накапливающийся в оксидной пленке свариваемых деталей. Причем технологические операции изготовления полуфабрикатов (литье, штамповка, фрезерование и др.), подготовки их под сварку (химическая обработка, шабрение, зачистка металлическими щетками) также способствуют этому процессу, образуя поверхностные дефекты, увеличивающие фактическую площадь соединяемых кромок, т. е. площадь, на которой оксидная пленка развивается, а в последующем переносится в сварочную ванну. Кроме того, операция холодного анодирования способствует образованию сульфидов на поверхности свариваемых деталей, что неизбежно приводит к трещинообразованию и возникновению несплавлений в сварных соединениях.

Анализ процесса плавления сварочной проволоки при ручной подаче в зону действия дуги показал неравномерное ее оплавление и сохранение (с увеличением размеров) поверхностных дефектов, способствующих накоплению капиллярно-конденсированной влаги и ее внесению при возобновлении сварки. Этот факт усугубляется тем, что сварщику приходится периодически останавливать сварку для вращения детали и осуществлять переварку части уже существующего шва, а также организацию замковых участков перекрытия формирующегося шва. На качество сварки отрицательно влияет отсутствие защиты корня шва.

Анализ данных исследований показывает, что наилучшее время травления как для обычной, так и для полированной проволоки, а также для основного металла (алюминиево-магниевого сплавы АМг2, АМг3, АМг6 и ВАЛ15) составляет 45...75 с, при этом обеспечивается устранение дефектов волочения и оптимальной величины оксидной пленки.

В повышении качества сварных соединений несомненно может способствовать уникальное высокоэффективное оборудование для ручной установки АрДЭС — установки Mastertig AC/DC 3000 и 3500 W, имеющие возможности регулировки частоты импульсов сварочного тока, функцию «Минилог», позволяющую использовать два уровня тока: сварочного и дежурного, при котором переход между уровнями осуществляется кратковременным нажатием переключателя горелки (для поддержания дугового воздействия при повороте детали) и др. Необходима также разработка и использование универсальных механизированных вращателей.

Безукоризненное выполнение сварщиком всех указаний специального технологического процесса в отношении выполнения сварных соединений из алюминиево-магневых сплавов не гарантирует качества швов, что свидетельствует о недостаточном качестве подготовки сварочной проволоки и основного металла (растравленная поверхность, наличие загрязнений), о недопустимости вынужденных остановок с прерыванием дугового разряда для поворота трубы вручную.

### Литература

- [1] Никифоров Г.Д. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. Москва, Машиностроение, 1972, 164 с.
- [2] Алов А.А., Филатов Ю.А., Левченкова Л.А. Пористость сварных соединений алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 1973, № 1, с. 70–71.
- [3] Рабкин Д.М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. Киев, Наукова думка, 1986, 256 с.
- [4] Никифоров Г.Д., Махортова А.Г. Условия возникновения пор при сварке алюминия и его сплавов. *Сварочное производство*, 1961, № 3, с. 5–8.
- [5] Никифоров Г.Д., Радченко С.В., Виноградов В.С. Кинетика диффузионного увеличения объема пузырьков газа в расплаве. *Сварочное производство*, 1980, № 5, с. 1–4.
- [6] ПИ 1.4.1555—2000. Сварка дуговая алюминиевых и магниевых сплавов в среде инертных газов. — Введ. 01-01-2001.
- [7] ГОСТ 7871—75. Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. — Введ. 1976-01-07. Москва, Изд-во стандартов, 1991, 13 с.
- [8] ГОСТ 4784—97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Введ. 2000-07-01. Минск, Изд-во стандартов, 2001, 20 с.

## Экспертиза разрушения ниппельной части замка бурильной трубы

© Суслина Анастасия Алексеевна, Пугачева Татьяна Михайловна

Россия, г. Самара, Самарский государственный технический университет

[Feelya93@mail.ru](mailto:Feelya93@mail.ru)

*Проведено исследование качества металла ниппельной части замка бурильной трубы. Определены механические свойства материала, химический состав материала, установлена марка трубной стали, изучена ее структура. Сделан вывод о причинах преждевременного выхода из строя исследуемого образца. Показано, что разрушение ниппельной части замка бурильной трубы произошло вследствие превышения эксплуатационных нагрузок при бурении скважины.*

**Ключевые слова:** *трубная сталь, механические испытания, микроструктура, химический состав, разрушение, спектральный анализ.*

Цель данной работы — установить причины выхода из строя бурильной трубы при бурении скважины.

В ходе работы была проведена экспертиза разрушенной ниппельной части замка бурильной трубы ЗПР 108-51-2 Ø89×8 мм группы прочности «Л» после аварии на скважине. Труба работала течение 10 ч (по крайней мере с 00:00 до 10:00 до момента разрушения резьбы) — растягивающей нагрузки (до 77...86 т) и крутящего момента (до 13...14 кН·м). На рис. 1 представлен внешний вид объекта исследования.



Рис. 1. Внешний вид объекта исследования

Из фрагментов объекта исследования были изготовлены образцы для определения химического состава металла, испытаний на одноосное растяжение, ударную вязкость, твердость, а также для металлографических исследований структуры.

Химический состав стали определяли методом спектрального анализа на атомно-эмиссионных спектрометрах с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6500 и SA-2000. Наличие неметаллических включений определяли на нетравленных шлифах.

Испытания на растяжение проводили на разрывной машине Р-10М-авто на продольных образцах в соответствии с ГОСТ 10006—80.

Испытания на ударную вязкость выполняли на образцах Шарпи с V-образным надрезом), на маятниковом копре МК-30 при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 9454—78.

Замер твердости осуществляли методом Роквелла на твердомере ТК-2М по шкале HRC при комнатной температуре с последующим переводом в шкалу HB [3].



Анализ загрязненности стали неметаллическими включениями проводили на не-равленных микрошлифах с продольным расположением волокна с помощью оптического микроскопа Leitz MM6 (Германия) в соответствии с ГОСТ 1778—80.

Особое внимание было уделено микроструктуре поврежденных областей. Анализ микроструктуры металла выполняли с использованием оптического микроскопа Leitz MM6 на микрошлифах с продольным расположением волокна в соответствии с ГОСТ 5639—82. Фотосъемку микроструктуры осуществляли на микрорентгеноспектральном анализаторе Jeol Superprobe 733 (Япония).

Результат химического анализа металла приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав объектов исследования**

Маркировка объекта	Содержание элементов, %									
	C	Mn	Cr	Si	Ni	Cu	Mo	V	S	P
X12	0,42	0,55	0,9	0,23	0,16	0,20	0,20	следы	0,011	0,011
40ХМФА ГОСТ 4543—71	0,37–0,44	0,4–0,7	0,8–1,1	0,17–0,37	—	—	0,2–0,3	0,1–0,18	< 0,025	< 0,025

Материал образца X12 приближен к стали марки 40ХМА [1].

Замки для бурильных труб изготавливаются из стали марки 40ХМФА по ГОСТ 4543-71. Допускается изготовление замков из других сталей, по механическим свойствам не ниже, чем у марки стали 40ХМФА [2].

Микроструктура образца X12 характеризуется мелкозернистой структурой сорбита с 9-м номером зерна. Структурная полосчатость по сечению отсутствует. Максимальная загрязненность металла точечными оксидами не превышает 1 балла.

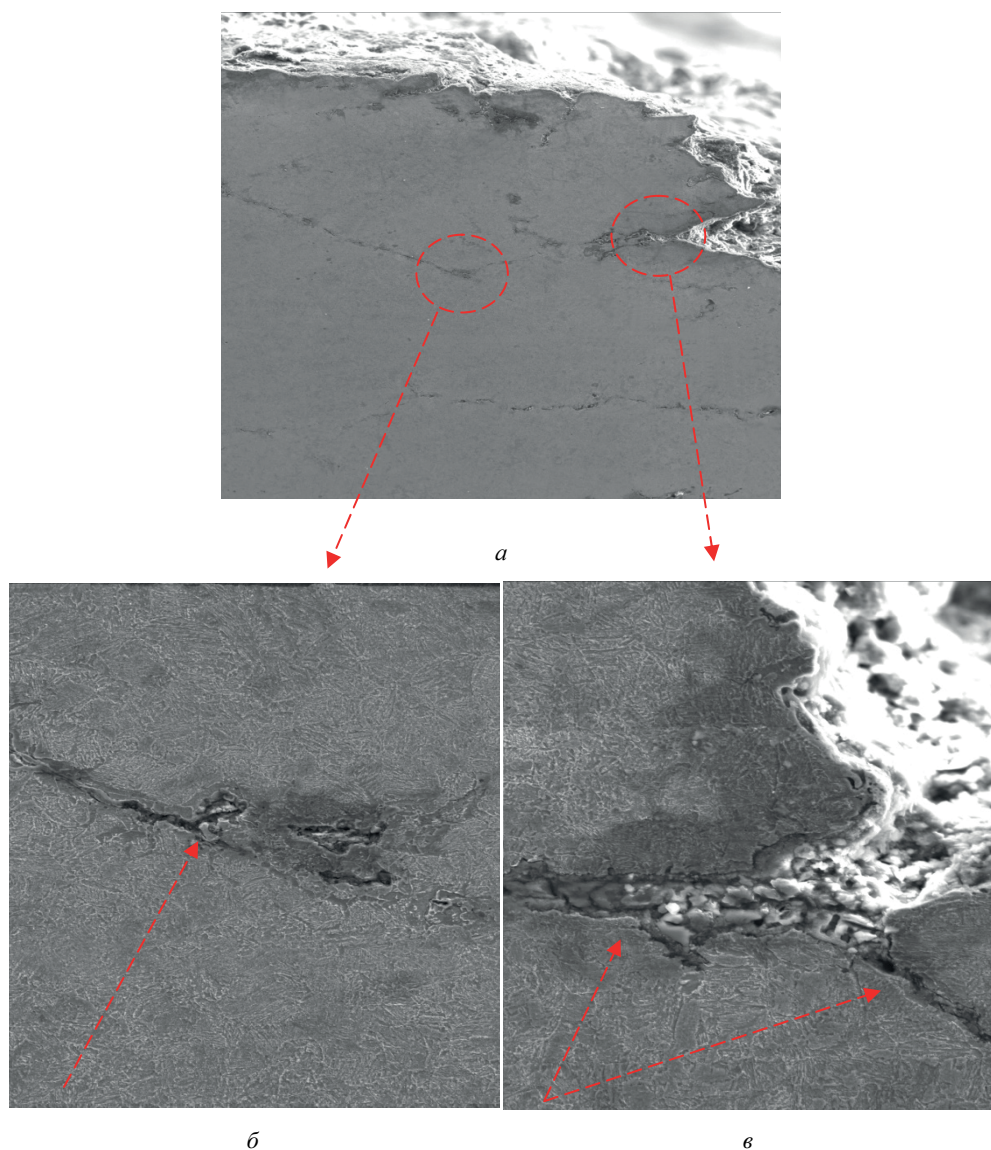
Анализ микроструктуры металла в области повреждений объектов исследования показал распространение трещин и расслоение металла по сечению образца в области разрушения (рис. 2).

Результаты исследования качества металла приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты исследований металла бурильной трубы**

№ п/п	Параметр исследований	Нормативный документ	Результат	Примечания
1	Химический состав металла	ГОСТ 4543	Соответствует	Химический состав приближен к стали марки 40ХМА
2	Механические характеристики металла	ТУ 3663-697-07501107-2004	Соответствует	Предел прочности 1067,4 МПа. Предел текучести, 877,8 МПа. Относительное удлинение 17,0 %. Относительное сужение 55,9 %. Ударная вязкость 6,8 кгс·м/см <sup>2</sup> . Твердость 326 НВ.
3	Металлография	Не регламентируется	Не регламентируется	Микроструктура сорбит. Размер зерна 9-й номер. Структурная полосчатость 0 б. Точечные оксиды 1 б. Строчечные оксид: 0 б. Сульфид: 2 б.



**Рис. 2.** Область разрушения объекта исследования:  
*a* — расслоение и трещины металла,  $\times 100$ ; *b* — расслоение металла,  $\times 1000$ ; *c* — трещина,  $\times 1000$

В ходе экспертизы было установлено, что объект исследования соответствует требованиям по химическому составу и механическим свойствам [2].

По окончании экспертизы установили, что причина разрушения ниппельной части замка бурильной трубы ЗПР 108-51-2  $\text{Ø}89 \times 8$  мм группы прочности «ЛБ» связана с превышением эксплуатационных нагрузок при бурении скважины.

Литература

- [1] ГОСТ 4543—71. *Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.* Москва, Изд-во стандартов, 2001.
- [2] ТУ 3663-697-07501107-2004. *Замки приварные для бурильных труб (высокомоментные). Технические условия.*
- [3] ГОСТ 9013—59. *Металлы. Метод измерения твердости.* Москва, Изд-во стандартов, 2001.

УДК 669.715:621.78

## Прогнозирование коррозионных свойств изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов

© Фам Хонг Фу, Пучков Юрий Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[phamphumt8@gmail.com](mailto:phamphumt8@gmail.com)

*Исследовано изменение коррозионных свойств термически упрочненного алюминиевого сплава В1341 в зависимости от длительности выдержки при изотермической закалке. Приведена математическая зависимость коррозионной характеристики от времени выдержки при закалке. Рассмотрено влияние химического и структурного состава на коррозионные свойства сплава системы Al–Mg–Si. Сделан вывод о возможности прогнозирования коррозионных свойств термически упрочненных алюминиевых сплавов по данным о материале и режиме термической обработки.*

**Ключевые слова:** *алюминиевые термически упрочняемые сплавы, диаграмма достижения свойств, коррозионные свойства, ток коррозии.*

Диаграммы достижения свойств позволяют прогнозировать характеристики изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов. Основным методом построения этих диаграмм — метод изотермической закалки. Коррозионные свойства исследовали потенциометрическим, потенциодинамическим, металлографическим методами, а также методом импедансной электрохимической спектроскопии.

Целью данной работы является исследование влияния продолжительности изотермической выдержки на коррозионные свойства изучаемых сплавов и построение диаграмм достижения коррозионных свойств с применением метода изотермической закалки.

На рис. 1 приведена схема определения закалочного фактора по кривой охлаждения, а на рис. 2 показано изменение тока коррозии сплава В1341 в 0,04 М NaCl при разных длительностях выдержки при экзотермической закалке.

Результаты исследования показали, что с изменением продолжительности выдержки при изотермической закалке массовый показатель коррозии изменяется нелинейно и приобретает максимальные значения при средних по продолжительности выдержках. Такой характер изменения массового показателя коррозии связан с зонным,

фазовым и коагуляционным этапами старения, развивающимися последовательно при изотермической выдержке. Максимальная скорость коррозии сплава со структурой, сформировавшейся в результате фазового старения, связана с возникновением множественных активных гальванических пар между включениями выделившейся фазы и матричным твердым раствором. С использованием метода изотермической закалки построены диаграммы достижения массового показателя коррозии и стойкости к питтинговой коррозии термически упрочняемого сплава В1341 системы Al–Mg–Si.

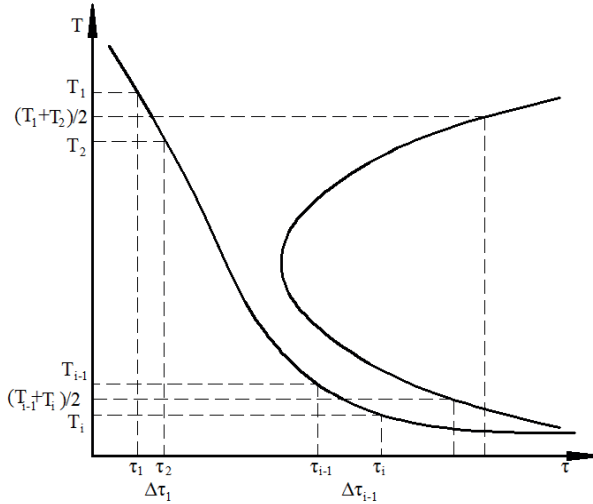


Рис. 1. Схема определения закалочного фактора по кривой охлаждения и С-образной кривой

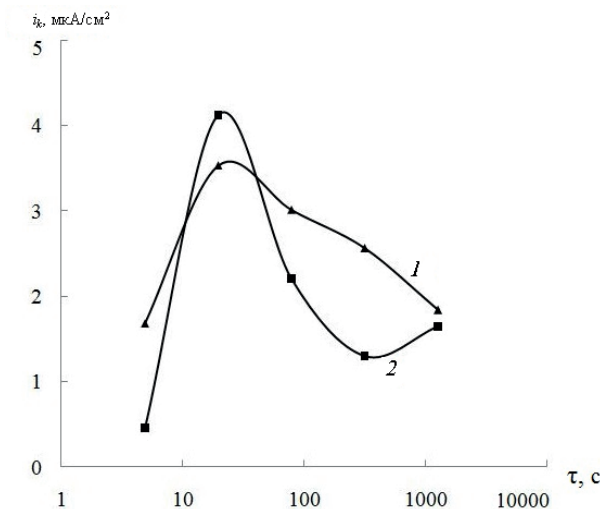


Рис. 2. Изменение тока коррозии сплава В1341 в 0,04 М NaCl при разных длительностях выдержки при изотермической закалке:  
1 — выдержка при 350 °С; 2 — выдержка при 300 °С

Расчет режимов охлаждения в различных точках изделия выполнен на основе применения программного комплекса ANSYS. Для реализации разработанной методики использована оптимизация с применением метода покоординатного спуска и программного комплекса MatLab.

Получены аналитические зависимости массового показателя коррозии и стойкости к питтинговой коррозии сплава В1341 после закалки и искусственного старения от скорости охлаждения при закалке и величины закалочного фактора.

### Литература

- [1] Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Попов В.И. Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплава В-1341 системы Al–Mg–Si. *Авиационные материалы и технологии*, 2011. № 1. С. 2–10.
- [2] Пучков Ю.А., Ван Яньлун, Полянский В.М. Исследование распада переохлажденного твердого раствора сплава В91 системы Al–Zn–Mg–Cu. *MuTOM*, 2010, № 8, с. 7–12.
- [3] Staley J.T., Doherty R.D., Jaworski A.P. *Metal Trans*, 1993, no 24A, pp. 2417–2427.

УДК 666.775-798.2

## Анализ методов получения нанопорошка нитрида алюминия

© Хисамутдинова Анастасия Вадимовна, Титова Юлия Владимировна

Россия, г. Самара, Самарский государственный технический университет

[abolotskaia@mail.ru](mailto:abolotskaia@mail.ru)

*Исследована возможность получения нанопорошка AlN различными методами. Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с использованием системы гексофторалюминат натрия — азид натрия в процессе СВС-Аз получен наноструктурированный порошок нитрида алюминия с диаметром волокон менее 50...150 нм.*

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, алюминий, гексофторалюминат натрия, азид натрия, нитрид алюминия, нанопорошок.

В настоящее время большим спросом пользуется нанопорошок нитрида алюминия, который нашел широкое применение в различных отраслях промышленности, включая изготовление подложек для микроэлектроники, теплопоглотителей в светодиодной технике и высокоомощной электронике. AlN обладает исключительными механическими, термическими, химическими, оптическими и диэлектрическими свойствами, такими как высокая теплопроводность (319 В/м·К), высокое удельное электросопротивление ( $> 10^{13}$  Ом), низкий коэффициент теплового расширения ( $4,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), низкая диэлектрическая проницаемость, высокая прочность, ширина запрещенной зоны (6,2 эВ) [1–3].

Наночастицы нитрида алюминия трудно получить с помощью обычного механического измельчения, поэтому было разработано большое количество химических и физико-химических технологий для его получения, таких как прямое азотирование, плазмохимический синтез, карботермический синтез, химическое осаждение из газовой фазы, взрыв алюминиевой проволоки и др.

В работе [4] представлены результаты синтеза в плазме нанопорошков AlN с использованием пароплазменной струи алюминия, генерируемой в устройстве капиллярной плазмы, взаимодействующей с газообразным азотом и аммиаком в реакционной камере. При использовании в качестве реакционного газа чистого азота образуется нанокомпозит Al/AlN со сферическими частицами размером 50...100 нм. При добавлении аммиака содержание азота в образцах увеличивается с 5,5 до 23 %, а также уменьшается средний размер частиц. Нанопорошок AlN с наименьшим размером частиц 8 нм синтезировали при содержании аммиака — 100 %.

Нитрид алюминия был получен методом химического осаждения из газовой фазы при температуре 1044 °С. Полученные порошки состоят из одной фазы AlN, независимо от соотношения компонентов и скоростей подачи аммиака и азота. Синтезированные частицы имеют сферическую форму, средний диаметр менее 0,1 мкм.

В работе [6] микроленты нитрида алюминия длиной до нескольких микрометров были успешно синтезированы в реакторе из коррозионно-стойкой (нержавеющей) стали в отсутствие растворителей и катализаторов. Безводный хлорид алюминия и азид натрия помещали в реактор с атмосферой сухого чистого азота, а затем реактор помещали в печь и нагревали. Температуру реакции задавали 450 °С и поддерживали в течение 24 ч, затем реактор вынимали из печи и естественным образом охлаждали до комнатной температуры. Побочный продукт хлорид натрия и другие примеси удаляли водой, а затем продукт сушился.

Процесс образования нитрида алюминия в условиях электрического взрыва алюминиевой проволоки в атмосфере азота был исследован авторами работы [7]. Получен порошок с содержанием AlN, равным 93 %, и удельной поверхностью 14 м<sup>2</sup>/г.

Значительным технологическим потенциалом обладает открытый в 1967 г. академиком А.Г. Мержановым и представителями его научной школы самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) тугоплавких соединений в режиме горения, являющийся эффективной основой для получения продуктов различных классов, в том числе нанопорошков нитридов [8, 9]. Тепловыделение в зоне реакции и сопровождающий его рост температуры возникают за счет собственных энергетических возможностей исходной системы без использования каких-либо нагревающих устройств. Данное обстоятельство значительно упрощает технологический процесс синтеза материалов и удешевляет его.

В работе [10] представлены результаты исследования четырех вариантов синтеза нитрида алюминия по классической технологии СВС в атмосфере газообразного азота: синтез AlN без добавок, с добавкой хлорида или фторида аммония и комплексным использованием газифицирующих добавок.

Степень превращения алюминия в нитрид возрастает с увеличением доли алюминия в шихте и достигает максимальной величины (99,5 мас. %) при содержании алюминия в шихте в количестве 50 %. С увеличением доли хлорида аммония в шихте до 10 % диаметр частиц нитрида алюминия уменьшается с 8...12 до 1...2 мкм, а удельная поверхность возрастает до 1,5 м<sup>2</sup>/г.

С 1970 г. в СамГТУ разрабатывается азидная технология СВС (СВС-Аз), которая позволяет получать микро- и нанопорошки нитридов, карбидов и композиций на их основе при использовании порошка азиды натрия NaN<sub>3</sub> и галоидных солей [11]. Если

в процессах СВС использовать не газообразный азот, а твердый азотирующий реагент  $\text{NaN}_3$ , то появляется возможность твердофазного смешивания горючего и окислителя (азота) до синтеза. В результате получается смесь исходных реагентов, при горении которой резко повышается концентрация реагирующих веществ в зоне синтеза и исчезают фильтрационные затруднения, возникающие при сжигании пористой порошковой засыпки в атмосфере азота. Авторами работы [11] предложены уравнения получения высококачистого порошка нитрида алюминия.

Преимуществом данной технологии является простота технологического оформления относительно описанных выше технологий, высокая производительность, отсутствие затрат на электроэнергию, высокая степень чистоты получаемых продуктов. Однако в результате горения указанных смесей продукты реакции образуются в виде спека. Размер частиц порошка нитрида алюминия после измельчения спека составляет 1...50 мкм. Таким образом, данные системы не позволяют синтезировать нанопорошок  $\text{AlN}$ .

Использование в качестве исходного компонента не порошка чистого металла, а прекурсора-галогенида алюминия позволяет уменьшить температуру горения, провести реакцию на атомарном уровне и существенно снизить размер частиц порошка синтезируемого тугоплавкого соединения этого элемента [9]. При этом появляется возможность синтезировать порошки с размерами частиц менее 100 нм.

Использование системы фторид алюминия — азид натрия в процессе СВС-Аз обеспечило получение наноструктурированного порошка нитрида алюминия с диаметром волокон менее 50...150 нм. Исследование зависимостей температуры и скорости горения от давления внешнего азота в реакторе, относительной плотности исходной шихты и диаметра образца позволило установить оптимальные значения параметров синтеза для получения нановолокон нитрида алюминия: давление — 4 МПа, относительная плотность — 0,34, диаметр образца — 30 мм.

### Литература

- [1] Иваненко Е.М. прогноз отраслевой структуры потребления российского рынка нанопорошков. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2013, № 1 (6), с. 67.
- [2] Хабас Т.А. *Нанопорошки металлов в технологии керамики*. Томск, Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009, 230 с.
- [3] Rempel A.A. Nanotechnologies. Properties and applications of nanostructured materials. *Russian Chemical Reviews*, 2007, vol. 76, p. 435.
- [4] Kim K. Plasma synthesis and characterization of nanocrystalline aluminum nitride particles by aluminum plasma jet discharge. *Journal of Crystal Growth*, 2005, no 283, pp. 540–546, doi: 10.1016/j.jcrysgr.2005.06.018.
- [5] Wu N., Tsai M., Wang M., Liu H. he morphology and formation mechanism of aluminum nitride nanocrystals synthesized by chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 2000, № 208, pp. 189–196.
- [6] Wang H.L. Synthesis of hexagonal  $\text{AlN}$  microbelts at low temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, pp. 580–582.
- [7] Бекетов И.В. Получение нанопорошка нитрида алюминия методом электрического взрыва проволоки. *Вторая Всерос. конф. по наноматериалам «НАНО 2007»* (13–16 марта 2007 г., Новосибирск), с. 109.
- [8] Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. *Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 567 с.

- [9] Мержанов А.Г., Мержанов А.Г., Боровинская И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений. *Докл. АН СССР*, 1972, т. 204, № 2, с. 336–339.
- [10] Загоржевский В.В., Боровинская И.П. Сачкова Н.В. Синтез нитрида алюминия в режиме горения смеси  $Al + AlN$ . *Неорганические материалы*, 2002, № 11, т. 38, с. 1340–1350.
- [11] Амосов А.П., Бичуров Г.В. *Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 526 с.
- [12] Титова Ю.В., Шиганова Л.А., Майдан Д.А., Бичуров Г.В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноструктурированного порошка нитрида алюминия с использованием фторида алюминия и азиды натрия. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 2012, с. 25–29.

УДК 28.17.19

## Получение композиции нанопорошков $AlN-TiN$ в режиме СВС-АЗ

© Хусаинова Татьяна Наильевна, Бичуров Георгий Владимирович

Россия, г. Самара, Самарский государственный технический университет

[666tatiyanka@mail.ru](mailto:666tatiyanka@mail.ru)

*Изложен метод получения композиции на основе нитрида титана и нитрида алюминия путем самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с применения неорганических азидов. Выбраны возможные химические уравнения реакций получения данной нитридной композиции. Рассчитаны условия и рабочие режимы проведения синтеза. Выполнен рентгенофазовый, микроструктурный и гранулометрический анализ по установлению качества полученных продуктов.*

**Ключевые слова:** композиция, синтез, нитридная керамика, СВС, твердопламенное горение.

Высококачественные керамические материалы уже сегодня открывают широкие возможности их практического применения. Благодаря уникальным свойствам, техническая керамика считается одним из наиболее эффективных материалов нашего времени. Керамические материалы, используемые в технике в качестве технической керамики или высококачественной керамики, должны удовлетворять самым высоким требованиям к свойствам материалов. К таким свойствам относятся износоустойчивость, жаростойкость, устойчивость к высокой температуре и коррозии, а также биологическая совместимость и совместимость с пищевыми продуктами.

Керамика на основе нитрида алюминия ( $AlN$ ) обладает уникальными свойствами: высокой теплопроводностью, высокой коррозионной стойкостью, низкой диэлектрической постоянной, высоким электрическим сопротивлением, низкой плотностью. Поэтому  $AlN$  нашла широкое применение в производстве огнеупоров, полупроводников, электронных подложек и др.



Однако нитрид алюминия является очень хрупким материалом, и для того, чтобы избежать данного недостатка, необходимо повысить его механические свойства, внося в состав керамики на основе нитрида алюминия упрочняющий материал. Таким материалом является нитрид титана.

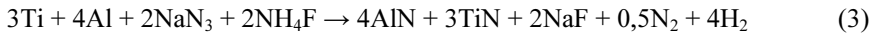
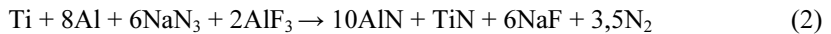
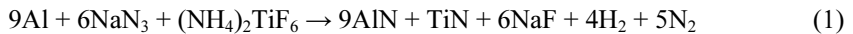
Композиция TiN–AlN обладает превосходными свойствами: повышенной твердостью, ударной вязкостью, высокой термостойкостью, стойкостью к окислению, исключительными абразивными свойствами, эрозионной стойкостью, износостойкостью и др.

При наноразмерности частиц данной композиции все описанные свойства возрастают в разы. Для достижения таких свойств компоненты должны иметь фракцию не более 100 нм и быть равномерно перемешанными друг с другом, без местных концентраций того или иного компонента.

Исключая механическое смешивание, поскольку в случае его применения возникает неоднородное перемешивание, укрупнение частиц, перегрев, разложение нитридов и др. можно решить, получив компоненты одновременно методом синтеза из смеси исходных компонентов — самораспространяющимся высокотемпературным синтезом с применением галогидных солей и неорганических азидов (СВС-Аз).

Данный метод позволяет регулировать дисперсность и структуру синтезируемых продуктов и доводить их до наноразмерного уровня [1, 2]. Перспективы использования метода СВС-Аз обусловлены простотой технологического оборудования, малой продолжительностью, экономичностью процесса и высокой степенью чистоты целевых продуктов, что главным образом сказывается на физико-химических и механических свойствах конечного изделия.

Для получения композиции нитридов алюминия и титана в режиме СВС-Аз были выбраны следующие уравнения химических реакций:



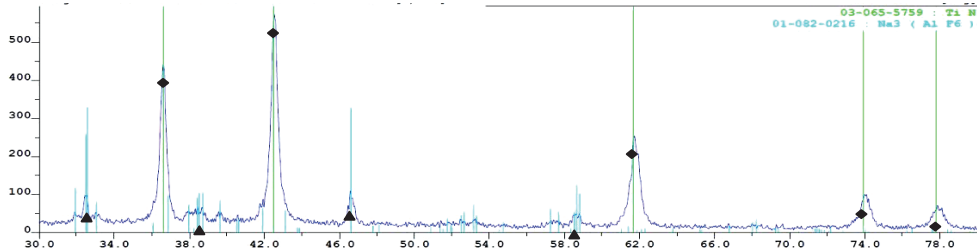
При исследовании процесса горения предложенных систем и возможности синтеза композиции нитридов алюминия и титана использовали порошки различных химических веществ, те или иные свойства которых, такие как, например, чистота, содержание основного вещества, дисперсность и т. д., так или иначе отражаются на качестве целевого продукта [3].

Для определения возможности протекания процесса синтеза были выполнены термодинамические расчеты с помощью компьютерной программы Thermo. Для всех предложенных систем были получены соответствующие значения теплового эффекта, адиабатической температуры горения и состав продуктов синтеза.

Результаты термодинамического расчета показали, что все химические реакции взаимодействия являются экзотермичными. Максимальная температура горения (1797 °С) наблюдается в системе 3Ti–4Al–2NaN<sub>3</sub>–2NH<sub>4</sub>F. Ожидаемыми продуктами синтеза являются нитриды титана и алюминия, водород, а также фторид натрия, который полностью удаляется с помощью промывки дистиллированной водой в соотношении 1:10.

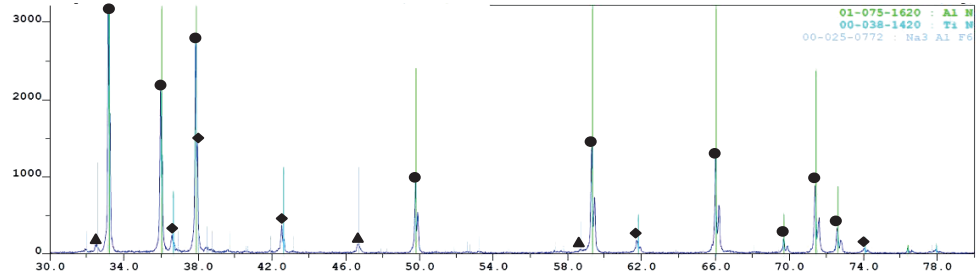
Для определения состава продуктов горения был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) на порошковом дифрактометре ARL X'tra-138 (рис. 1–4).

Определение топографии поверхности и морфологии частиц синтезированных порошков проводилось с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6390 (рис. 5).



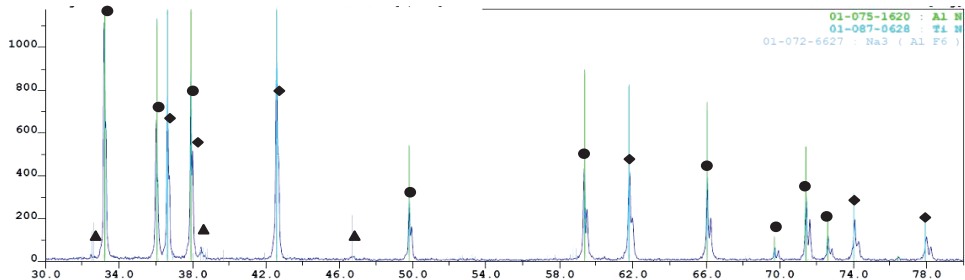
**Рис. 1.** Результаты рентгенофазового анализа продуктов, синтезированных в системе  $9\text{Al}-6\text{NaN}_3-(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ :

◆ — TiN; ▲ —  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$



**Рис. 2.** Результаты рентгенофазового анализа продуктов, синтезированных в системе  $\text{Ti}-8\text{Al}-6\text{NaN}_3-2\text{AlF}_3$ :

◆ — TiN, ▲ —  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ; ● — AlN



**Рис. 3.** Результаты рентгенофазового анализа продуктов, синтезированных в системе  $3\text{Ti}-4\text{Al}-2\text{NaN}_3-2\text{NH}_4\text{F}$ :

◆ — TiN; ▲ —  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ; ● — AlN

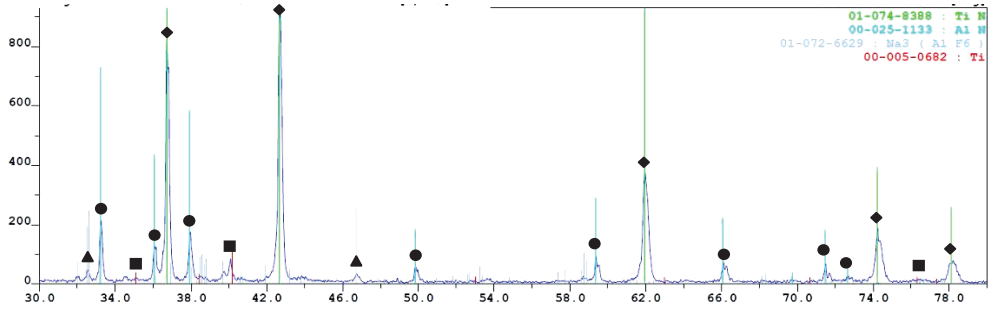


Рис. 4. Результаты рентгенофазового анализа продуктов, синтезированных в системе 11Ti-4Al-6NaN<sub>3</sub>-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>:  
 ◆ — TiN; ▲ — Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>; ● — AlN; ■ — Ti

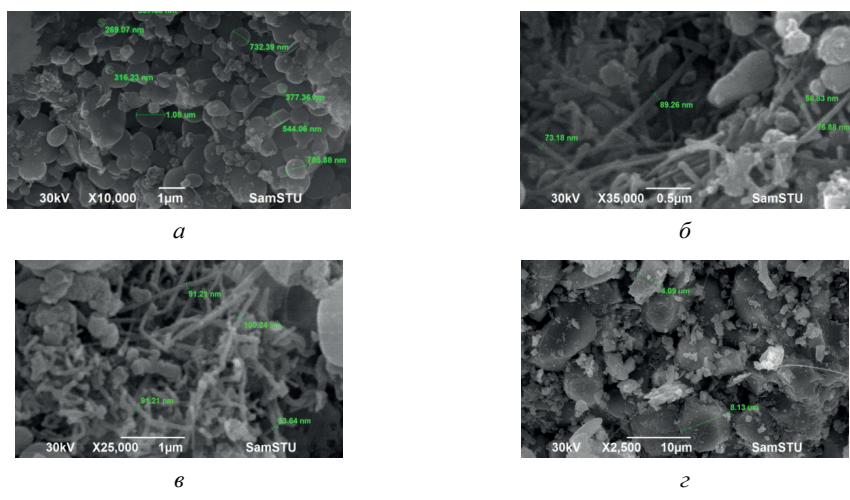


Рис. 5. Морфология частиц продуктов горения:  
 а — 9Al-6NaN<sub>3</sub>-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>; б — Ti-8Al-6NaN<sub>3</sub>-2AlF<sub>3</sub>; в — 3Ti-4Al-2NaN<sub>3</sub>-2NH<sub>4</sub>F; г — 11Ti-4Al-6NaN<sub>3</sub>-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>

Исходя из результатов рентгенофазового и микроструктурного анализов, можно сделать вывод о том, что для синтеза композиции нитридов титана и алюминия целесообразно использовать систему 3Ti-4Al-2NaN<sub>3</sub>-2NH<sub>4</sub>F. Продукты горения указанной системы представляют собой смесь порошков AlN и TiN и незначительное количество Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> (< 5 %), который можно удалить с помощью дополнительной промывки в дистиллированной воде. Средний размер частиц нитридов титана и алюминия составляет 70 нм. Гранулометрический состав порошков определяли с помощью ультразвукового диспергатора УДН-2.

Далее исследовали зависимость параметров синтеза и характеристик получаемого порошка от соотношения компонентов в исходной смеси. Уравнение реакции для синтеза композиции нитридов алюминия и титана выглядит следующим образом:



где  $x$  — количество молей алюминия в исходной шихте.

В табл. 1 представлены результаты исследования параметров синтеза целевой композиции. Температуры и скорости горения смесей с различным содержанием алюминия регистрировались с помощью двух термопар W–Re, которые соединены с компьютером посредством АЦП.

Таблица 1

**Результаты исследования параметров синтеза композиции нитридов алюминия и титана**

Шихта	Температура горения, °С	Скорость горения, см/с
Ti+1Al+NaN <sub>3</sub> +NH <sub>4</sub> F	1460	0,25
Ti+2Al+NaN <sub>3</sub> +NH <sub>4</sub> F	1440	0,30
Ti+3Al+NaN <sub>3</sub> +NH <sub>4</sub> F	1380	0,35
Ti+4Al+NaN <sub>3</sub> +NH <sub>4</sub> F	1350	0,40
Ti+5Al+NaN <sub>3</sub> +NH <sub>4</sub> F	1240	0,50

Из данных табл. 1 следует, что с увеличением содержания алюминия температура горения снижается, а скорость, напротив, возрастает. Известно, что нитрид алюминия и нитрид титана образуются при температурах 720 и 950 °С соответственно. Таким образом, температуры распространения фронта горения достаточны для образования целевых нитридов.

Результаты РФА показали, что продукты, синтезированные из систем Ti–xAl–NaN<sub>3</sub>–NH<sub>4</sub>F, состоят из целевых нитридов титана и алюминия.

Размер частиц порошка конечных продуктов синтеза определили с помощью лазерного анализатора частиц «Анализетте-22».

Установлено, что увеличение содержания алюминия в исходной шихте незначительно влияет на размер частиц целевой композиции (20...70 мкм), и только при добавлении 5 моль алюминия наблюдается заметный рост размера частиц до 200...300 мкм.

Таким образом, исследуемая система Ti–Al–NaN<sub>3</sub>–NH<sub>4</sub>F позволила синтезировать композицию порошков нитрида титана и нитрида алюминия требуемого качества.

**Литература**

- [1] Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. *Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учеб. пособие*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 567 с.
- [2] Бичуров Г.В., Шиганова Л.А., Титова Ю.В. *Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридных композиций*. Москва, Машиностроение, 2012, 519 с.
- [3] Мержанов А.Г., Мукасян А.С. *Твердопламенное горение*. Москва, ТОРУС ПРЕСС, 2007, 336 с.

УДК 621.785

## Технологические аспекты процесса жидкостного борирования сталей и чугунов

© Шкляр Никита Евгеньевич, Смирнов Андрей Евгеньевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[boogyzavr@yandex.ru](mailto:boogyzavr@yandex.ru)

*На современном рынке инжиниринговых услуг представлен широчайший спектр технологий упрочнения поверхности. К диффузионным способам повышения абразивной износостойкости относятся борирование в порошках и борирование в пастах. Это малопроизводительные, трудоемкие и дорогие способы. Жидкостное безэлектролизное борирование, несмотря на меньшую себестоимость и бóльшую производительность, не получило распространения в промышленности ввиду отсутствия отлаженной промышленной технологии, энергоемкости установки и сложности процесса. Известные составы расплавов на основе тетрабората натрия и карбида бора [1] имеют ряд таких недостатков, как низкая жидкотекучесть расплава, сложность контроля химического состава расплава, неравномерность толщины покрытия по глубине ванны и, самое важное, отсутствие методики контроля и восстановления химической активности расплава.*

**Ключевые слова:** борирование, абразивное изнашивание, износостойкость, химико-термическая обработка.

Целью работы является разработка промышленной технологии жидкостного борирования. Помимо получения определенных механических и эксплуатационных свойств поверхности, промышленная технология должна отвечать таким требованиям, как технологичность насыщающей среды, возможности проведения последующей термической обработки (нормализация, закалка, закалка с изотермической выдержкой), и быть экологически чистой.

Технологичность насыщающей среды определяется прежде всего ее жидкотекучестью, способностью получать одно- и двухфазные слои, равномерностью толщины и структуры получаемого покрытия по глубине тигля с насыщающей средой, технологией контроля и регенерации химического состава расплава, незначительным изменением шероховатости поверхности после борирования и простотой очистки деталей от остатков расплава, связанной с их полным растворением в промывочной воде.

Методы контроля и корректировки химического состава расплава также являются одним из важнейших критериев промышленной технологии.

Экологичность процесса определяется отсутствием вредных газообразных и жидких отходов.

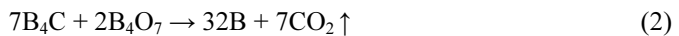
Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

- разработать высокотехнологическую рабочую среду, обеспечивающую повышенную жидкотекучесть, растворимость в воде, способность не изменять шерохова-

тость поверхности деталей и поддерживать постоянную насыщающую способность расплава во всем объеме расплава;

- разработать восстановитель и методику контроля и восстановления химического состава расплава для поддержания постоянной насыщающей способности расплава на протяжении длительного времени работы ванны;
- разработать технологию и комплекс экологически чистого высокопроизводительного оборудования для жидкостного борирования;
- определить характеристики упрочненного слоя, полученного на сталях различного класса и чугунах.

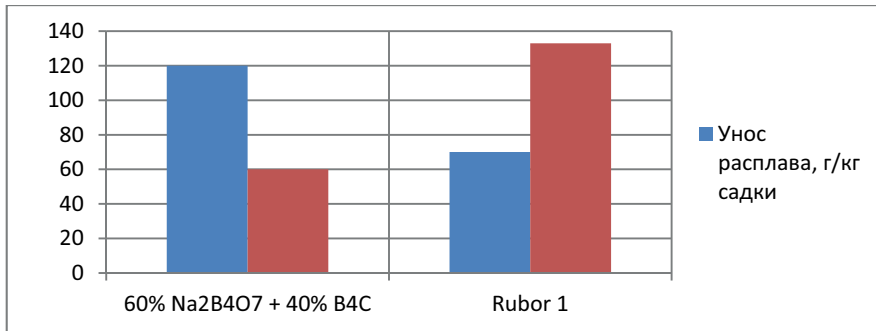
В исходном расплаве на основе буры и карбид бора предположительно проходят следующие реакции [2]:



Далее предположительно происходит ионная реакция между выделившимся атомарным бором и избытком  $\text{B}_4\text{O}_7$  с выделением диффузионно-активного атома бора:



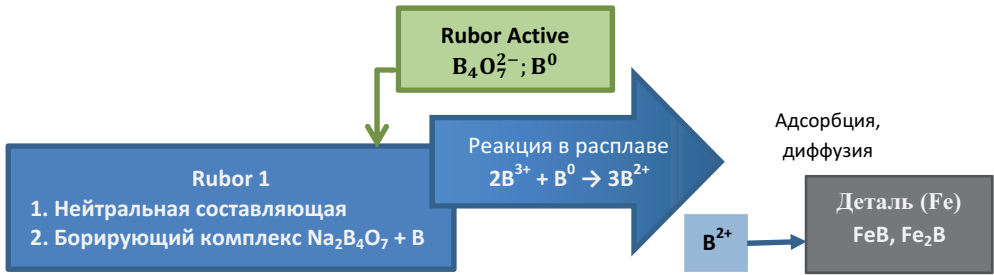
Проведенные эксперименты по оптимизации технологической среды для жидкостного борирования позволили выбрать рациональные составы расплавов на основе боратов и галогенидов щелочных металлов, отвечающие заданным требованиям к жидкотекучести и уносу солей из тигля (рис. 1).



**Рис. 1.** Унос расплава после борирования стальных втулок и растворимость расплава в воде

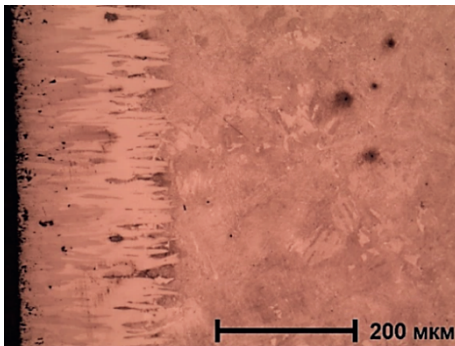
Разработанный состав для борирования Rubor 1 состоит из нейтральной солевой составляющей и борсодержащей составляющей на основе буры. В качестве электрохимического восстановителя выбран аморфный бор марки «А». Разработанный расплав обладает повышенной жидкотекучестью, равномерностью характеристик диффузионных слоев во всем объеме рабочей среды и высокой растворимостью соли в промывочной воде, что облегчает очистку деталей.

Из реакций (1)–(3) следует, что истощение расплава происходит не только по атомарному бору, но и по тетраборату натрия, являющимся поставщиком трехвалентного бора (рис. 2). В связи с этим разработан состав для восстановления химического состава расплава Rubor Active.

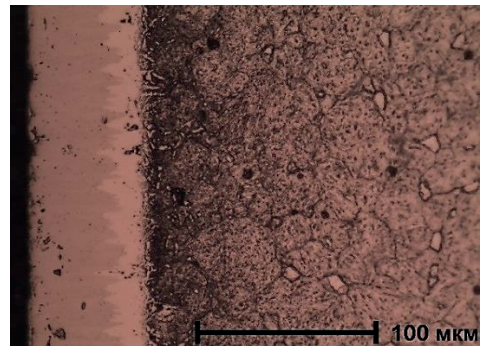


**Рис. 2.** Схема обогащения расплава активными бором и восстановления его химического состава

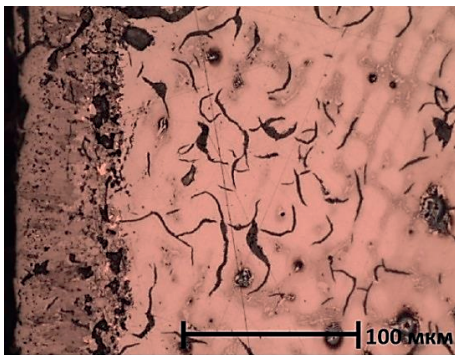
Проведенные исследования насыщающей способности разработанного расплава показали, что в результате борирования стальных и чугуновых образцов при температуре 950 °С в течение 4 ч на их поверхности формируются типичные боридные слои толщиной до 0,2 мм (рис. 3–6) и твердостью до 2200 HV<sub>0,1</sub> (рис. 7).



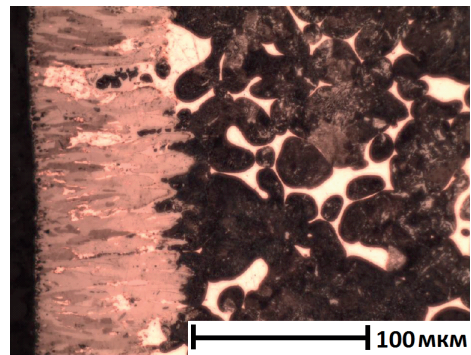
**Рис. 3.** Сталь 40Х, ×200



**Рис. 4.** Сталь 14Х17Н2, ×500



**Рис. 5.** Чугун «Нирезист», ×500



**Рис. 6.** Порошковый медистый чугун ПК90Д25, ×500

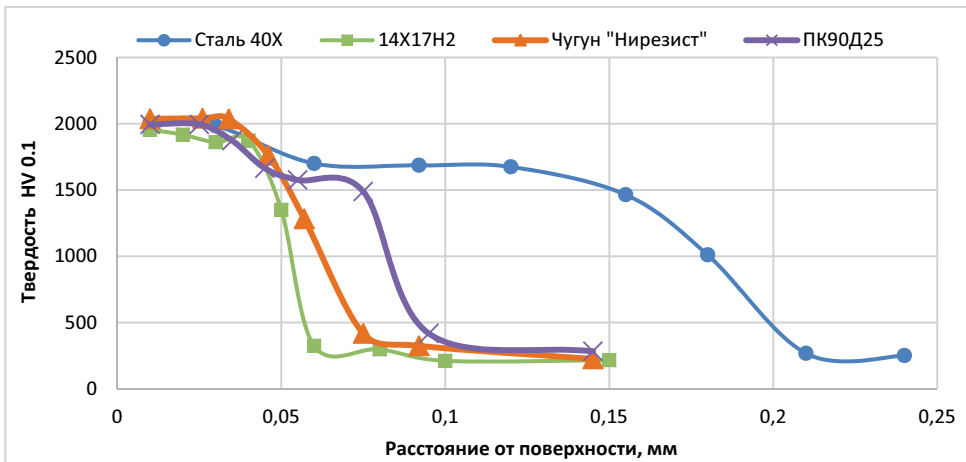


Рис. 7. Микротвердость боридных слоев после борирования в разработанном расплаве

Преимуществом разработанной технологии перед другими способами борирования является возможность последующей термообработки деталей непосредственно после жидкостного борирования (рис. 8).

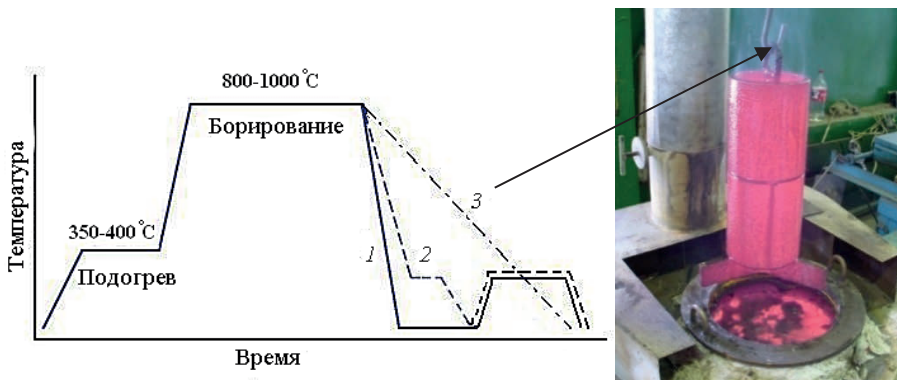


Рис. 8. Технологическая схема жидкостного борирования с последующей термообработкой: 1 — закалка; 2 — закалка с изотермической выдержкой; 3 — охлаждение в воздухе

Широкое использование технологии борирования для упрочнения деталей сдерживается ввиду малого количества информации о свойствах и примерах возможного применения.

Так, весьма актуальным является вопрос значительного увеличения ресурса центробежных насосов для добычи нефти. При существующей в России гарантии производителей насосов в 1 год значительная доля затрат (до 10 000 евро) при их ремонте приходится на подъем и спуск насоса в скважину.

Удвоение ресурса работы таких насосов позволит сэкономить нефтедобывающей отрасли более 1 млрд евро в год.



Сравнительные испытания различных видов диффузионных покрытий со штатной технологией, включающей изотермическую закалку, показывают 4-кратный рост износостойкости при трении «металл по металлу» в присутствии абразива как пары, изготовленной из чугуна, так и из порошкового материала (рис. 9). Коррозионная стойкость борированного слоя в специальных средах, имитирующих пластовую жидкость (водный раствор 5 % NaCl + 3 % HCl) и жидкость для промывки насосов (водный 10 % раствор HCl), повышается в 4 и 10 раз соответственно (рис. 10).

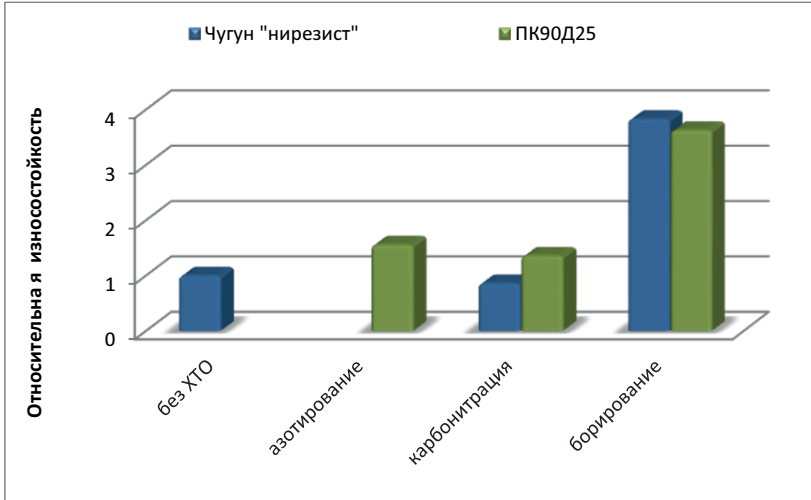


Рис. 9. Износостойкость порошкового материала ПК90Д25 и чугуна «Нирезист»

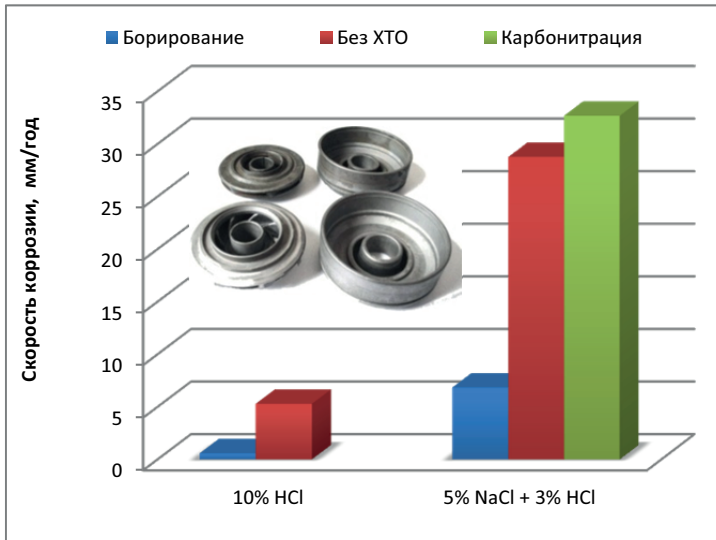
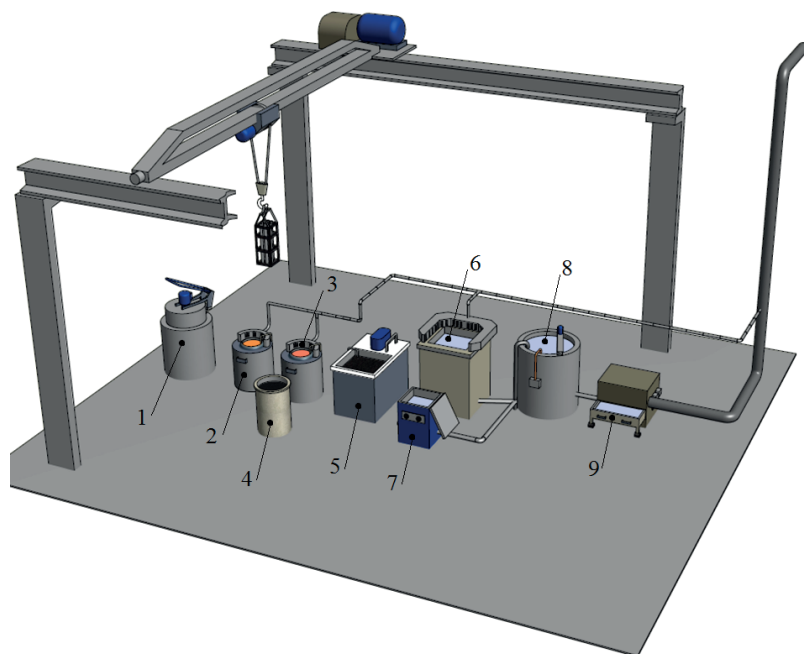


Рис. 10. Коррозионная стойкость чугуна «Нирезист»

Для внедрения разработанной технологии на машиностроительные предприятия нами разработана промышленная линия для жидкостного борирования.

Разработанный комплекс оборудования для борирования в расплавах является экологически чистым, не имеющим жидких отходов (рис. 11). Он может применяться в серийном производстве деталей любой формы, где не требуется защита поверхностей от упрочнения.



**Рис. 11.** Технологическая линия жидкостного борирования:

1 — печь подогрева; 2 — печь-ванна борирования; 3 — печь-ванна подстуживания; 4 — емкость с закалочной жидкостью; 5 — печь-ванна для изотермической выдержки; 6 — ультразвуковая мойка; 7 — бак ополаскивания; 8 — накопитель промстоков; 9 — испаритель промстоков

Результаты выполненного исследования перечислены ниже.

- Разработаны рациональные составы для процесса жидкостного без электролизного борирования и восстановления ее химического состава во время эксплуатации.
- Исследована структура и фазовый состав борированного слоя на сталях различного класса, чугунах и порошковых материалах. Показано, что структура борированного слоя обеспечивает высокую коррозионную стойкость в различных средах и износостойкость в присутствии абразива.
- Разработана технология жидкостного борирования с последующей изотермической закалкой, обеспечивающей получение рациональных двух- и однозонных структур на сталях и чугунах, свойства которых различаются.
- Разработан экологически чистый комплекс оборудования для жидкостного борирования модульного типа, позволяющий за один технологический цикл проводить операции химико-термической обработки поверхности и термической обработки сердцевины.

Литература

- [1] Ворошнин Л.Г. *Борирование промышленных сталей и чугунов*. Минск, 1981, с. 12.
- [2] Чернов Я.Б., Анфиногенов А.И., Шнуров Н.И. *Борирование сталей в ионных расплавах*. Екатеринбург, 2001.
- [3] Anil Kumar Sinha, Bohn Piston Division. *ASM Metals Handbook*. 1991, vol. 4, ASM International, p. 984.

УДК 666.775-798.2

## Получение нитрида алюминия по азидной технологии СВС

© Шоломова Анна Владимировна, Бичуров Георгий Владимирович

Россия, г. Самара, Самарский государственный технический университет

[sholomovaav@gmail.com](mailto:sholomovaav@gmail.com)

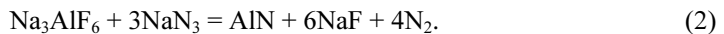
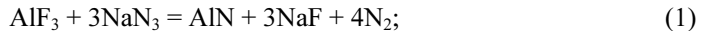
*Наноразмерный порошок нитрида алюминия успешно получен по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из смесей  $AlF_3-3NaN_3$ ,  $Na_3AlF_6-3NaN_3$ . Существующие технологии синтеза  $AlN$  энергоемки, а технология СВС-Аз является энергосберегающей и позволяет получать высокочистые порошки нитрида алюминия с различной морфологией частиц от сферических до нитевидных кристаллов.*

**Ключевые слова:** горение, азид натрия, тепловыделение, энергосбережение, синтез, нанопорошок, нитрид алюминия.

В настоящее время разработано большое количество технологий получения нитрида алюминия, такие как прямое азотирование, плазмохимический синтез, карбо-термический синтез, химическое осаждение из газовой фазы, взрыв алюминиевой проволоки и др. Но все эти способы связаны с большим потреблением электроэнергии, для них требуется дорогое и сложное оборудование.

С 1970 г. в СамГТУ разрабатывается азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-Аз), которая позволяет получать микро- и нанопорошки нитридов и композиций на их основе при использовании порошка азид натрия ( $NaN_3$ ) в качестве азотирующего реагента и галоидных солей [1].

Целью данной работы являлось исследование возможности применения технологии СВС-Аз для получения наноструктурированного порошка нитрида алюминия. Стехиометрические уравнения реакций получения нитрида алюминия в режиме СВС-Аз выглядят следующим образом:



Использование в качестве исходного компонента неметаллического алюминия, а галоидных солей ( $AlF_3$ ,  $Na_3AlF_6$ ), содержащих в своем составе Al, позволяет снизить температуру горения и проводить реакцию на атомарном уровне.

Методика проведения экспериментальных исследований в реакторе СВС постоянного давления описаны в работах [2, 3]. Сжигались цилиндрические образцы (диаметром 30 мм, высотой 45 мм) исходных смесей порошков насыпной плотности при давлении азота в реакторе 4 МПа.

Исследовали химический и фазовый составы продуктов, морфология и размер частиц продуктов горения. Фазовый состав определяли на автоматизированном рентгеновском дифрактометре ARLX'TRA. Изучение топографии поверхности и морфологии частиц порошка проводили на растровом электронном микроскопе JSM-6390A.

Для предварительного анализа температуры горения смесей исходных компонентов и состава продуктов синтеза выполняли термодинамические расчеты с помощью компьютерной программы Thermo. В табл. 1 представлены результаты термодинамических расчетов, показывающие значения адиабатической температуры, теплового эффекта реакции и состава продуктов горения двух составов исходных шихт с применением разных галоидных солей. Из анализа приведенных данных следует, что при использовании фторида алюминия адиабатическая температура и тепловой эффект реакции выше, чем при использовании в качестве исходного компонента гексафторалюмината натрия.

Таблица 1

Результаты термодинамических расчетов параметров горения

Состав шихты	Адиабатическая температура горения, К	Тепловой эффект реакции кДж	Продукты синтеза моль		
			AlN	NaF	N <sub>2</sub>
AlF <sub>3</sub> + 3NaN <sub>3</sub>	1682	-135	1	3	4
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> + 3NaN <sub>3</sub>	1269	-107	1	6	4

Результаты экспериментального определения температуры и скорости горения, а также фазового состава продуктов синтеза из шихт рассматриваемых составов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры горения и состав продуктов синтеза

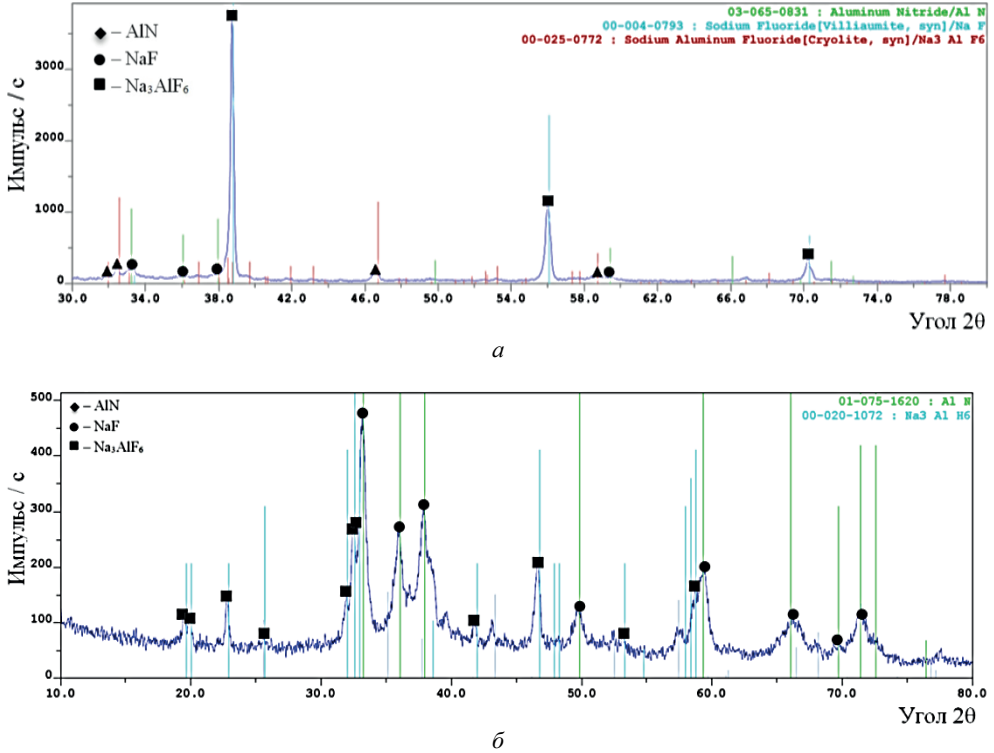
Состав шихты	Температура горения °С	Скорость горения мм/с	Фазовый состав
AlF <sub>3</sub> + 3NaN <sub>3</sub>	1250	11 мм/с	AlN, Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> , NaF
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> + 3NaN <sub>3</sub>	950	6 мм/с	AlN, Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> , NaF

Из данных табл. 2 следует, что при использовании фторида натрия температура и скорость горения выше, чем при использовании гексафторалюмината натрия на 300 °С и 5 мм/с соответственно.

На рис. 1 представлены рентгенограммы непромытых и промытых продуктов синтезированных из смеси AlF<sub>3</sub> + 3NaN<sub>3</sub>.

На представленных рентгенограммах видно, что продукты горения смеси AlF<sub>3</sub> + 3NaN<sub>3</sub> состоят из трех фаз: фторид натрия (NaF), гексафторалюминат натрия (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) и нитрид алюминия (AlN). Исходя из соотношения высот пиков, можно предположить, что NaF > Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> > AlN. Целевой продукт — нитрид алюминия — содержится в небольшом количестве, так что на рентгенограмме непромытых про-

дуктов реакции пики AlN отсутствуют. Благодаря хорошей растворимости в воде фторид натрия полностью удаляется из продуктов горения путем промывки в дистиллированной воде. Гексафторалюминат натрия, напротив, наблюдается в промытых продуктах реакции вследствие плохой растворимости в воде.

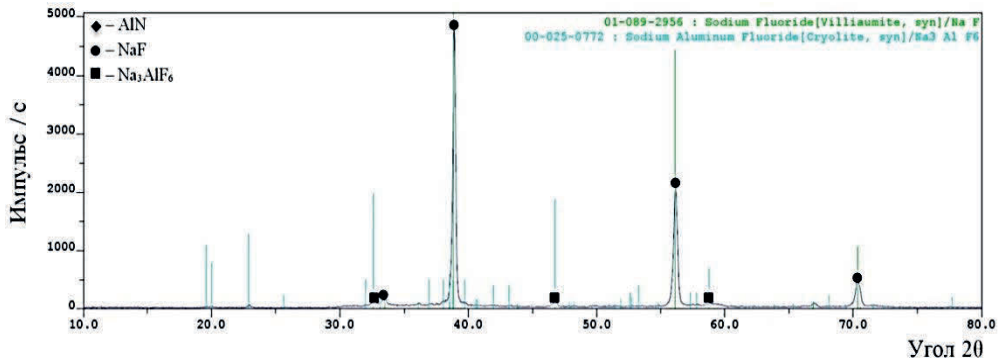


**Рис. 1.** Результаты рентгенофазового анализа продуктов, синтезированных из смеси AlF<sub>3</sub> + NaN<sub>3</sub>: а — до операции промывки; б — после операции промывки

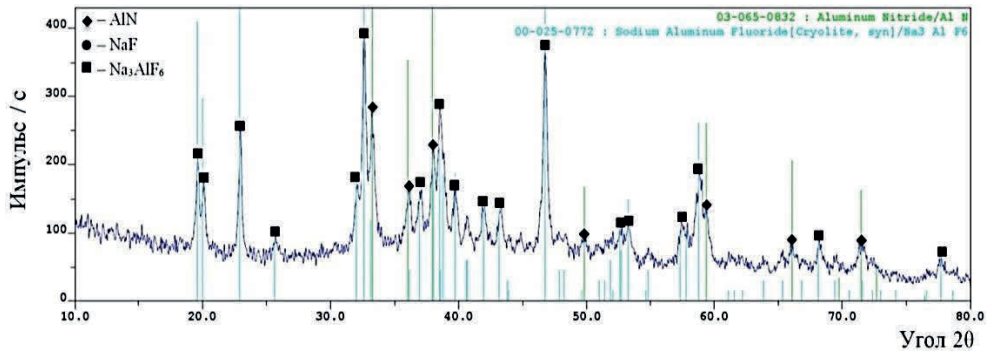
На рис. 2 представлены рентгенограммы непромытых и промытых продуктов синтезированных из смеси Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> + 3NaN<sub>3</sub>.

На представленных рентгенограммах видно, что продукты горения смеси Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> + NaN<sub>3</sub> состоят из трех фаз: фторид натрия (NaF), гексафторалюминат натрия (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) и нитрид алюминия (AlN). Исходя из соотношения высот пиков, можно предположить, что NaF > Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> > AlN. Количественный рентгенофазовый анализ промытых продуктов горения смеси Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> + NaN<sub>3</sub> показал, что содержание нитрида алюминия составляет 61 %, гексафторалюмината натрия — 39 %.

Отмывку гексафторалюмината натрия осуществляли путем разложения его на фториды натрия и алюминия, которые растворимы в воде в результате его нагрева в среде аргона при температуре 400 °С в течение 30 мин. После этого проводили обычную водную промывку. Эта операция позволяет получить порошок нитрида алюминия высокой степени чистоты (рис. 3).



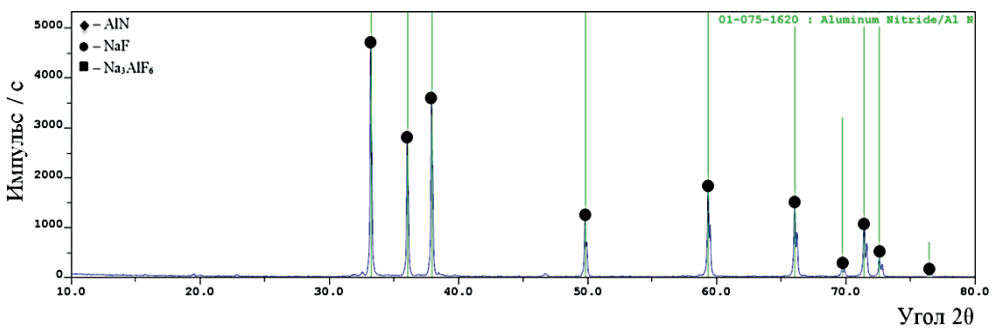
*a*



*б*

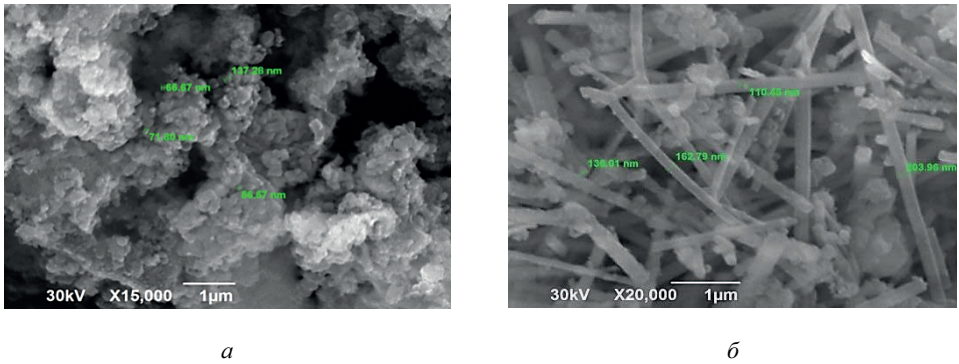
**Рис. 2.** Результаты рентгенофазового анализа продуктов, синтезированных из смеси  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{NaN}_3$ :

*a* — до операции промывки; *б* — после операции промывки



**Рис. 3.** Результаты рентгенофазового анализа продуктов, синтезированных из смеси  $\text{AlF}_3 + 3\text{NaN}_3$  после выдержки в печи

На рис. 3 видно, что после выдержки в печи продукт состоит из одной фазы — нитрида алюминия. На рис. 4 представлены фотографии микроструктуры порошков нитрида алюминия, синтезированных из исследуемых смесей.



**Рис. 4.** Микроструктура синтезированных порошков нитрида алюминия:  
*а* —  $\text{AlF}_3 + 3\text{NaN}_3$ ; *б* —  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{NaN}_3$

На рис. 4 видно, что нитрид алюминия, синтезированный из смеси  $\text{AlF}_3 + 3\text{NaN}_3$  представляет собой нитевидные кристаллы диаметром от 100 до 200 нм и длиной около 5 мкм. Нитрид алюминия, полученный при горении смеси  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{NaN}_3$ , представляет собой частицы сферической формы диаметром от 50 до 140 нм.

Применение энергосберегающей азидной технологии СВС позволило получить из составов смесей  $\text{AlF}_3 + 3\text{NaN}_3$  и  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{NaN}_3$  микро- и наноструктурированные порошки нитрида алюминия высокой степени чистоты.  $\text{AlN}$  синтезируется в виде волокон диаметром 100...200 нм и сферических частиц диаметром 50...140 нм в зависимости от используемой галоидной соли.

### Литература

- [1] Амосов А.П., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. *Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учеб. пособие*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 567 с.
- [2] Амосов А.П., Бичуров Г.В. *Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридов*. Москва, Машиностроение-1, 2007, 526 с.
- [3] Бичуров Г.В. Шиганова Л.А., Титова Ю.В. *Азидная технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза микро- и нанопорошков нитридных композиций*. Москва, Машиностроение, 2012, 519 с.

УДК 658.512.23

## Индивидуальное гусеничное транспортное средство

© Барсукова Екатерина Михайловна, Синельников Михаил Алексеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[e.m.barsukova@mail.com](mailto:e.m.barsukova@mail.com)

*Представлено краткое описание конструкции, дизайнерских и технических решений, используемых автором при создании проекта индивидуального снегоболотохода для российского бездорожья. Особым условием является исключительное использование комплектующих отечественного производства. Предложена блочная сборно-разборная структура транспортного средства. Приведены рисунки, позволяющие оценить внешний вид изделия, размеры и дизайнерские решения. Отдельного внимания заслуживает специально разработанная рулевая колонна и расположенные на ней элементы управления.*

**Ключевые слова:** дизайн, внедорожная техника, индивидуальное транспортное средство, российское производство, вездеход, панель управления.

Российская Федерация занимает первое место в мире по территории, охватывает несколько климатических поясов, а по разнообразию рельефа и неравномерности распределения населения может по праву называться сложнейшей на Планете. Каждый день множество наших соотечественников идут выполнять свою работу по колесу в грязи, расчищают дороги от снега для проезда двух-трех легковых автомобилей в сутки, преодолевают огромные расстояния пешком при патрулировании пересеченной местности. В настоящее время самым распространенным транспортным средством на бездорожье являются полноприводный автомобиль или полноразмерный вездеход. Они хорошо выполняют свои функции, но их габариты не позволяют сойти с колес или просеки, а расход ГСМ и амортизация делают их нерентабельными для частных одиночных поездок на небольшие расстояния. Для таких случаев необходим индивидуальный транспорт. В продаже представлено достаточно много моделей квадроциклов, снегоходов, мотоблоков, внедорожных мотоциклов и мини-снегоболотоходов. Однако лишь последние являются действительно круглогодичны-



ми и по-настоящему вездеходными машинами. В РФ настоящее время подобная техника производится в крайне ограниченном количестве, с использованием импортных комплектующих. Проведенное автором статьи обширное исследование пользователей внедорожной техники и жителей различных районов РФ подтвердило актуальность проблемы.

Объектом разработки является индивидуальное транспортное средство для всех типов сложных грунтов на основе комплектующих исключительно российского производства. Он должен отвечать следующим требованиям:

- **простой и понятный** – из всех решений выбрать наиболее простое, интуитивное и ремонтпригодное;
- **доступный** — без импортных комплектующих; экономичный, стандартный с серийными деталями;
- **эргономичный** — учтены антропометрические данные и особенности поведения целевой группы (активные и физически развитые мужчины 30–70 лет);
- **автономный** — максимально возможные продолжительность работы, надежность, возможность ремонта в полевых условиях и обслуживание в стандартном автосервисе.

В процессе исследования пользователей индивидуального транспорта установлено, что водители в моменты движения по особо сложным участкам маршрута и при ожидании наезда на препятствие встают на полусогнутых ногах, интуитивно защищая позвоночник от ударных нагрузок, увеличивая скорость реакции и помогая своему транспорту перемещением собственного веса. Этот важный факт учтен в основной комплектации транспортного средства — положение стоя.

Результатом нескольких месяцев проектирования, сценарного анализа, эргономических проверок размеров и деталей стал индивидуальный снегоболотоход «Ставр» (рис. 1). Принципиальным отличием этого проекта от конкурентов стала блочная структура транспортного средства (рис. 2): имея гусенично-моторную базу (см. рис. 2), пользователь без специального инструмента и особой физической подготовки может сменить платформу пилота со стоячей на сидячую или грузовую комплектацию.

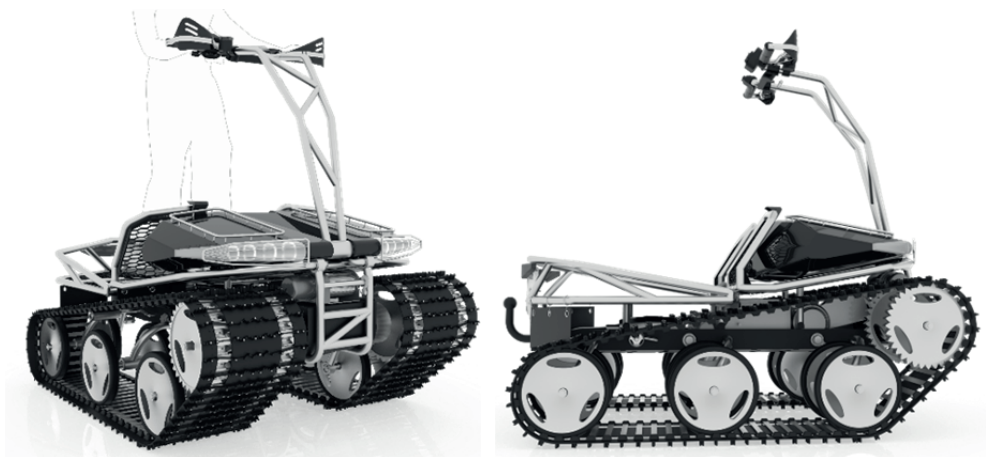


Рис. 1. Индивидуальное гусеничное транспортное средство «Ставр»

Габаритные размеры (рис. 3) позволяют перевозить «Ставр» в стандартном автоприцепе, а лебедка и нейтральный режим хода — с легкостью его туда погрузить, что очень важно, поскольку снегоболотоход не имеет права передвигаться по дорогам общего пользования (согласно классификации самоходных машин Гостехнадзора РФ).

Система подвески на основе шести балансиров и устройство гусеницы разработаны в сотрудничестве с кафедрой «Гусеничная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В основе гусеничного движителя использовано стандартное резиновое полотно шириной 380 мм, что при необходимости позволит использовать сменную гусеницу от большинства российских моделей снегоходов. Несущая рама, выполненная из трубы прямоугольного сечения (материал сталь 10), рассчитана на прочность. Коэффициент запаса составляет 3,333... Площадка пилота выполнена из трубы  $D = 28$  мм просечно-вытяжного листа. Отсек двигателя закрыт квинтетом, чтобы во время движения туда не попадал мусор. Все поверхности без перфорации покрыты нескользящим покрытием. Двухсекционная рама открывается для обеспечения простого доступа к отсеку двигателя.

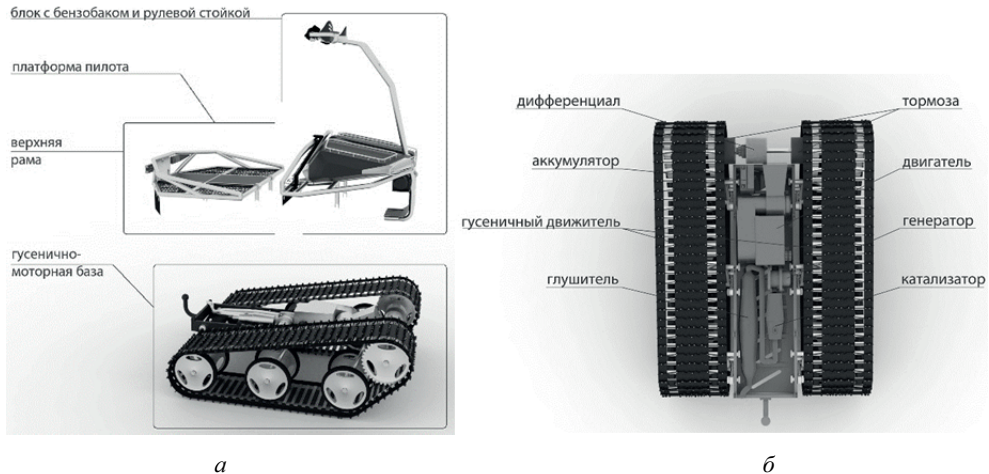


Рис. 2. Блочная структура транспортного средства (а) и комплектация гусенично-моторной базы (б)

#### Технические характеристики снегоблокахода «Ставр»

- двигатель двухтактный 250 см<sup>3</sup>, 22 л.с., 1 цилиндр, карбюратор, ручной стартер;
- охлаждение воздушное принудительное;
- коробка передач вариатор с электронным реверсом, три режима хода;
- глушитель мотоциклетный с перегородками;
- катализатор керамический Евро-4;
- скорость от 5 до 25 км/ч (принудительно ограничивается)
- объем бензобака 25 л, запас хода 8–10 ч;
- объем сухих кофров 2×15 л;
- сухая масса 180 кг;
- максимальный вес перевозимого груза 180 кг + 250 кг в прицепе;
- давление на грунт при полной загрузке 0,110 кг/см<sup>2</sup>.

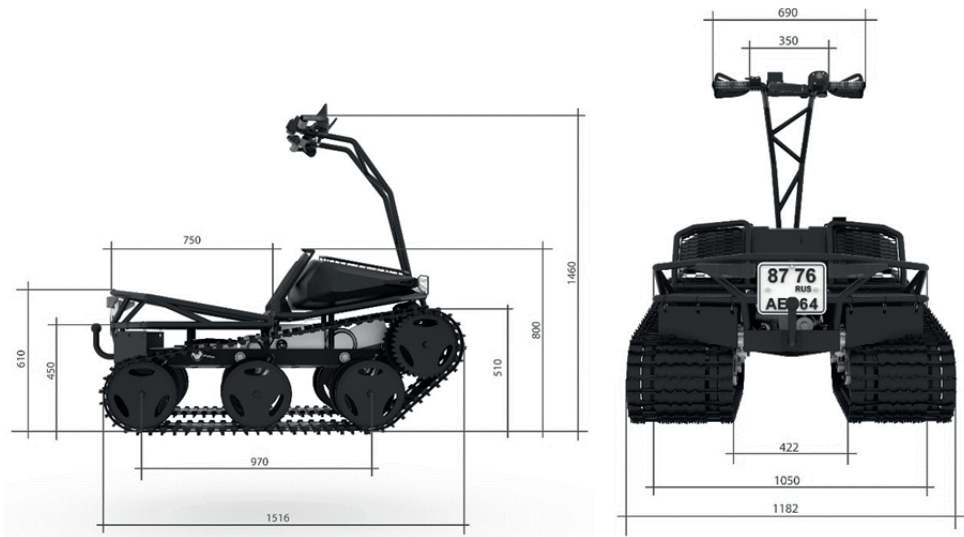


Рис. 3. Габаритные размеры

Рулевая стойка во время движения жестко зафиксирована, ее геометрия меняется при помощи обратной педали в центре платформы. Стойка складывается для удобства перевозки (рис. 4). Сухой кофр разделен на два отсека бензобаком, размещенным в центре для обеспечения равномерной развесовки, комплектация представлена на рис. 5.

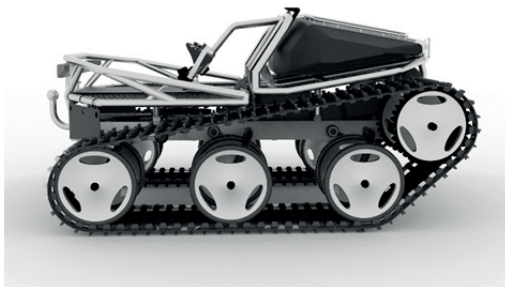


Рис. 4. Сложенная рулевая стойка

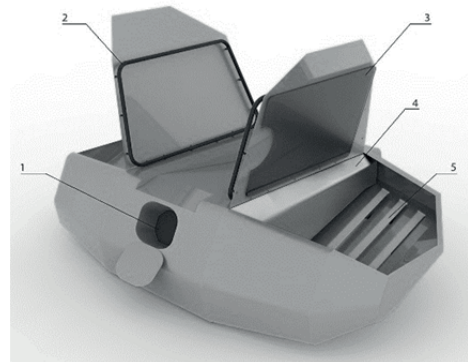
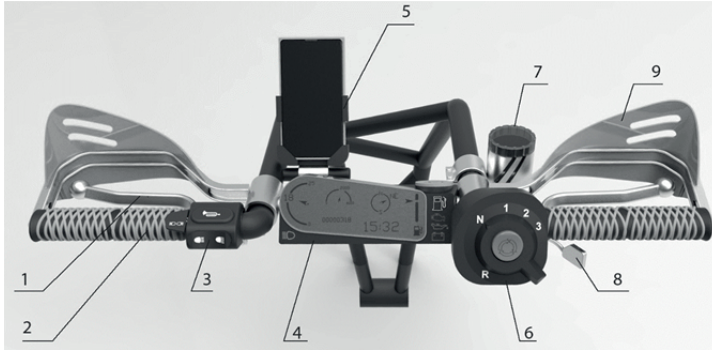


Рис. 5. Комплектация сухого кофра:  
1 — крышка заправочного люка; 2 — рама для крупногабаритного багажа; 3 — карман для бумаг; 4 — бензобак; 5 — резинки для багажа

«Ставр» управляется двумя тормозными рычагами и двумя пультами по типу мотоциклетных: левый для света и звукового сигнала, правый для управления режимами хода и аварийной остановки двигателя (рис. 6). Ручки выполнены из двух типов резины, их рельеф и конструкция позволяют им самоочищаться от грязи, а руки пилота не будут скользить даже в перчатках. ЖК-монитор транслирует аналоговую и

цифровую информацию, предусмотрены: спидометр, тахометр, пробег, компас, время и уровень топлива.



**Рис. 6.** Приборная панель и элементы управления: 1 — рычаг тормоза; 2 — ручка; 3 — левый пульт; 4 — приборная панель; 5 — место крепления кофра для гаджетов; 6 — правый пульт; 7 — расширительный бачок; 8 — газовая гашетка; 9 — защита рук

Все используемые в разработке детали, материалы, крепежные элементы и узлы на данный момент присутствуют на рынке или могут быть изготовлены с использованием мощностей современного автомобильного производства. Это делает проект «живым» — ведь после необходимых конструкторских проверок и расчетов «Ставр» может быть произведен в современных условиях без использования полуфантастических сверхдорогих разработок. Проведенный мною предварительный просчет себестоимости и рыночной стоимости изделия позволяет говорить о стоимости 180...250 тыс. руб. за единицу в базовой комплектации, что делает «Ставр» весьма конкурентоспособным на рынке индивидуальных снегоболотоходов.

Формат статьи не позволяет подробно рассказать о бóльшей части проделанной работы, достигнутых характеристиках, экономических расчетах, эргономических экспериментах, разработке приборной панели и цветовой гамме изделий. Однако надеюсь, что даже этой короткой статьей удалось вызвать интерес к проекту всех тех, для кого он может иметь значение.

### Литература

- [1] ГОСТ Р 52051—2003. *Механические транспортные средства и прицепы. Классификация и определения.*
- [2] ГОСТ Р 20.39.304—98. *Комплексная система общих технических требований «Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам».*
- [3] *Положение о паспорте самоходной машины и других видов техники.*
- [4] *Государственная регистрация самоходных машин.* URL: <http://sgtn.mos.ru/> (дата обращения 08.07.2015).
- [5] *Марочник стали и сплавов.* URL: <http://splav-kharkov.com/main.php> (дата обращения 17.07.2015).
- [6] *ОАО «Русская Механика».* URL: <http://russnegohod.ru> (дата обращения 09.08.2015).
- [7] *Федеральный закон от 10 декабря 1995 г. № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения».*

УДК 378.14

## **Выбор метода оптимизации ресурсов вуза с целью обеспечения физического моделирования при реализации опытно-конструкторских работ и учебного процесса**

© Брекалов Владимир Григорьевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана

*Предлагается выбор метода оптимизации ресурсов вуза, связанный с созданием центра коллективного пользования, в котором сосредоточены основные материальные ресурсы и который располагает квалифицированными кадрами, способными обеспечивать постоянное обслуживание техники.*

**Ключевые слова:** моделирование, учебный процесс, опытно-конструкторские работы, центр коллективного пользования, материально-техническая база.

Современные методы решения конструкторских задач предполагают широкое использование специализированных программных продуктов, позволяющих выполнять проектирование на базе построения виртуальных 3D-моделей разрабатываемых изделий и их компонентов. Программное обеспечение постоянно растет, расширяется и специализируется. Применение такого инструментария стало обычной практикой в работе конструктора и, соответственно, нашло свое отражение в методиках учебного процесса высших технических учебных заведений [1].

Программные продукты, о которых идет речь, широко распространены и достаточно дешевы. Известны примеры успешных разработок сложных технических изделий, выполняемых по принципу «без бумаги». На этом фоне задачи физического моделирования объектов как бы отходят на второй план, утрачивая свою актуальность. Но в то же время очевиден темп роста номенклатуры устройств, позволяющих создавать реальные физические объекты по их компьютерным 3D-моделям. В первую очередь — это так называемые 3D-принтеры. Кроме того, стоит отметить, что зачастую актуальной бывает и обратная задача — задача создания 3D-модели физического существующего объекта.

Рассмотрим некоторые причины, требующие работы именно с физической моделью, применительно к практике технических университетов. Важно подчеркнуть, что успешность таких учебных заведений традиционно определяется сочетанием учебного процесса и практики выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (ОКР).

В процессе выполнения многих ОКР существует необходимость, определенная техническим заданием, или возникающая по ходу исполнения, создания моделей и (или) макетов (МиМ) разрабатываемых объектов. Это способствует ускорению процесса разработки изделия, упрощает согласование решений по ходу выполнения работ, позволяет своевременно парировать ошибки [2]. Весьма существенна роль МиМ как способа текущей проверки правильности конструкторских решений при выпол-

нении работ. Особо следует отметить важность создания макетов при разработке дизайна внешнего вида изделия и решении задач эргономики.

Применительно к учебному процессу роль физического моделирования даже более существенна, так как у студентов изначально нет опыта конструкторской работы, позволяющего оценивать качество разработки, опираясь только на конструкторскую документацию, включая и компьютерные 3D-модели. Собственно, одна из главных задач учебного процесса и состоит в привитии этих навыков. И особое значение здесь приобретает возможность создания физических моделей, позволяющих оценить качество и свойства разработки, выполненной студентом.

Перечисленное выше требует не только соответствующего материально-технического обеспечения, но и постоянного поддержания технических средств в работоспособном состоянии. При очевидности этого тезиса, рациональное практическое решение такой задачи оказывается весьма трудным по совокупности причин. Выбор метода оптимизации ресурсов невозможен без анализа этих причин, причем одной из главных задач является ответ на вопрос, насколько эти причины могут быть формализованы [3].

Результаты оценки возможной степени формализации обстоятельств и ограничений, влияющих на ситуацию, оказывают решающее влияние на выбор метода оптимизации [4]. Очевидно, что каждый университет имеет свою специфику в плане инфраструктуры, истории формирования соответствующей материальной базы и т. д. По этой причине в рамках данной работы рассматриваются наиболее типичные ситуации, для которых требуется выбрать метод оптимизации ресурсов. Специфические особенности конкретных учебных заведений могут быть проанализированы по аналогичному алгоритму.

Первая задача состоит в определении достаточного по номенклатуре и количеству парка технических средств. Номенклатура выпускаемого в настоящее время оборудования известна. Это объемные сканеры, 3D-принтеры различного типа и уровня, станочный парк для изготовления компонентов макетов, покрасочные камеры, монтажные столы, установки для термопластического деформирования пластика, многокоординатные фрезерные станки, установки для раскроя материалов и т. д. Но сколько и какого оборудования необходимо иметь — является крайне сложным вопросом.

Необходимо проводить анализ, рассматривая на первом этапе потребность вуза в интересах учебного процесса и научной деятельности. При этом очевидно, что в итоге рациональная структура должна обеспечивать единство учебной, научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности как в общем, так и в части использования оговоренных выше технических ресурсов.

На практике формирование ресурсов, о которых идет речь, чаще всего происходит последовательно и порой достаточно стихийно, исходя из необходимости решения конкретных задач, возникающих при проведении конкретной ОКР в рамках ее бюджета. Также можно отметить и относительно применения такой техники в интересах учебного процесса. В результате происходит накопление технических средств, приобретаемых без оценки их пригодности для решения других задач, и зачастую такая техника после выполнения конкретной работы остается без обеспечения расходными материалами и обслуживания квалифицированным персоналом. Более того, в крупных организациях со сложной структурой возникают сложности с доступностью к полноценной информации о наличии конкретных образцов техники и степени готовности такой техники к использованию в оперативные сроки.

Общий опыт решения задачи формирования материальной базы говорит о целесообразности создания структуры типа центра коллективного пользования, в

котором сосредоточены основные материальные ресурсы и который располагает квалифицированными кадрами, способными обеспечивать постоянное обслуживание техники.

#### Литература

- [1] Брекалов В.Г., Терехова Н.Ю., Сафин Д.Ю. Применение технологии трехмерного прототипирования в образовательном процессе. *Дизайн и технологии*, 2012, № 29 (71), с. 118–123.
- [2] Терехова Н.Ю. Сложный образовательный продукт как интегральная образовательная система. *Интеграция образования*, 2014, т. 18, № 3 (76), с. 6–11.
- [3] Брекалов В.Г., Терехова Н.Ю., Кленин А.И. Решение задач прогнозирования и стратегического планирования деятельности высших учебных заведений. *European Social Science Journal*, 2014, № 4–2 (43), с. 31–34.
- [4] Цибизова Т.Ю., Неусыпин К.А. Некоторые аспекты реструктуризации системы управления современными учебно-научными центрами. *Автоматизация. Современные технологии*, 2012, № 1, с. 30–34.

УДК 658.512.23

## Многофункциональный сегмент жилой зоны орбитальной станции

© Закревская Татьяна Игоревна, Михеева Марина Максимовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[zakrevskajatanja@mail.ru](mailto:zakrevskajatanja@mail.ru)

*Данный проект посвящен разработке многофункционального сегмента жилой зоны орбитальной станции. В работе было проведено исследование жилой среды Международной космической станции (МКС), особое внимание уделялось зоне приема пищи, а в качестве объекта проектирования был выбран обеденный стол и его окружение. Во время дизайн-исследования был выявлен ряд проблем данного пространства и сделаны выводы, ставшие основой при проектировании. Стол разрабатывался таким образом, чтобы он вписывался не только в пространство МКС, но и мог бы использоваться на перспективных станциях.*

**Ключевые слова:** МКС, космонавт, жилая зона, стол, модульность, индивидуальный контейнер, фиксация предметов.

На рис. 1 показан интерьер, в котором российские космонавты проводят до 90 % времени в космическом полете, здесь и находится стол, ставший объектом исследования. По тому, как выглядит пространство модуля, ясно, что предназначение станции — это проведение научно-исследовательских работ. Но все-таки МКС — это не только пространство для опытов, но и в первую очередь место, где на протяжении долгого времени должны жить космонавты. И никто лучше их самих не знает, насколько

ко важным в длительном полете становится продуманность эргономики, дизайн пространства и оборудования. Объем жилого пространства крайне невелик, но в нем совмещены зоны различного назначения: это и столовая, и кухня, и место, где спят космонавты, где они занимаются спортом, и, конечно, место, где они работают, — все эти зоны пересекаются. Нежилое пространство служебного модуля отгорожено от жилого панелями интерьера, а с другой стороны ограничено обшивкой космической станции, в нем проходят основные коммуникации, хранятся грузы, оборудование и многое другое.



Рис. 1. Жилая зона служебного модуля «Звезда» российского сегмента МКС

Первое, с чем сталкиваются космонавты на околоземной орбите, — это невесомость. И она накладывает свой отпечаток на быт экипажей космической станции. Космонавтам приходится приспосабливаться к этому состоянию и учиться выполнять даже простейшие бытовые операции. Из-за невесомости интерьер станции имеет свои особенности. Стены, пол и потолок оборудованы специальными поручнями, благодаря которым космонавты имеют возможность зафиксироваться и оставаться на месте. А все предметы на станции снабжаются специальными креплениями, для того чтобы не дать им улететь и потеряться. Этот факт очень важен при разработке элементов интерьера. Для фиксации предметов используются липучки, эластичные тросы, клейкая двухсторонняя лента, зажимы.

На рис. 2 показано, как выглядит пространство около стола во время приема пищи, одновременное размещение за столом пяти человек крайне проблематично, а места на столе недостаточно. Данное пространство выполняет важнейшую социальную функцию, здесь космонавты не только обедают, но и общаются, отдыхают, проводят видеоконференции. И это своего рода напоминание о домашней обстановке на Земле, которой так не хватает космонавтам во время полетов.





Рис. 2. Обед на МКС

Стол на станции не простой, на нем расположено все, что необходимо космонавтам для приготовления пищи. В подогревателе пищи разогреваются консервные банки и хлеб. Из соображений безопасности в невесомости необходимо устройство, работающее по аналогии с земным пылесосом, оно собирает случайно разлетевшиеся частички пищи. На стене над столом находится блок раздачи воды для приготовления сублимированной пищи и напитков. Продукты крепятся на свободную поверхность стола с помощью липкой ленты, зажимов или липучек.

Таким образом, были выявлены следующие проблемы данного пространства. Стол занимает много места и мешает, когда не используется, но, с другой стороны, во время приема пищи за столом не хватает места на всех. Проблемой является и то, что современные космонавты пользуются столом, разработанным 30 лет назад, его внешний вид устарел, а функционал уже не отвечает современным требованиям. На столе установлены устаревшие электроприборы, часть из которых вышла из строя или не используется, но их демонтаж затруднителен.

В результате проделанной работы форма стола изменилась (рис. 3). Тонкая столешница придает столу легкость, а поручень, расположенный ниже уровня стола, создает визуальную целостность композиции, объединяя выступающие вниз контейнеры. Для создания удобной для космонавтов жилой зоны было решено использовать возможности запанельного пространства, чтобы стол можно было убирать на то время, пока он не используется. Стол полностью убирается в стену за счет поворотного механизма. Во время использования стол может регулироваться по длине, в зависимости от количества космонавтов, размещающихся за ним. Ширина столешницы составляет 500 мм, ширина стола вместе с поручнями — 670 мм. Когда стол используется, он может находиться в двух положениях, при этом его длина составляет 1000 и

1400 мм соответственно. Высота стола — 1 м, так как космонавты не сидят за столом, их положение близко к стоящему.



Рис. 3. Стол во время приема пищи

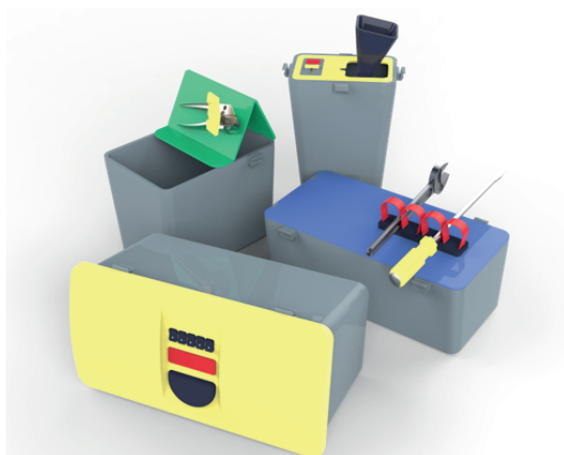


Рис. 4. Универсальные модули

Занимаясь проектированием для космоса и находясь на Земле, невозможно предугадать то, как на самом деле будет использоваться тот или иной предмет в невесомости. Недостатком нынешнего стола является то, что конструкция диктует алгоритм пользования. Целью данного проекта было создание стола более гибкого в использовании с помощью принципа модульного построения конструкции. Стол имеет вырезы стандартного размера, в которые устанавливаются различные модули, каждый из них содержит специальное крепление-защелку (рис. 4). Во время еды необходимы электроприборы, они оснащены специальными контактными разъемами. В контейнерах хранится все необходимое во время приема пищи: полотенца, салфет-

ки, ножницы, консервные ножи. В контейнеры поместится все то, что сейчас постоянно находится на поверхности стола. При этом на крышки контейнеров тоже может что-то прикрепляться, они открываются таким образом, чтобы все оставалось на виду. Во время работы за столом бытовые контейнеры заменяют рабочими. В них хранятся инструмент, запасные части приборов и многое другое. С таким подходом космонавты смогут создавать необходимую им обстановку на столе, менять расположение контейнеров и приборов, трансформировать стол из обеденного в рабочий просто меняя универсальные модули.

Для того чтобы сделать прием пищи более комфортным для космонавтов, были разработаны индивидуальные контейнеры. Каждый контейнер является небольшим персональным местом приема пищи. У контейнеров есть крепления, с помощью которых они фиксируются на столе. Таким образом стол расширяется (рис. 5).

Исследование показало, что каждому космонавту необходим термос, для того чтобы сохранять теплыми сублимированные продукты, пока они готовятся. Так, например, чтобы борщ был готов к употреблению, его необходимо залить горячей водой и оставить на 15 минут, за это время он успеет остыть. В итоге каждый индивидуальный контейнер состоит из отсека-термоса и подноса с элементами фиксации для всего, что необходимо космонавтам во время обеда. Здесь есть мембраны для фиксации консервных банок разного диаметра, ложемент для ложки и резинки-прижимы (рис. 6).

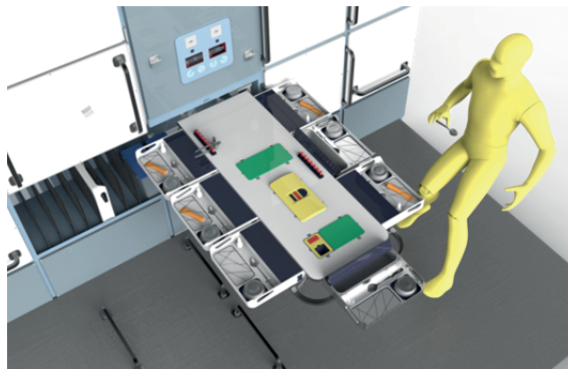


Рис. 5. Стол с установленными на нем индивидуальными контейнерами

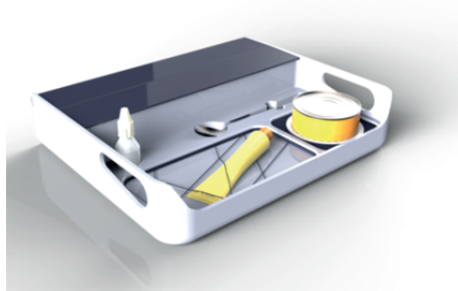


Рис. 6. Индивидуальные контейнеры для приема пищи

В результате проделанной работы было изменено пространство обеденной зоны. При этом функционал не пострадал, а возможности расширились. Стол можно убирать, когда он не используется, быстро трансформировать из обеденного в рабочий. Во время обеда при необходимости увеличивать поверхность стола для размещения большего количества человек. Устаревшие электроприборы могут быстро заменяться благодаря модульной конструкции. А индивидуальные контейнеры могут сделать приемы пищи для космонавтов более комфортными.

### Литература

- [1] *Большой скачок. Космическая еда. Обед в невесомости.* URL: [https://www.youtube.com/watch?v=aA\\_hu50TnbM](https://www.youtube.com/watch?v=aA_hu50TnbM).
- [2] ГОСТ 12.2.032—78. ССБТ. *Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.*
- [3] ГОСТ Р 50804—95. *Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования.*
- [4] *Послеполетные экспресс-отчеты экипажей МКС-9, МКС-13, МКС-19, МКС-22М МКС-37/38.*
- [5] *Space Food and Nutrition. An Educator's Guide With Activities in Science and Mathematics.*

УДК 658.512.23

## Спортивно-игровая пространственная система «Рета»

© Козырева Мария Алексеевна, Синельников Михаил Алексеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[Mary\\_new@mail.ru](mailto:Mary_new@mail.ru)

*Рассмотрены хорошо зарекомендовавшие и проверенные временем методики, способствующие активному движению и физическому развитию детей. Разработана универсальная и многофункциональная спортивно-игровая пространственная система с применением веревочных сетей, адаптированных для использования преимущественно в квартирах, детских садах и других соответствующих помещениях.*

**Ключевые слова:** спорт, спортивный комплекс, домашний спорткомплекс, активный образ жизни, физическое развитие детей, спортивно-игровая система, многофункциональная и универсальная система.

Целью проекта было создание спортивно-игровой пространственной системы для детей. В техническом задании главными факторами при разработке являлись многофункциональность и универсальность системы.

Исходя из поставленной задачи было проведено дизайн-исследование в разных областях: от спортивных комплексов и лабиринтов для лазания до различных арт-объектов со сложной формообразующей структурой.

ДИЗАЙН-ИССЛЕДОВАНИЕ



Рис. 1. Исследование

ПОИСК

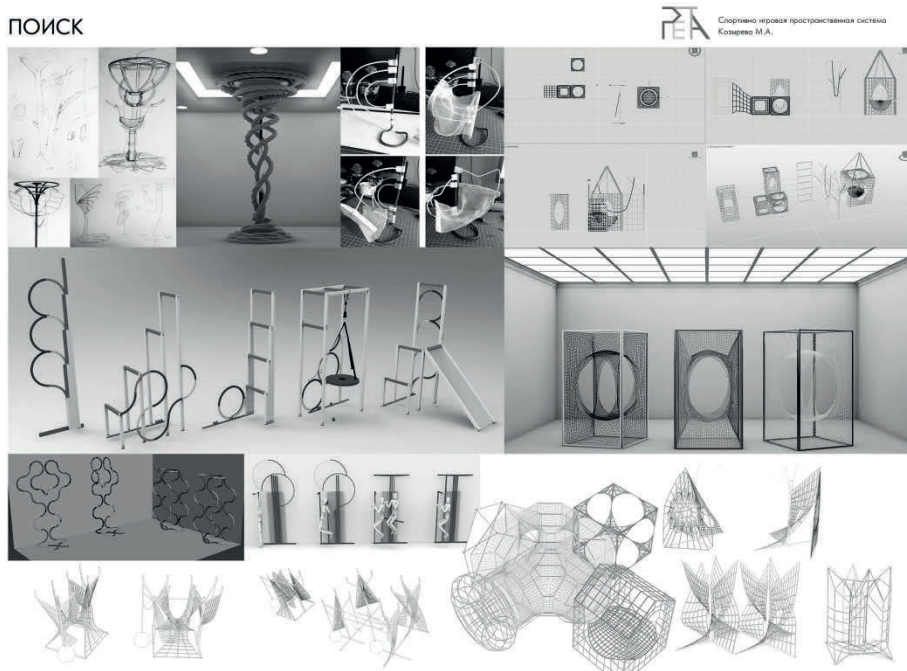


Рис. 2. Поиск формы

В результате дизайн-исследования целевая группа увеличилась до всех членов семьи, а к функциональности системы добавились еще некоторые важные пункты, такие как мотивация (онлайн-приложение), фитнес для взрослых с добавлением экспандеров и возможность позиционировать систему как место для отдыха и хранения.

Созданная пространственная система является арт-объектом с большой вариативностью использования и простой конструкцией.

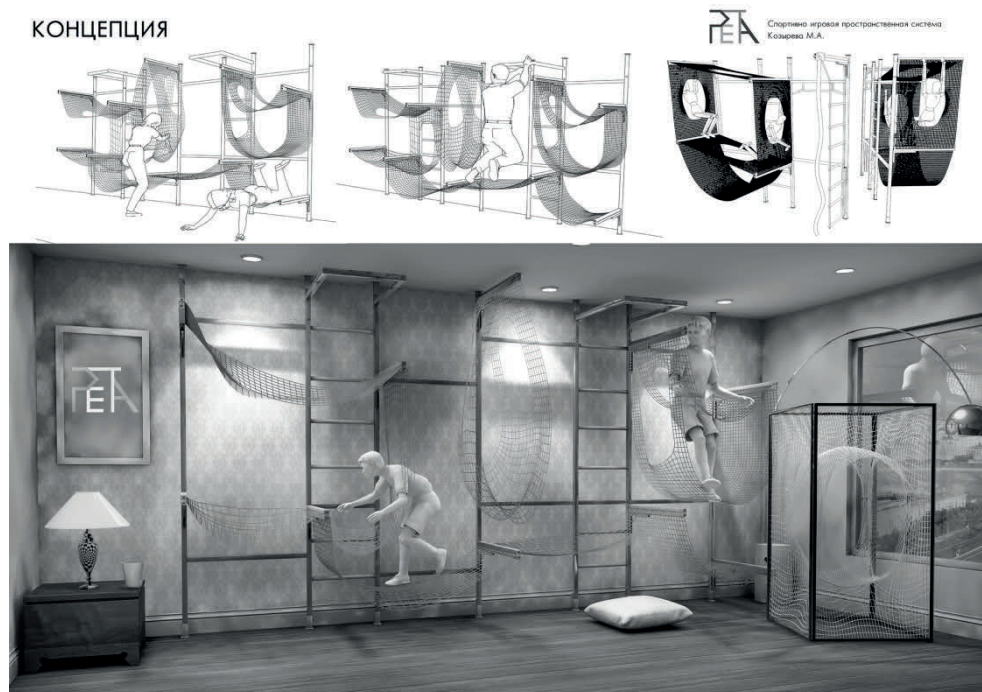


Рис. 3. Спортивно-игровая пространственная система (СИПС), вариант для игровой комнаты

Конструкция отвечает всем требованиям поставленной задачи, она проста в использовании и уходе, легко интегрируется в любые пространства. В конструкции использовались уже существующие комплектующие, а именно: распорные стойки с двумя видами креплений — к стене и в распор между потолком и полом, кронштейны, зафиксированные к стойкам, с двумя профильными брусками, где нижний брусок прикреплен к кронштейну, а верхний зажимает нейлоновую сеть, между собой брусочки скрепляются замком-зажимом. Схема пользования включает в себя только фиксацию сети на разных уровнях.

Стандартная комплектация для типовых квартир состоит из двух стоек, скрепленных между собой, и трех консолей для фиксации сети. Также в конструкции предусмотрен вариант с дополнительным турником и лестницей и варианты для использования стандартных снарядов, таких как гимнастические кольца, веревочная лестница, веревочный канат. Система позволяет наращивать стойки, увеличивая таким образом точки для фиксации сети. Возможность наращивания дает множество вариантов для создания различных форм из сети. Система, состоящая из двух стандартных комплектаций с дополнительным турником и лестницей, позволит осуще-

свить все любимые детские движения, такие как прыжки, висы, вращение, качание, катание, балансирование, лазание. Конструкция, дополненная сетью, которая одновременно служит страховкой и трехмерным пространством для лазания, позволит всем элементам работать как единая игровая система. Такой вариант подойдет для использования системы дома, на даче, в игровой комнате. Умножая конструкцию, мы увеличиваем игровое пространство, и тем самым расширяем применение до детских садов, школ и арт-площадок.



Рис. 4. Фиксация сети

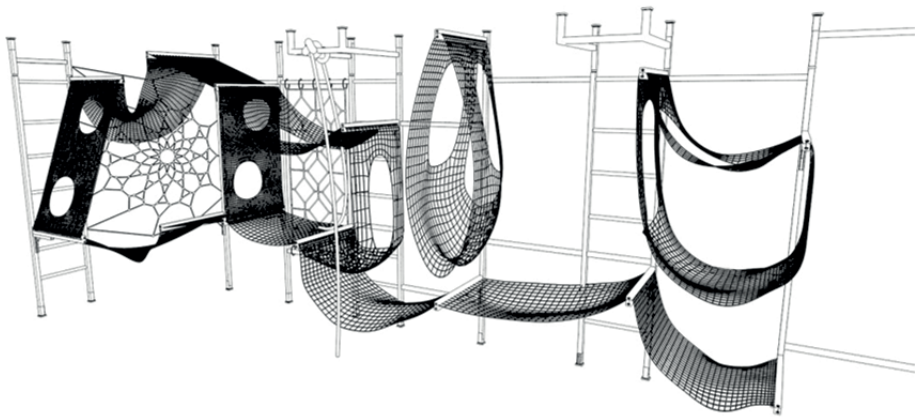


Рис. 5. Вариант для игровых комнат

Конструкция предусматривает добавления в комплекс эспандеров для тренировки всех групп мышц. Эспандеры из латексных трубок крепятся на карабин к стойке в любом удобном месте, они универсальны и подходят для использования всеми членами семьи.

Разное расположение точек фиксации сети — не только на стойках, но и к стене — позволит использовать натянутую сеть как гамак для отдыха или как место для хранения. Форма гамака или капли из сети подойдет и для других целей, например, для занятий восстановительной аэробикой, основанной на растяжках, нормализующих функцию позвоночника.



Рис. 6. Использование в конструкции эспандеров

Нейлоновая сеть дает огромный выбор цветовых решений, так как волокна нейлона легко поддаются окрашиванию, таким образом систему можно подобрать под любой интерьер.

Для моделирования форм различной конфигурации предлагается онлайн-приложение. Оно может иметь игровую функцию и мотивировать к творчеству, развивать пространственное воображение. Созданные в игре формы затем могут быть реализованы, в результате чего игра совместится с элементами конструирования и практическими навыками.

Внедрение разработанного проекта не потребует значительных затрат, поскольку конструкция состоит из ограниченного набора стандартных готовых элементов и материалов.

Пользователь получает возможность простой сборки комплекса своими силами в домашних условиях, возможность творческого участия в создании практически неограниченных вариантов пространственных конфигураций. Спортивный комплекс может использоваться всеми членами семьи, легко перестраиваясь под разные потребности. В случаях, когда система по какой-либо причине окажется ненужной для занятий спортом, она может послужить для других полезных целей или быть легко преобразованной в арт-объект.

## Литература

- [1] ГОСТ Р 52169—2003. *Оборудование детских игровых площадок. Безопасность конструкции и методы испытаний. Общие требования.*
- [2] ГОСТ EN 1176—1:2008. *Оборудование игровой площадки. Общие требования безопасности и способы испытаний.*



- [3] Доклад о здоровье населения за 2009 год. URL: <http://www.mosgorzdrav.ru>.
- [4] Ермакова С.В., Подставкаина Т.П., Строкина А.Н. *Антропометрический атлас*. Москва, 1977, 138 с.
- [5] Уильямс Л. *Переворот. Проверенная методика захвата рынка*. Москва, Манн, Иванов и Фербер, 2012, 208 с.
- [6] Папанек В. *Дизайн для реального мира*. Москва, Д. Аронов, 2012.
- [7] Скрипалев В.С. *Наш семейный стадион*, Москва, Физкультура и спорт; 1986.
- [8] *Эспандеры и упражнения для всех групп мышц*. URL: <http://www.smartelastic.ru>.
- [9] Якиманская И.С. *Развитие пространственного мышления школьников*. Москва, Педагогика, 1980, 240 с.

УДК 658.512.23

## Дизайн-проект тренажера для реабилитации пациентов с ограниченной подвижностью рук

© Кулагина Галина Валерьевна, Синельников Алексей Степанович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[g.v.kulagina@gmail.com](mailto:g.v.kulagina@gmail.com)

*В статье рассматривается создание тренажера для реабилитации пациентов с ограниченной подвижностью рук. За основу взят экспериментальный авторский прототип, разработанный компанией ООО «Медэксперт». Были проанализированы его недостатки и предложена новая усовершенствованная конструкция, которая учитывает удобства пользования и повышения эффективности реабилитации пациентов с параличами и контрактурами плечевого пояса и верхних конечностей.*

**Ключевые слова:** *тренажер, реабилитация, верхние конечности, тетраплегия, уникальная конструкция.*

Создание тренажера для реабилитации является наиболее актуальным для пациентов, которые полностью парализованы (например при травме шейного отдела позвоночника — тетрапегии). Также в целевую группу входят пациенты с инсультами и травмами верхних конечностей и дети с ДЦП.

Задачи проекта проанализировать недостатки уникального экспериментального авторского устройства, разработанного в компании ООО «Медэксперт», и усовершенствовать конструкцию с учетом сделанных выводов.

Цель проекта — создание целостной дизайнерской конструкции тренажера с учетом удобства использования и повышения эффективности реабилитации пациентов с параличами и контрактурами плечевого пояса и верхних конечностей.

В.А. Качесовым была разработана концепция тренажера для реабилитации пациентов с ограниченной подвижностью рук. На основе этой конструкции был спроектирован экспериментальный прототип, который представлен на рис. 1.

Данный уникальный экспериментальный прототип был сконструирован без участия промышленного дизайнера, поэтому он эстетически не совершенен, имеет ряд неудобств в использовании и не предназначен для серийного производства.

После проведенного исследования и концептуального поиска формы было предложено следующее решение (рис. 2).



**Рис. 1.** Экспериментальный прототип



**Рис. 2.** Общий вид разработанной конструкции

**Используемые материалы:**

- хомут с эксцентриком и диаметром 30 мм;
  - дюралюминиевые трубы диаметром 25 мм и 50 мм, с толщиной стенки 1,5 мм;
  - нержавеющая труба диаметром 21 мм, с толщиной стенки 1 мм;
  - пружина растяжения металлическая с замкнутыми зацепами;
  - винты М12, длина стержней с полной резьбой 30 мм и 80 мм, с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником под ключ 8 мм;
  - саморез по дереву, потайная головка, крестообразный шлиц, полная резьба, 4×35 мм;
  - кольцо-карабин;
  - мебельный пенополиуретан;
  - мебельная искусственная кожа;
  - мебельная фанера сорт 1/Ш2 толщиной 12 мм.
- При необходимости для удешевления конструкции нержавеющую сталь можно заменить на любую конструкционную сталь с подходящими свойствами по выбору технолога.

**Транспортировка.** Так как улучшенная нами конструкция реабилитационного тренажера полностью разборная, она может быть компактно сложена и ее будет легко транспортировать (рис. 3).

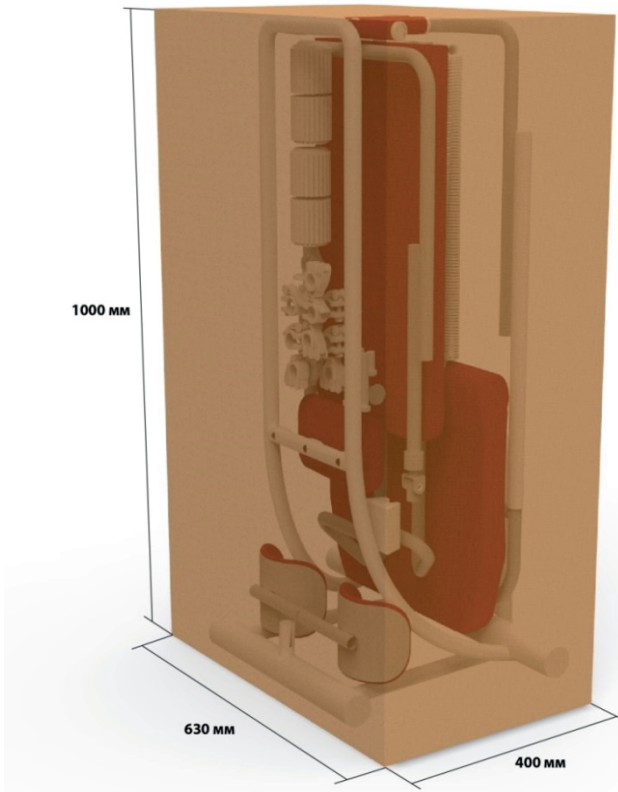


Рис. 3. Вариант упаковки конструкции

**Разработка названия и логотипа.** Было предложено название тренажера — «Мономах». Его можно расшифровать двумя способами:

Моно (от древнегреч. Μόνος — один) и мах от русского слова «махать».

Мономах (от греч. Μονομάχος — единоборец).

Обе расшифровки предложенного названия полностью соответствуют активной жизненной позиции пациентов, которые, несмотря на огромные трудности, с помощью представленного реабилитационного тренажера стараются вернуться к полноценной жизни.

Было создано два варианта написания логотипа в английской и русской транскрипциях и предложено расположение его на тренажере (рис. 4, 5).



Рис. 4. Логотип «Мономах» в английской и русской транскрипции



Рис. 5. Расположение логотипа на тренажере

На основе проведенного анализа аналогов, критического анализа особенностей уникального экспериментального прототипа, а также эргономического анализа и проработки антропометрии была создана конструкция реабилитационного тренажера с необходимыми антропометрическими и эргономическими параметрами, полностью соответствующая целям и задачам проекта.

Были найдены простые, эргономичные и эстетичные решения выявленных проблем, заключенные в целостную форму, конструктивно отвечающую своему назначению, а также было достигнуто стилевое единство изначально разнохарактерных элементов прототипа, создан улучшенный вариант конструкции реабилитационного тренажера, который полностью сохранил его уникальные реабилитационные характеристики, при этом использованы доступные материалы и технологии производства.

*Проект на тему «Тренажер для реабилитации пациентов с ограниченной подвижностью рук» выполнен по заказу ООО «Медэксперт», при консультации генерального директора Качесова В.А.*

### Литература

- [1] *Антропометрический атлас*. Москва, ВНИИТЭ, 1977, 132 с.
- [2] Качесов В.А. *Интенсивная реабилитация пострадавших с сочетанной травмой*. Москва, ИД «Регламент», 2007, 111 с.
- [3] Михеева М.М. *Дизайн-исследования*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 83 с.
- [4] ТУ 9610-001-66987290—2015. *Тренажер для адаптивной физической культуры*. Дата регистрации ТУ 15 мая 2015.

УДК 53.084.823

## Зачем нужен дизайн в техническом вузе

© Михеева Марина Максимовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[mmm4-64@mail.ru](mailto:mmm4-64@mail.ru)

*Рассмотрена проблема конкурентоспособности российской промышленной продукции и роль дизайнера в ее повышении; значение и смысл введения специальности «промышленный дизайн» в техническом университете; связь дизайнера со стартапами и работой в междисциплинарных командах; актуализируются подходы к преподаванию творческих дисциплин для компетенций будущего: целостность профессиональных знаний, свобода мышления, опыт совместной работы вместо диктатуры знаний, право на ошибку и итерационная практика.*

**Ключевые слова:** *дизайн, импортозамещение, конкурентоспособность, понимание потребителей, креативная экономика, визуальное мышление.*

Известно, что на мировом рынке конкуренция с 80-х годов прошедшего столетия в значительной мере переместилась в область дизайна. Для российского производителя этот фактор до сих пор не стал актуальным. Здесь принято считать дизайнеров украшателями жизни, второстепенной специальностью. В зарубежных списках дизайн входит в первую пятерку профессий «креативной экономики», т. е. рассматривается как одна из ключевых профессий будущего. Сегодня методы дизайнерского проектирования, способные изменить любой продукт или процесс, а также отношения между производителем, продавцом и пользователем рассматриваются прогрессивным бизнесом как средство выхода из создавшегося тупика «массового потребления».

Почему я делюсь с инженерным сообществом подходами к преподаванию творческих дисциплин? Реалии времени требуют подвижек и в техническом образовании, и это уже общеизвестный факт. Я отмечу здесь наиболее актуальные на мой взгляд:

Инновации (прорывные) и стартапы напрямую связаны с развитием креативности. Дизайн по своей природе инновационная деятельность, и креативные технологии здесь хорошо отработаны [1].

Мышление человека меняется с вербального на визуальное. Логическое мышление не в состоянии перерабатывать современные информационные потоки. Образное мышление способно их мгновенно схватывать и анализировать. Формирование образного мышления одна из основных задач дизайнерского образования [2].

Век узкой специализации сменяется временем широких возможностей и работы в кросс-командах. Дизайну никогда не была свойственна узкая специализация, он всегда действовал на стыке профессий, нередко дизайнер оказывается единственным коммуникатором в междисциплинарных группах.

Методы, используемые дизайнерами, уже активно внедряются в разработку бизнес-стратегий и всевозможных программ развития [3]. Практика показывает, что такой путь результативен. И дизайнеры охотно делятся своим опытом [4].

#### **Принципы и подходы от практикующего дизайнера:**

**1. Целостность профессии.** Все изучаемые дисциплины должны быть связаны между собой и нацелены на общий конечный результат — на способность творчески осмысливать и системно решать любую проектную задачу. Для целостного развития необходима связанность и непрерывность разных образовательных процессов. Если для каких-либо предметов для удобства расписания назначаются часы через неделю («числитель и знаменатель»), то целостность рушится. Цифры в учебном плане сходятся, а приобретаемые знания неминуемо расходятся. И это не единственная преграда, создаваемая искусственно непонятно ради чего «пассивным изучением».

**2. Свободное мышление.** Дизайнер не может повторять чужие находки, идеи, формы, его продукт обязан всегда быть инновационным. Поэтому первостепенная задача — научить студентов самостоятельно мыслить. Основная преграда в развитии нестандартного мышления — готовые методички и правила на каждое действие студента, которыми перенасыщено большинство вузов. Ныне в моде тренинги с разнообразными техниками развития креативности. Создается абсурдная ситуация — сначала мышление стандартизуется, а затем ищутся способы обойти типовые клише.

**3. Потребность в вопросах.** Меня крайне беспокоит отсутствие вопросов у студентов. Нет вопросов — нет мышления, есть банальное «заглатывание» информации, которая будет забыта к следующему занятию. Вопросы появляются, когда новое знание пропускается сквозь весь организм — не только через уши и голову, но и через глаза, руки, сердце.

**4. Совместная работа вместо диктатуры знаний.** Преподаватель дизайнера не может транслировать тексты учебников — профессия сугубо практическая. Единственно возможный здесь путь — совместная работа преподавателя со студентом в качестве наставника. Стандартные лекции в таком режиме невозможны, их заменяет интерактивный процесс, в котором каждая «порция» реальных жизненных ситуаций, примеров, позиций подкрепляется практическим действием, а за ним следуют обмен полученным опытом и его анализ. Преподаватель — проводник, советчик, соучастник, помощник.

**5. Право на ошибку.** В школе нас приучали: ошибается тот, кто ленив и нерадив, а кто упорен и старателен, всегда дает правильный ответ. Вопреки известной посло-

вице, я убеждена, что учат именно собственные ошибки, а не успешный результат. У нас не бывает «верных» и «неверных» ответов. Здесь может быть попадание в цель с первого раза, а может быть долгий поиск до тех пор, пока не возникнет чувство: «вот оно, то самое...».

**6. Отметки позволяют быть посредственностью.** Мы привыкли использовать оценки, чтобы показать студенту, чего он стоит. Но дизайнеры троечники никому не нужны, так как в творческой профессии троечник — неспособная, несостоявшаяся личность. На самом деле студенты очень разные, и невозможно предугадать, в какой именно момент «еще-не-дизайнер» может превратиться в дизайнера. К каждому нужно подобрать свой ключ, у каждого свой темп раскрытия потенциала. Мы же подходим ко всем с общей меркой.

### Литература

- [1] Мартин Б., Ханнингтон Б. *Универсальные методы дизайна. 100 эффективных решений для наиболее сложных проблем дизайна.* Санкт-Петербург, Питер, 2014, 208 с.
- [2] Пинк Дэниел. *Будущее за правым полушарием. Что делать, чем думать и как быть в век нового творческого мышления.* Москва, Рипол Классик, 2009, 320 с.
- [3] Остервальдер Александр. Пинье Иво. *Построение бизнес-моделей: Настольная книга стратега и новатора.* Москва, Альпина Паблишер, 2011, 288 с.
- [4] Келли Т., Келли Д. *Креативная уверенность. Как высвободить и реализовать свои творческие силы.* Москва, Азбука Бизнес, Азбука-Аттикус, 2015, 288 с.
- [5] Роэм Д. *Визуальное мышление.* Москва, Эксмо, 2010, 352 с.
- [6] Маклюэн М. *Галактика Гутенберга: Сотворение человека печатной культуры.* URL: [http://www.gumer.info/bibliotek\\_Buks/Culture/makl/index.php](http://www.gumer.info/bibliotek_Buks/Culture/makl/index.php).
- [7] Нейсбит Д. *Старт! или Настраиваем ум! Перестрой мышление и загляни в будущее.* Москва, АСТ, 2009, 288 с.
- [8] Сайт ВНИИТЭ: <http://www.vniite.com/#!/Промышленный-дизайн-Вспомнить-все-и-ВЗЯТЬ-БАРЬЕРЫ/c1x23/55a4d9380cf21636d2fdb921>.
- [9] Хан-Магомедов С.О. *Архитектура советского авангарда. Кн. 1. Проблемы формообразования. Мастера и течения.* Москва, Стройиздат, 1996.

УДК 747.012

## Интеграция методов системного дизайн-проектирования в научно-исследовательские работы

© Спасская Дарья Дмитриевна, Терехова Наталия Юрьевна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

*Работа посвящена вопросам развития и внедрения этапа дизайн-проектирования в опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы. Это позволит улучшить качественные, эргономические и потребительские показатели проектируемых объектов. Такими возможностями обладают трехмерные принтеры, сканеры, гра-*

*фические станции, fab lab (производственные лаборатории), персональные фабрики. Описаны этапы и технология дизайн-проектирования. Определена роль дизайн-проектирования в современном постиндустриальном информационном обществе.*

**Ключевые слова:** *дизайн-проектирование, научно-исследовательская работа, трансфер технологий, интеграция, показатель технической оснащенности.*

Анализ проводимых в последние годы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в техническом университете показал практически полное отсутствие этапа системного дизайн-проектирования и дизайнерской проработки проектируемых объектов. Однако опыт показывает, что на современном этапе развития возможностей моделирования возрастает необходимость использования этапа дизайн-проектирования. Это дает возможность улучшения качественных, эргономических и потребительских показателей проектируемых объектов.

Интеграция методов системного дизайн-проектирования в научно-исследовательские работы (НИР) повышает качество и эффективность выполняемых работ. На данном этапе проблема заключается в том, что эти методы не вошли в классическую практику выполнения НИР.

Для выполнения на современном уровне этапа системного дизайн-проектирования, как правило, требуется специализированное оборудование, причем с необходимым и достаточным количеством расходных материалов. К такому оборудованию может быть отнесен трехмерный принтер, трехмерный сканер, графические планшеты, графические станции, станки с числовым программным управлением и т.д. Для определения обеспеченности НИР специализированным оборудованием, введем понятие «показатель технической оснащенности этапа системного дизайн-проектирования» ( $P_{\text{тех.осн}}$ ).

Если  $P_{\text{тех.осн}}$  приближен к единице, можно считать, что техническая оснащенность этапа дизайн-проектирования достаточна для выполнения прототипа или модели проектируемого объекта требуемого качества. При значении показателя  $P_{\text{тех.осн}}$  меньше единицы для выполнения всех технических показателей на требуемом уровне потребуются дополнительные инструменты и оборудование, т. е. ресурсы других структур, подразделений и организаций. Если значение показателя  $P_{\text{тех.осн}}$  больше единицы, то собственные ресурсы, помимо выполнения своих бизнес-задач, могут и должны быть использованы в трансфере технологий для получения коммерческой выгоды [1].

Трансфер технологий лежит в основе эффективного сотрудничества многих организаций, причем имеющих разный профиль деятельности, но до сих пор сопровождается нерешенными проблемами как в организации информационных потоков, так и правовых. Но даже при этих ограничениях организации, использующие трансфер технологий, как правило, достигают этапа реализуемости своих бизнес-идей в более короткие сроки, чем без его применения.

Как указывалось выше, при выполнении НИР необходимо уделять особое внимание изготовлению прототипа, макета, модели проектируемого объекта. Материальное отсутствие объекта научного исследования и проектирования делает невозможным выполнение корректировки технических, технологических и других недочетов на ранних этапах выполнения проекта, что превращает решаемые проблемы в отложенные [2].

В некоторых случаях помогают решить ряд проблем fab lab. Они предназначены для того, чтобы стимулировать появление и проявление инноваций, и позволяют по-



лучить большее количество объектов проектирования, а также сделать их быстро, чтобы выяснить, что разрабатываемый объект соответствует бизнес-идеи, находится в «тупике» или необходимо больше ресурсов (временных, финансовых, людских, интеллектуальных) для его проработки. По мнению профессора Дэвида Ричардсона: «Fab lab — это технологическая песочница, игровая площадка, где вы можете играть с безнаказанностью». Используя возможности fab lab, концептуальные идеи и изделия и объекты достаточно быстро переходят в разряд продукта, готового к продаже. В fab lab, как правило, проводят разработку уникальных объектов для единичного спроса. Причем fab lab могут размещаться на небольшом пространстве и стоят относительно небольших денег. Если охарактеризовать fab lab с позиции введенного показателя —  $P_{\text{тех.осн}}$  то он при проектировании любого объекта равен единице. В таких лабораториях всегда имеется необходимое оборудование, причем с достаточным количеством расходного материала.

В последнее время наряду с fab lab употребляется понятие «personal fabricator» (персональные фабрики) — это машины, которые могут даже в домашних условиях производить все, что необходимо в настоящий момент. Реальность появления такой машины в каждом доме не так далека. В зарубежных университетах появились уже и курсы лекций под названием «как сделать все, что угодно». Обучающимся даются креативные задания, направленные на обучение личному производству и созданию машины «все-в-одном». Ученикам не говорят, что и как делается, а дают инструменты и позволяют им самим сделать что-то, причем они должны разрабатывать варианты решения как локальных, так и глобальных проблем. В настоящее время реальное и понятное нам устройство «все-в-одном» — это например многофункциональное устройство LaserJet, которое печатает, сканирует, передает факс и делает копии бумажных документов. Завтра «все-в-одном» будет резать, забивать гвозди, шить и готовить. Причем это уже не звучит как техно-утопическая идея. Машины «все-в-одном» — актуальны и необходимы, так как с их появлением исчезнет перепроизводство товаров, из магазинов исчезнет груда одежды, не подходящая никому по размеру, цвету, дизайну, на полках не будет просроченных продуктов и т. д. Все объекты будут в статусе уникального и нужного товара, понятие «мусор» исчезнет в прямом смысле этого слова. Но на данный момент существует два больших препятствия: технология и материалы [3].

В настоящее время отсутствует механизм передачи или обмена технологиями между структурами, даже в пределах одной организации, выполняющими НИР разной направленности, что относится к вопросам сферы трансфера технологий [1]. Для решения этих задач необходимо воспользоваться методами технологического аудита. Одним из элементов технологического аудита научной организации является анализ способности компании к «местному», а в дальнейшем и транснациональному трансферу технологий. Возникающие трансляционные барьеры необходимо преодолевать, так как их основа достаточно понятна. Они образуются в силу различного жизненного опыта, образования, социального статуса, локальных и долгосрочных целей людей — участников процесса трансфера технологий. Трансфер технологий и методы технико-технологического аудита НИР направлены на выявление различного ряда проблем и выработки решений по их устранению, в том числе в использовании и применении специализированного оборудования, недопущении использования старых технологий на новом оборудовании.

Этап системного дизайн-проектирования должен занять важное место в современных НИР. Базой методов дизайн-проектирования является системный подход, который представляет реальный объект в виде системы и осуществляет по отноше-

нию к нему сначала макро-анализ, а затем микро-анализ, детализирующий частные задачи [4]. Дизайн-исследование начинается с изучения объекта и его функционирования во внешнем мире в целом, а затем разделение его на составляющие, выделение подсистем, рассмотрение связей между ними и т. п. Методы системного дизайн-проектирования нацелены на целостный, интегративно-комплексный подход в организации научно-исследовательских работ. Объекты проектирования, в том числе и дизайн-проектирования, создаются при выполнении технического задания и для достижения количественных и качественных характеристик, но должны учитывать психологические аспекты, вопросы эргономики, эстетики, экологии и других наук. Американский дизайнер Гарольд ван Дорен считал, что дизайнер разрабатывает такие изделия для производства, которые служат человеку лучше, чем существующие ранее, и возбуждают в потребителе желание обладать ими.

Среда оказывает одно из определяющих и формирующих воздействий, поэтому объект проектирования должен быть исследован в различной среде, включая город, офис, производственные помещения, места отдыха, спортивные и выставочные комплексы, торговые, транспортно-коммуникативные пространства, сферу обслуживания, образования, и дизайнер изначально ориентирован на работу с различной средой (камерная, масштабная, комфортная, природная, типовая, индивидуальная и др.).

Термин «дизайн» подразумевает особый метод проектирования, при котором объекту проектирования, кроме его основного предназначения, придаются качества красоты, экономичности, повышенной функциональности, преумножения числа функций, физиологического и/или психологического удобства, комфортности, четкой социальной ориентации.

Практику современного дизайна определяет сознание того, что современный человек живет в среде полностью спроектированной и постоянно обновляемой путем проектирования. Универсальный метод системного проектирования, направлен на создание единой цельной культурной сферы жизни и бытия человека как социальной, так и материальной среды. Воплощение единства науки, техники и искусства.

«Проблематизирующее», «открытое» проектирование — это новые подходы к проектированию, где используется специфика профессионального мышления дизайнера, предполагающая не только традиционную для проектирования возможность воздействия на окружающую среду, но и необходимость собственных изменений в зависимости от ее реакций.

Технологии дизайна пока не могут считаться полностью «упорядоченными». Относительная «неорганизованность» дизайна объясняется его принадлежность к сфере искусств, которые наиболее результативны как раз при свободе творчества, а не в рамках его жесткой регламентации. Инженерно-изобретательский потенциал цивилизации, новации в технологиях, конструкциях и материалах, специфический арсенал профессиональных художественных средств также входят в процесс дизайн-проектирования. Методика системного дизайн-проектирования заимствована из самых разнообразных источников. Ее большая часть взята из различных видов искусств, разных областей техники, экономики, эргономики, социологии. Цель современного системного дизайн-проектирования — создание для человека целостной и совершенной в функциональном отношении среды. При дизайн-проектировании необходимо предвидение наиболее существенных индивидуально-биологических, социальных и экологических изменений, которые могут быть вызваны появлением новых искусственных объектов и, соответственно, существует важность вопроса о предотвращении нежелательных последствий такого появления.

Современный мир не только многообразен, но и находится в непрерывном развитии, в движении, а сфера существования сегодняшнего человека резко отличается по своим характеристикам от мира прошлого. Организации, ведущие НИР, проектирующие и работающие в современных быстро трансформирующихся условиях, не вмешиваясь в творческие процессы исследований и естественную инициативу исследователей и разработчиков, должны направлять их на решение глобальных целевых и конкретных бизнес-задач. В ходе научных исследований и проектирования им приходится применять разные методы и методики в зависимости от характера исходных ситуаций, и часто логика процесса проектирования остается невыясненной, поэтому необходимо введение системного подхода в практику НИР.

Интеграция методов системного дизайн-проектирования в НИР — важная актуальная проблема современного постиндустриального информационного общества.

### Литература

- [1] Терехова Н.Ю., Брекалов В.Г. Технологический аудит в аспекте проблем трансфера технологий при выполнении научно-исследовательских работ. *European Social Science Journal*, 2014, № 11 (2), с. 7–11.
- [2] Брекалов В.Г., Терехова Н.Ю., Сафин Д.Ю. Применение технологии трехмерного прототипирования в образовательном процессе. *Дизайн и технологии*, 2012, № 29 (71), с. 118–123.
- [3] Цибизова Т.Ю., Гузева Т.А. Системы автоматического управления технологическими процессами отверждения изделий из полимерных композитов. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2015, № 5, с. 35–40.
- [4] Цибизова Т.Ю., Неусыпин К.А. Некоторые аспекты реструктуризации системы управления современными учебно-научными центрами. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 1, с. 30–34.

УДК 53.084.823

## Дизайн-исследования предметно-пространственного компонента образовательной среды

© Шайманова Елена Николаевна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[ShaymanovaE@gmail.com](mailto:ShaymanovaE@gmail.com)

*Рассмотрена важность предметно-пространственного компонента образовательной среды. Проектированию любой среды предшествует анализ задач, требований, рекомендаций и ограничений. На примере проведенного в 2014 г. дизайн-исследования московских школ продемонстрирован современный подход выявления требований к физической среде школы со стороны всех участников образовательного процесса: учеников, родителей, учителей, администрации и сотрудников школ, департамента образования.*

**Ключевые слова:** *дизайн-исследования, образование, предметно-пространственный компонент, среда.*

В рамках экологической психологии, науки, изучающей психологические аспекты взаимодействия человека с окружающей средой, доказано, что среда во многом определяет поведение человека [1]. Если говорим о школе, значимость физической среды подчеркивается тем, что в образовательной среде выделяют структурный пространственно-предметный компонент — «пространственные условия и предметные средства, совокупность которых обеспечивает возможность требуемых пространственных действий и поведения субъектов образовательной среды» [2].

Интерес к роли предметно-пространственного компонента в образовательной среде за рубежом определяется тем, на каком уровне в государстве рассматривается этот вопрос [3, 4], а также по обновляемым руководствам, как построить безопасное, развивающее школьное пространство [5, 6]. В России на данный момент регламентируется, а значит и подвергается экспертизе, лишь необходимый минимум для обеспечения базовой потребности ребенка в физически безопасной образовательной среде [7–9].

Постепенно и в России идея проведения мультидисциплинарных исследований находит поддержку. В 2014 г. по заказу департамента образования Москвы были проведены дизайн-исследования интерьеров помещений и процессов жизнедеятельности на территории более 30 школ Москвы [10].

Специфика проведения дизайн-исследований позволяет решать многоплановые проблемы, учитывать потребности всех заинтересованных лиц и соединять в целостность противоречивые требования. В рамках дизайн-исследования интерьеров школ для сбора данных использовались малоформализованные методики: графическая проективная методика, беседа и наблюдение. Поскольку в образовательном процессе участвуют различные группы заинтересованных пользователей, для каждой из них подбирались свои методы, разрабатывались анкеты. Круглые столы, сессии мозговых штурмов помогли включить сотрудников школ в исследование и выявить наиболее критические ситуации. Структурированное наблюдение позволило определить скрытые и невербализируемые потребности учеников и учителей. Полевые исследования предваряли кабинетные исследования, направленные на выявление требований к современной школе через анализ ФГОС, СНИПов, СанПиНов, педагогических систем и зарубежных аналогов.

Проведенные исследования показали, насколько по-разному воспринимают предметно-пространственную среду субъекты образовательного процесса (ученики, учителя, родители, администрация, сотрудники школы), как сильно различаются их ожидания и с какими трудностями они сталкиваются. Были выявлены противоречия между ФГОСами, СНИПами и существующими архитектурными решениями. Проведенный анализ зарубежных школ обозначил тенденции в области образовательной среды и наметил первые варианты разрешения сложившихся проблем.

Благодаря системности подхода удалось собрать и синтезировать столь разноплановую информацию и разработать схему «типологизации пространства», на основании которой уже структурировать задачи, рекомендации, ограничения для каждого пространства.

Результаты исследования лягут в основу руководства, с помощью которого сотрудники школ смогут квалифицированно и эффективно влиять на решения в вопросах реконструкции и ремонта школ для создания современной комфортной и иннова-

ционной среды. Руководство будет содержать рекомендации по цветовым решениям, освещению, выбору материалов и мебели, а также по организации пространств. Администрация школ сможет самостоятельно действовать и участвовать в подготовке технических заданий на ремонт и реконструкцию. Это позволит повысить компетентность сотрудников школ, а значит более эффективно использовать физическую среду в образовательных целях.

Проведенные исследования получили высокую оценку в департаменте образования. Можно надеяться, что проведение мультидисциплинарных исследований будет предвещать все масштабные нововведения, тем более что городские форумы выявили потребность в преобразовании не только школьной среды, но и предметно-пространственного решения вузов, причем запрос был озвучен не только со стороны гуманитарных, но и технических представителей.

### Литература

- [1] Смолова Л.В. *Психология взаимодействия с окружающей средой: экологическая психология*. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный институт психологии и социальной работы, 2010, 711 с.
- [2] Панов В.И. *Психодидактика образовательных систем: теория и практика*. Санкт-Петербург, Питер, 2007, 352 с.
- [3] *Национальная служба в Великобритании*. URL: <http://www.designcouncil.org.uk/knowledge-resources/case-study/schools-project> (дата обращения 23.07.2015).
- [4] *Национальная служба в Соединенных Штатах*. URL: <http://www.schoolsecurity.org/resource/school-design/> (дата обращения 21.07.2015).
- [5] Randall I. *Atlas. 21st Century Security and CPTED: Designing for Critical Infrastructure Protection and Crime Prevention*. CRC Press, 2013, 954 с.
- [6] *Seven Important Building Design Features to Enhance School Safety and Security*. British Standard BS 4163:2007.
- [7] *Федеральный государственный образовательный стандарт начального общего образования (1–4 кл.)*. URL: <http://минобрнауки.рф/документы/922> (дата обращения 28.07.2015).
- [8] *Федеральный государственный образовательный стандарт основного общего образования (5–9 кл.)*. URL: <http://минобрнауки.рф/документы/938> (дата обращения 24.07.2015).
- [9] *Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования (10–11 кл.)*. URL: <http://минобрнауки.рф/документы/2365> (дата обращения 23.07.2015).
- [10] *Центр проектных технологий МАрХИ*. URL: <http://edu.urby.ru/> (дата обращения 23.07.2015).

УДК 621.774.353

### Разработка инновационного способа изготовления заготовок для инъекционных анкеров

© Берестнев Сергей Александрович, Соколова Ольга Вадимовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[berestini@mail.ru](mailto:berestini@mail.ru)

*Рассмотрены ныне известные способы получения заготовок для винтовых штанг инъекционных анкеров, а также предложен альтернативный, который позволил бы сократить затраты на их изготовление. Он предусматривает использование в качестве заготовок отработанных тонкостенных труб нефтегазовой отрасли с последующей переработкой их на стане поперечно-винтовой прокатки для достижения требуемого наружного диаметра и необходимой толщины стенки, значительно превышающей толщину стенки исходной заготовки.*

**Ключевые слова:** инъекционный анкер, строительство, труба, обжатие, толщина стенки, прокатка.

При усилении существующих фундаментов в настоящее время широко используются буроинъекционные сваи (анкера) [1]. С их помощью проводится укрепление фундаментов в любых грунтовых условиях, и при этом не требуется разработка котлованов и не нарушается естественная структура грунтов основания, так как применяемое для их устройства оборудование не создает динамических воздействий и, кроме того, оно малогабаритно и может быть установлено внутри жилого или производственного помещения.

По конструкции инъекционные анкера представляют собой трубные анкеры и применяются в качестве впрессовываемых свай и грунтовых нагелей. При работе с такими анкерами отпадает необходимость в проведении таких рабочих операций, как заведение натяжного стального стержня и извлечение обсадной трубы.

Инъекционные анкера в зависимости от типа имеют широкий спектр применения:

- укрепление откосов горных массивов, насыпей дорожных путей;
- укрепление шпунтовых и бетонных стен, котлованов, подземных гаражей,

устьев рек;

- опоры мачт линий электропередач и телефонных сетей;
- реконструкция и ремонт зданий и сооружений.

В настоящее время для производства заготовок винтовых штанг инъекционных анкеров используют горячекатаные трубы, изготавливаемые на металлургических заводах на станах продольной и винтовой прокатки. Однако в силу специфики параметров трубных заготовок для инъекционных анкеров получение ряда профилей (толстостенных труб малого диаметра) осуществляется не горячей прокаткой, а холодной. Технология прокатки на станах холодной периодической прокатки труб включает в себя следующий цикл операций: подготовку к холодному переделу, непосредственно прокатку, а затем несколько операций по обезжириванию и термообработке. Кроме того, сама заготовка — «черновая» труба, полученная методом холодного деформирования также достаточно дорогая, что делает производство нерентабельным. Таким образом, актуальной задачей является разработка способа, позволяющего получать дешевые трубные заготовки с минимальными затратами.

Целью настоящих исследований является получение заготовки с толщиной стенки, значительно превышающей толщину стенки труб нефтяного сортамента. Так если стандартная труба нефтегазового сортамента диаметром 48 мм имеет толщину стенки 4,0 мм, то для производства заготовки для анкеров необходимо иметь толщину порядка 10 мм.

Процесс производства трубчатых винтовых штанг для инъекционных анкеров осуществляется в два этапа:

1. Обжатие заготовки до требуемой толщины стенки.
2. Накатка винтовой поверхности на стане поперечно-винтовой прокатки.

Прежде чем перейти к созданию нового способа по производству заготовок для анкеров, был проведен анализ существующих способов производства труб. Как вариант был рассмотрен процесс редуцирования горячекатаных на станах продольной прокатки труб без натяжения. Однако, как показали теоретические исследования, реализовать требуемую технологию на существующем оборудовании не представляется возможным.

Положительный результат был получен на станах винтовой прокатки. Как показывает опыт эксплуатации таких станов, именно этот способ позволяет добиться значительного утолщения стенки при редуцировании. Для обжатия заготовки до требуемого диаметра при поперечно-винтовой прокатке необходима всего одна клеть за счет больших обжатий, что позволяет экономить производственные площади.

Была проведена апробация нового способа и технологии на стане 100 поперечно-винтовой прокатки. На нем удалось отработать технологию прокатки и определить основные параметры процесса, обеспечивающие стабильный процесс прокатки. Размеры полученной трубы соответствуют требуемым для дальнейшей прокатки трубного винтового анкера. Таким образом, для производства инъекционных анкеров малого диаметра было предложено использовать в качестве заготовки отработанные горячекатаные трубы нефтяного сортамента с дальнейшим переделом на стане поперечно-винтовой прокатки под требуемый размер. Разработан новый способ и технология для производства заготовок с утолщенной стенкой.

## Литература

- [1] Перлей Е.М., Раюк В.Ф., Лобовиков Д.А. *Инъекционный анкер*. Патент 487984 СССР. Б.И. 1975, № 38.

- [2] Соколова О.В., Лепестов А.Е., Моисеев А.А. Пути расширения технических возможностей оборудования для производства труб нефтегазового сортамента методом валковой формовки. *Производство проката*, 2014, № 4, с. 28–30.
- [3] Данченко В.Н., Коликов А.П., Б.А.Романцев Б.А., С.В.Самусев. *Технология трубного производства*. Москва, Интермет Инжиниринг, 2002, 640 с.
- [4] Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. *Производство труб*. Москва, Металлургия, 1968, 440 с.
- [5] Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алещенко А.С., Минтаханов М.А. Получение горячекатаных труб из стали X18H10T на станах винтовой прокатки. *Производство проката*, 2014, № 8, с. 14–18.
- [6] Друян В.М., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. *Теория и технология трубного производства*. Днепропетровск, РИА «Днепр-ВАЛ», 2001, 544 с.
- [7] Осадчий В.Я., Вавилин А.С., Зимовец В.Г., Коликов А.П. *Технология и оборудование трубного производства*. Москва, Интермет Инжиниринг, 2001, 608 с.
- [8] Барабашкин В.П., Тартаковский И.К. *Производство труб на агрегатах с трехвалковым раскатным станом*. Москва, Металлургия, 1981, 48 с.
- [9] Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Применение непрерывнолитой заготовки для производства высококачественных насосно-компрессорных труб на ТПА-80. *Производство проката*, 2011, № 12, с. 17–20.

УДК 621.77

## Методика расчета калибровки рабочих валков при поперечно-винтовой прокатке ребристых труб

© Дронов Артем Игоревич, Комкова Татьяна Юрьевна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[temadronov@mail.ru](mailto:temadronov@mail.ru)

*Рассмотрены вопросы производства методом обработки металлов давлением основного действующего элемента современных теплообменных аппаратов — ребристых труб. Выявлены основные требования к рабочему инструменту — прокатным валкам. Приведена методика расчета калибровки прокатных валков. Показаны пути совершенствования и расширения возможностей способа, в том числе влияния калибровки валков на прочностные характеристики готового изделия. Сделан вывод о том, что применение указанной методики может быть использовано для производства ребристых труб различных типоразмеров.*

**Ключевые слова:** прокатный стан, калибровка валков, пластическая деформация, теплообменные аппараты.

В настоящее время сохраняется высокий спрос на холодильники и теплообменники. Потребителями данного оборудования являются энергетическая, химическая, нефтеперерабатывающая, судостроительная и другие отрасли промышленности. Исследования показали, что для повышения технологических и эксплуатационных свойств теплообменных аппаратов целесообразно использовать в них ребристые трубы [1].



Ребристые трубы получают методами продольной и поперечно-винтовой прокатки, что позволяет достичь 100%-го использования металла и очень высокой производительности процесса. Однако трубы с высотой ребра более 1 мм возможно получить только на станах поперечно-винтовой прокатки [1, 2, 3]. Способ реализован на трехвалковом стане поперечно-винтовой прокатки [4].

Для того чтобы обеспечить получение необходимого сортамента труб, нужно спроектировать рабочий инструмент, т. е. валок. Прокатные валки в нашем случае могут иметь кольцевые или винтовые калибры.

Валки с винтовыми калибрами используют для производства труб с кольцевыми ребрами (при прокатке труб с кольцевыми ребрами угол подачи примерно равен углу подъема винтовых калибров валка).

Валки с кольцевыми калибрами используют для изготовления труб со спиральными однозаходными или многозаходными ребрами (оси валков наклонены к оси прокатки на угол, равный углу подъема винтовой поверхности ребер по среднему диаметру прокатываемого профиля). Валки в этом случае изготавливают в виде набора дисков переменного профиля и имеют три участка:

- участок предварительного обжатия заготовки, назначение которого — посадить алюминиевую рубашку на стальной сердечник;
- формирующий участок, на котором постепенно образуется заданный профиль заготовок;
- калибрующий, на котором заготовка получает более точные размеры.

Нами была проработана методика расчета калибровок для ребристых труб с различными коэффициентами оребрения. Приведены данные по геометрическим параметрам дисков. Предложена последовательность их сборки в узел прокатного валка, даны рекомендации по настройке валков на угол разворота и регулировки осевого положения валков.

Исходными данными для проектирования инструмента является диаметр труб, геометрия профиля и число заходов ребер.

Диаметр, толщина стенки трубы и элементы профиля ребер (шаг, высота, толщина), определяющие коэффициент оребрения, выбираются на основании теплотехнических и прочностных расчетов. Заходность ребер обычно выбирается по технологическим соображениям. Наибольший диаметр валков определяется из условия возможности прокатки труб наименьшего диаметра на трехвалковом стане. Это условие приводит к соотношению

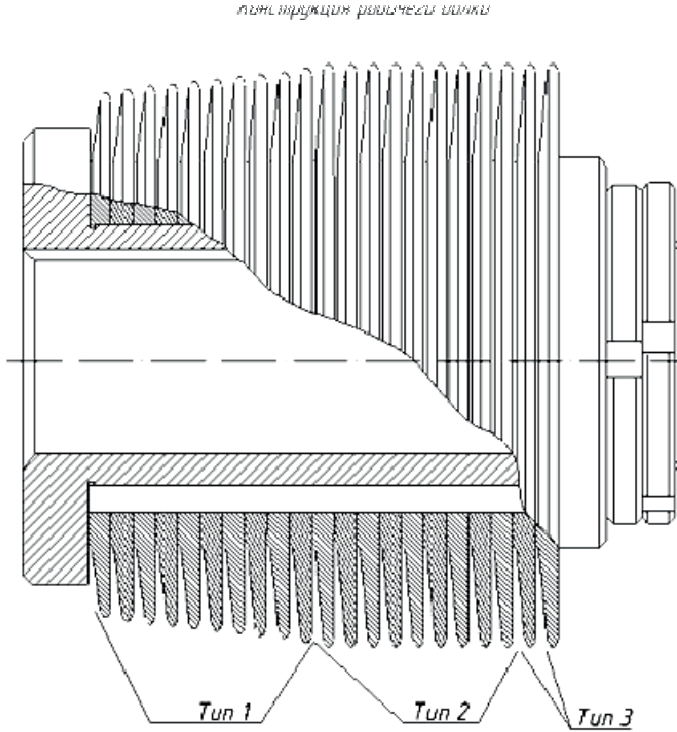
$$D_{\text{наиб}} \leq 6,43d_{\text{наим}} - 7,41S, \quad (1)$$

где  $D_{\text{наиб}}$  — наибольший диаметр валков, мм;  $d_{\text{наим}}$  — наименьший наружный диаметр прокатываемой трубы, мм;  $S$  — радиальный зазор между валками, мм (не менее 1...2 мм).

Толщина дисков должна быть меньше шага ребер на величину от 0,1 до 0,5 мм. Несоответствие шага ребер и толщины дисков происходит из-за упругой деформации последних деформирующих и калибрующих дисков, из-за развалки (отгиба) профиля ребер дисками и осевым истечением металла при выходе трубы из валков, а также из-за наличия угла подачи.

Шаг ребер приближается по величине к толщине дисков при увеличении количества калибрующих дисков. Формирование ребер, из стенки труб осуществляется за счет радиального и осевого обжатия металла в калибрах. Валки для прокатки ребри-

стых труб имеют заходный конус и цилиндрические участки — формирующий и калибрующий (рис. 1).



**Рис. 1.** Конструкция рабочего вала:  
тип 1 — диски заходного конуса, тип 2 — диски калибрующие и формирующие, тип 3 — диск дополнительного обжатия

На заходном конусе происходит главным образом радиальное обжатие заготовки с утонением стенки трубы и отделением определенных объемов металла, необходимых для формирования ребер. На цилиндрическом участке происходит вытяжка ребер за счет осевого обжатия металла в калибрах и их окончательное формирование.

Калибрующий участок состоит из 2, 3-х дисков с постоянным профилем. В некоторых случаях калибрующий участок составляют из дисков с постепенным утонением профиля и уменьшением диаметра, чем достигается уменьшение неуравновешенного осевого давления на последние деформирующие диски, действующего во время прокатки.

Фактические величины частных обжатий в калибрах определяют геометрию дисков, порядок их комплектации (сборки) и схему настройки валков. Валками с кольцевыми калибрами обычно прокатывают трубы с одно-, двух- или трехзаходным оребрением. При прокатке однозаходного оребрения валки устанавливают с осевым смещением относительно друг друга на  $1/3$  шага ребер, при двухзаходном оребрении величина осевого смещения равна  $2/3$  шага ребер и, наконец, при трехзаходном оребрении — все три вала устанавливают без осевого смещения.

При осевой настройке один из валков (обычно валок № 1, согласно комплектации дисков) закрепляют неподвижно, предварительно развернув его на заданный угол подачи, а два других устанавливают со смещением относительно неподвижного валка при помощи установочных винтов.

При угловой настройке оси всех валков должны быть наклонены к оси прокатки на одинаковый угол подачи. Угол подачи вычисляется по формуле:

$$\alpha \cong \frac{57,3tk}{\pi d_{\text{заг}}}, \quad (2)$$

где  $t$  — шаг ребер или толщина дисков, мм;  $k$  — число заходов ребер;  $d_{\text{заг}}$  — диаметр заготовки, мм.

Угловую и осевую настройку обычно проверяют по сравнению следов инструмента на заготовке при ее обкатке валками с небольшим обжатием. Для проверки настройки заготовку зажимают между валками и поворачивают их вручную на 1/3 оборота заготовки.

При точной настройке концы следов от первого валка должны совпасть с началом следов от второго валка, концы следов от второго валка должны совпасть с началом следов от третьего валка, а концы следов третьего валка — с началом следов первого.

Радиальная настройка валков заключается в сведении их на размер, соответствующий диаметру трубы по основанию ребер. Эта настройка производится путем сведения валков до соприкосновения с оправкой заданного диаметра винтом.

Калибровка валков с переменной «конструктивной» точкой даст возможность увеличить прочность рабочей части инструмента при некотором ограничении радиально-тангенциального истечения металла в калибрах. Калибровку валков с односторонним несимметричным обжатием применяют с целью упрощения изготовления при необходимости некоторого увеличения шага ребер и при сравнительно малых углах подъема винтовых ребер.

На выбор схемы обжатий влияют также технологичность конструкции и удобство эксплуатации инструмента. При изготовлении дискового инструмента практически можно осуществить любую из рассмотренных схем обжатий.

Таким образом, при проектировании рабочего инструмента в зависимости от требований к готовому изделию следует выбирать один из предложенных способов калибровки, который может обеспечить не только заданный профиль готового изделия, но и повлиять на прочностные характеристики оребренной трубы.

### Литература

- [1] А.С. 893358 СССР. *Инструмент для прокатки цилиндрических изделий с продольными ребрами*. Носаль В.В., Соколова О.В. Б.И., 48, 1982.
- [2] Соколова О.В., Комкова Т.Ю. Современный способ производства точных заготовок для колец подшипников. *Производство проката*, 2013, № 3, с. 23–24.
- [3] Соколова О.В., Комкова Т.Ю. Способ и оборудование для производства многореберных труб. *Производство проката*, 2013, № 1, с. 20–22.
- [4] А.С. 1031609 СССР. *Устройство для поперечно-винтовой прокатки ребристых труб*. Бунеев Б.Г., Юрова Б.И. Б.И., 28, 1983.

УДК 621.774.21

## Типы калибровки инструментов формовочных станов для производства прямошовных труб

© Елин Александр Юрьевич, Соколова Ольга Вадимовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[ctorublej@yandex.ru](mailto:ctorublej@yandex.ru)

*Рассмотрены вопросы производства электросварных прямошовных труб. Дана краткая информация о станах, изготавливающих такие трубы. Проведен анализ существующих калибровок рабочего инструмента — формовочных валков. Показаны современные калибровки формовочных валков. Сделан вывод о том, что необходимо применение современных калибровок рабочего инструмента для достижения требований современного рынка к готовой продукции.*

**Ключевые слова:** *формовочный стан, калибровка валков, трубная заготовка, электросварные трубы, прямошовные трубы.*

В настоящее время объем производства стальных труб в мире непрерывно возрастает. Электросварные прямошовные трубы по многим качественным показателям не уступают бесшовным.

Для изготовления труб различного сортамента из различных материалов служат трубоэлектросварочные агрегаты. Каждый такой агрегат — огромный комплекс оборудования, включающий в себя, кроме линии самого стана, большой объем трубоотделки. Непрерывный трубоформовочный стан состоит из ряда установленных друг за другом валковых клетей. В станах разных типоразмеров расположено от 6 до 12 горизонтальных приводных клетей и между ними некоторое количество вертикальных неприводных клетей.

Важнейшим процессом в производстве сварных труб является формовка трубной заготовки. Стадии формовки на непрерывных валковых станах определяются выбранным характером и последовательностью изгиба полосы, учитывающими механические свойства металла, размеры заготовки, скорость формовки, требования к качеству сварного шва и другие факторы, обеспечивающие технологичность процесса и минимальные напряжения в полосе.

В настоящее время применяют большое количество калибровок формирующих валков, в связи с чем на однотипных станах для одинаковых размеров труб формовочные валки имеют различные габаритные размеры и форму рабочего ручья. Все разнообразие калибровок формовочных станов можно определить различными комбинациями шести основных типов (однорядная калибровка, двухрядная калибровка, формовка заготовки с подгибкой кромок и др.) [1].

Такие калибровки были изобретены еще несколько десятков лет назад. Существуют рекомендации по выбору одной из калибровок, которая будет наиболее подходящей для производства определенного типоразмера труб из стали определенного класса прочности. Современный рынок требует трубную продукцию различного сортамента, из различных материалов. Данная потребность связана с развитием многих

отраслей промышленности, поэтому заводам-изготовителям необходимо искать новые методы формовки трубной заготовки, которые возможно реализовать на существующем оборудовании без потери качества готовой продукции [2].

Примером калибровки, подходящей для формовки заготовки из сталей повышенной прочности, может служить W-образная калибровка [3]. Использование такой калибровки позволяет изготавливать трубы с большей толщиной стенки и из материалов с более высокими прочностными показателями, чем при использовании стандартных калибровок. W-образная калибровка широко используется в трубной промышленности за рубежом, где она успела себя хорошо зарекомендовать.

### Литература

- [1] Матвеев Ю.М., Ружинский М.Б., Ромашов А.А., Халамез Е.М. *Технология производства электросварных труб*. Москва, Металлургия, 1967, 400 с.
- [2] Соколова О.В., Лепестов А.Е. Формообразование трубных профилей, Москва, *электронное научно-техническое издание «Наука и образование»*, № 7, июль 2010.
- [3] Официальный сайт «Roll-Kraft»: <http://www.roll-kraft.com/>.

УДК 621.774.35

## Повышение качества особотонкостенных труб, полученных методом холодной периодической прокатки

© Комков Александр Евгеньевич, Миронова Мария Олеговна,  
Соколова Ольга Вадимовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
[komkov@gmail.com](mailto:komkov@gmail.com)

*Работа посвящена повышению качества получения особотонкостенных труб на валковых станах холодной периодической прокатки. Создана модель зажатия заготовки в плашках патрона подачи и поворота заготовки, позволяющая определить усилие зажатия при определенной осевой силе, которое не приведет к смятию особотонкостенной заготовки, обеспечивая при этом надежное удержание трубы в процессе прокатки. Наглядно представлен выбор формы и размеров плашек для каждой величины осевой силы в зависимости от размеров и материала заготовки.*

**Ключевые слова:** прокатный стан, холодная прокатка, деформация, патрон подачи, особотонкостенная труба.

В настоящее время наметилась потребность в особотонкостенных трубах малого и среднего диаметров. Обычно их производят на валковых станах холодной периодической прокатки. Сильное увеличение нагрузок на все узлы при прокатке таких труб

вызывает значительные проблемы, в том числе в обеспечении точности и высокого качества поверхности изделия.

Также одной из важных и нерешенных проблем является возникновение осевых усилий. Данная проблема возникает из-за технологических особенностей рабочего инструмента и технологии производства труб на станах ХПТ.

Опытные исследования и циклограммы осевых сил, полученные в АХК ВНИИМЕТМАШе [1], показали, что величина осевых сил и их направление могут постоянно меняться в процессе прокатки, из-за чего нагрузки на патрон подачи-поворота увеличиваются и патрон не удерживает заготовку [2].

Возникает относительное движение оправки внутри трубы в очаге деформации, что часто является причиной брака. С другой стороны, чрезмерное зажатие заготовки плашками также может привести к смятию заготовки, задирам и т. д. Необходимо определить технологические параметры работы патрона подачи, чтобы выяснить диапазон допустимых сил зажатия заготовки различных осевых силах и при различных конструкциях зажимных плашек.

Создана модель зажатия заготовки в плашках патрона подачи и поворота заготовки, позволяющая определить усилие зажатия при определенной осевой силе, которое не приведет к смятию особо тонкостенной заготовки, обеспечивая при этом надежное удержание трубы в процессе прокатки. Наглядно представлен выбор формы и размеров плашек для каждой величины осевой силы в зависимости от размеров и материала заготовки.

### Литература

- [1] Филатов А.А., Соколова О.В., Лагошина Е.В., Ушаков А.Г. Способы снижения осевых усилий на станах ХПТ. *Производство проката*, 2014, № 12, с. 21–24.
- [2] Целиков Н.А., Филатов А.А. Модернизация зубчато-реечного привода стана холодной прокатки труб. *Производство проката*, 2014, № 5, с. 22–30.

УДК 621.774.3

## Экспериментальное исследование осевых усилий в станах холодной периодической прокатки труб

© Лагошина Елена Владимировна, Соколова Ольга Вадимовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана

[elena19881988@mail.ru](mailto:elena19881988@mail.ru)

*В рамках исследований по снижению осевых усилий проведен анализ методики расчета основных параметров процесса прокатки. Корректность методики оценивалась на основе полученных экспериментальных значений осевых усилий, действующих на трубу при прокатке. На основе анализа экспериментальных данных была*

*предложена новая методика расчета катающего радиуса. Данная методика расчета позволяет максимально снизить значение осевых усилий, действующих на трубу при прокатке. Снижение осевых усилий позволяет получить трубу необходимого качества и интенсифицировать режим обжатий.*

**Ключевые слова:** *высококачественные трубы, холодная периодическая прокатка, осевые усилия, катающий радиус.*

В настоящее время большое развитие получил метод холодной периодической прокатки труб. Этим методом получают тонкостенные прецизионные трубы из различных сталей и сплавов, в том числе из труднодеформируемых. На качество готового изделия влияют осевые силы, возникающие при прокатке [1]. Дело в том, что при переходе на новый сортament, а это особотонкостенные трубы из материалов с повышенным пределом прочности, значительно возрастают нагрузки на все узлы стана, в том числе осевые нагрузки. Возникает опасность появления брака.

Существуют различные способы снижения осевых усилий, но каждый из них имеет свои недостатки [2]. По этой причине в рамках исследований проводимых во ОАО АХК ВНИИМЕТМАШе по снижению осевых усилий, прежде чем продолжать искать конструктивное [3] решение проблемы, было решено провести анализ методики расчета основных параметров процесса прокатки, для чего были проведены экспериментальные исследования по измерению осевых усилий при прокатке. Основной задачей было сравнение результатов расчетов по методике, принятой в ОАО АХК ВНИИМЕТМАШе, с фактическим значением осевых сил, полученным в результате замеров основных технологических параметров, возникающих при прокатке труб на современных станах холодной периодической прокатки труб.

С этой целью на стане ХПТ 10-45 со стандартным приводом валков, в котором используется рейка с постоянным шагом зубьев, были проведены эксперименты по измерению осевых усилий, возникающих при прокатке труб по различным маршрутам и из различных материалов.

Для измерения осевого усилия, действующего на трубу при прокатке, были разработаны оригинальная месдоза и тарировочное устройство специальной конструкции. При прокатке на трубу начинают действовать осевые усилия, которые передаются на месдозу. Далее информация с тензодатчика, размещенного на месдозе, поступает на тензоуселитель, а с него — на компьютер. Полученные экспериментальные значения осевых усилий резко отличались от ожидаемых значений.

Как известно, для наиболее благоприятных процессов деформации металла при прокатке на станах ХПТ необходимо, чтобы радиус ведущей шестерни совпадал с катающим радиусом калибра. Под катающим радиусом понимают радиус, проведенный в точке на калибре валка, где окружная скорость валков равна скорости выхода металла из валков.

Однако конструкция привода клетки с рейкой с постоянным шагом зубьев не позволяет достичь этого [1]. Ввиду этого принято выбирать радиус ведущей шестерни, имеющий минимальное отклонение от катающего радиуса для данного диапазона труб, и это величина постоянная. По такому же принципу был выбран радиус ведущей шестерни для данного эксперимента. Согласно теории периодической прокатки в какой-то точке очага деформации выбранное значение радиуса ведущей шестерни будет равно мгновенному катающему радиусу. Таким образом, в начале очага деформации реальное значение катающего радиуса должно быть меньше выбранного, а в его конце — больше. Следовательно, согласно эпюре скоростей

точек ручья валка, в начале очага деформации должны быть растягивающие осевые усилия, а в конце — сжимающие [4]. Однако, согласно экспериментальным данным, сжимающие осевые усилия наблюдаются практически по всей длине очага деформации. Это не дает возможности получить трубу нужного качества и вызывает дополнительную нагрузку на узлы стана, в частности на патрон подачи.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что расчеты по используемой методике катающего радиуса являются неточными и необходимо внести корректировки, позволяющие максимально приблизить результаты теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что необходимо увеличивать значения катающего радиуса в начале очага деформации. Для достижения необходимого значения катающего радиуса в начале очага деформации была предложена новая методика расчета, основанная на методике Шевакина.

### Литература

- [1] Кофф З.А., Соловейчик П.М., Алешин В.А., Гриншпун М.И. *Холодная прокатка труб*. Свердловск, Государственное научно-техническое издательство по черной и цветной металлургии, Свердловское отделение, 1962.
- [2] Филатов А.А., Соколова О.В., Лагошина Е.В., Ушаков А.Г. Способы снижения осевых усилий на станах ХПТ. *Производство проката*, 2014, № 12, с. 21–24.
- [3] Целиков Н.А., Филатов А.А. Модернизация зубчато-реечного привода стана холодной прокатки труб. *Производство проката*, 2014, № 5, с. 22–30.
- [4] Шевакин Ю.Ф. *Калибровка и усилия при холодной прокатке труб*. Москва, Государственное научно-техническое издательство по черной и цветной металлургии, 1963.

УДК 669.14

## **Разработка и освоение технологии производства хладостойкого проката для электросварных труб в условиях литейно-прокатного комплекса АО «ОМК-Сталь»**

**© Солдатов Евгений Александрович, Мунтин Александр Вадимович,  
Червонный Алексей Владимирович, Науменко Виталий Владимирович**

Россия, г. Выкса, Акционерное общество «Выксунский металлургический завод»

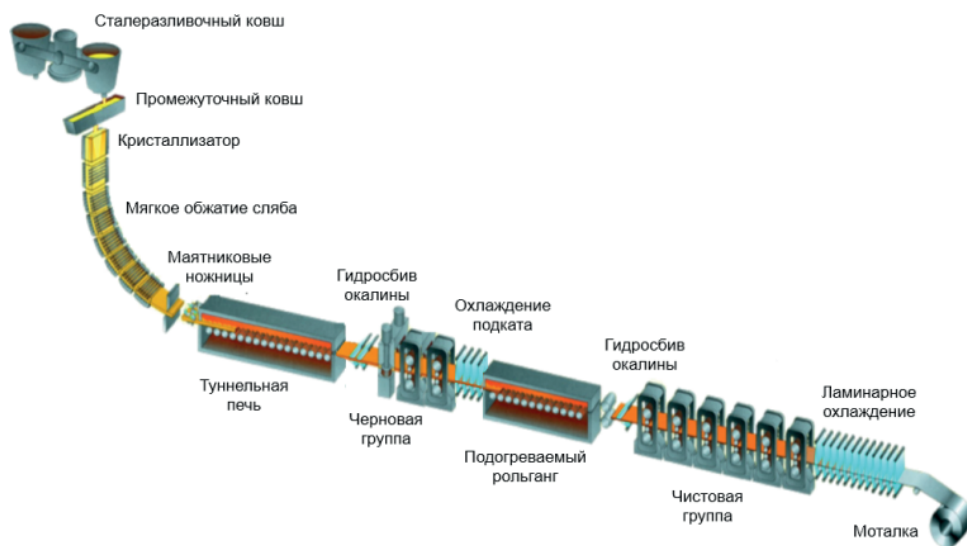
[soldatov\\_ea@vsw.ru](mailto:soldatov_ea@vsw.ru)

*Рассмотрены особенности оборудования литейно-прокатного комплекса, концепции легирования стали и технологических режимов прокатки и ускоренного охлаждения. Показано, что при разработке технологии значительное внимание уделяется предварительным лабораторным исследованиям, что позволяет сократить затраты на освоение. Разработанная технология обеспечивает получение класса прочности до К60 с дополнительными требованиями по вязким свойствам стали.*



**Ключевые слова:** литейно-прокатный комплекс, рулонный прокат, контролируемая прокатка, микролегирование.

Литейно-прокатный комплекс (ЛПК) филиала АО «ОМК-Сталь» в г. Выкса Нижегородской области — один из самых современных металлургических предприятий в России. В его основе лежит технология производства горячекатанной полосы путем совмещения непрерывного литья тонких слябов и прокатки (CSP). Такая технология применяется преимущественно для производства продукции простого сортамента конструкционного назначения, однако целью создания ЛПК было обеспечение трубного производства АО «Выксунский металлургический завод» высококачественным прокатом трубных марок стали, в том числе и высокопрочного микролегированного проката [1]. Схема расположения литейно-прокатного оборудования приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема расположения оборудования ЛПК «ОМК-Сталь»

Отличительными особенностями непрерывной разливки слябов на ЛПК «ОМК-Сталь» от большинства подобных комплексов является динамическое мягкое обжатие заготовки с редуцированием толщины сляба с 112,5 мм на выходе из кристаллизатора до 90,5 мм на выходе из опорной зоны, а компоновки прокатного оборудования — наличие черновой группы из двух клетей кварто, установки интенсивного охлаждения подката на промежуточном рольганге, подогреваемого рольганга перед чистовой группой клетей. Грамотное использование перечисленных особенностей позволяет управлять структурой стали для получения требуемых механических свойств.

Основа концепции легирования стали — низкое содержание углерода (обычно не более 0,07 %), твердорастворное упрочнение марганцем и кремнием [2], оптимальное микролегирование с учетом технологической схемы литейно-прокатного комплекса без применения дорогостоящих легирующих элементов. Композиция легирования каждой отдельной позиции сортамента определяется целевыми механическими свойствами и структурой проката и взаимосвязана с режимами прокатки и

ускоренного охлаждения после завершения чистой прокатки. При этом концепция микролегирования отличается вследствие технологической схемы (горячей посад) и имеет свои особенности по сравнению с классической контролируемой прокаткой. Ставшая традиционной в условиях литейно-прокатного комплекса схема микролегирования включает в себя добавление только ниобия. Требуемое содержание марганца и ниобия в стали в зависимости от класса прочности представлено на рис. 2.

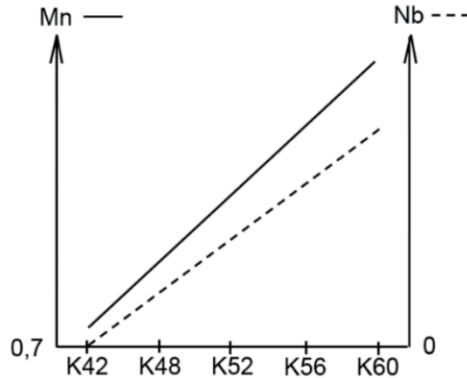


Рис. 2. Композиции легирования в зависимости от класса прочности

В зависимости от дополнительных требований к рулонному прокату и трубам используются и другие варианты микролегирования, например, замена части марганца на ниобий, добавление титана. Высокое содержание ниобия позволяет снизить чувствительность механических свойств к режимам чистой прокатки [3]. Добавление титана повышает ударную вязкость и долю вязкой составляющей при ИПГ при низких температурах, но при этом снижает прочность стали.

Главной проблемой при производстве высокопрочных микролегированных марок сталей методом прямой прокатки является отсутствие повторного нагрева сляба, т.е. наличие крупного первичного зерна аустенита перед началом прокатки, что затрудняет рекристаллизацию и измельчение зерна. При условии исходной крупнозернистой стали наличие микролегирующих элементов способствует сдерживанию рекристаллизации и формированию структурной неоднородности из-за сдерживания границ частицами карбонитридных фаз микролегирующих элементов.

В результате замедления процесса рекристаллизации крупные зерна сохраняются в раскате после деформации, как в черновой, так и в чистой группе клетей, что может приводить к формированию микроструктурной неоднородности по толщине проката, отрицательно влияющей на пластичность и вязкость металла (рис. 3).

Получение в данных условиях равномерного и мелкого аустенитного зерна после прокатки является сложной задачей. Для ее решения специалистами инженерно-технологического центра ОМК проведены комплексные исследования, как в лабораторных, так и в промышленных условиях. Оптимизация процессов структурообразования основана на расчетах в программном комплексе Termocalc, исследованиях рекристаллизации аустенита в условиях лабораторного комплекса Gleeble, специально

разработанных моделях рекристаллизации, исследованиях фазовых превращений, опытных прокатках на лабораторном стане ДУО-300 и экспериментах в промышленных условиях для проверки установленных закономерностей.

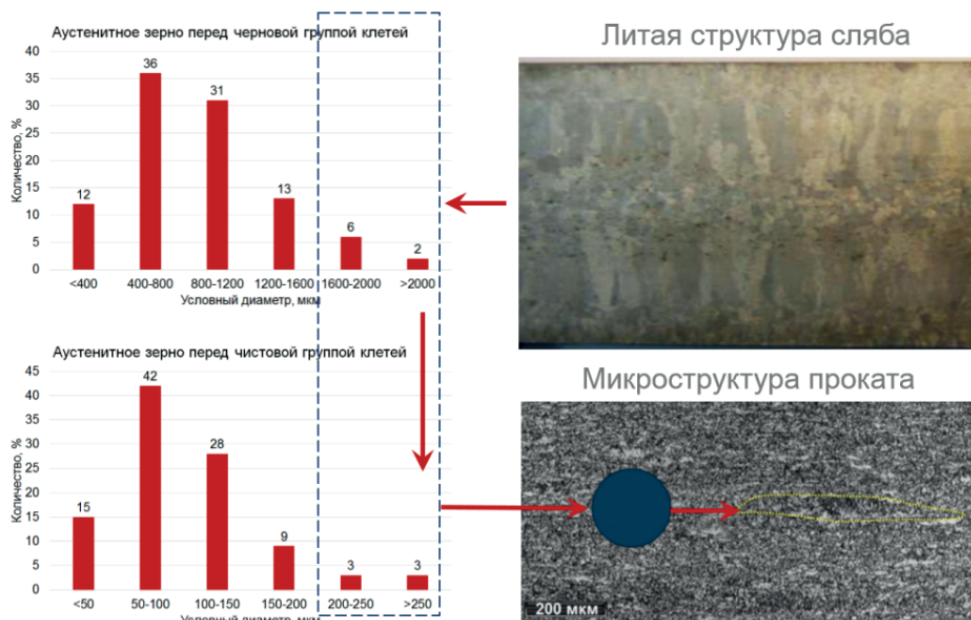


Рис. 3. Эволюция микроструктуры при прокатке на ЛПК

Значительный вклад в разработку режимов черновой и чистовой прокатки вносят модели статической и динамической рекристаллизации, разработанные на основе экспериментов, проведенных в условиях комплекса Gleeble 3800. Установлены критические значения единичных деформаций, приводящие к формированию неравномерного аустенитного зерна, а также рекомендованные значения для его измельчения. Использование модели статической рекристаллизации позволяет определить максимально допустимую температуру начала чистовой прокатки ниже температуры остановки рекристаллизации или определить оптимальные деформации в первых клетях чистовой группы для дополнительной рекристаллизации и измельчения зерна.

На деформационном dilatометре в условиях центра исследовательских лабораторий АО «ВМЗ» исследованы фазовые превращения и построены термокинетические диаграммы (ТКД), на основе которых был оптимизирован состав сталей для различных классов прочности, температуры окончания чистовой прокатки и режимы охлаждения на отводящем рольганге стана 1950 (рис. 4). Для достижения более высоких скоростей охлаждения используются решения с акцентом на первые или последние секции ламинарного охлаждения. Высокие скорости охлаждения применяются на классах прочности К56-К60 для формирования бейнита.

Для изучения влияния температурно-деформационных параметров на формирование микроструктуры и механических свойств исследуемых сталей в лабораторных условиях на этапе разработки технологии проводятся опытные прокатки образцов на лабораторном прокатном стане ДУО-300, расположенном в ЦНИИчер-

мет им. И.П. Бардина. Использование полного комплекса предварительных исследований позволяет сократить до минимума количество необходимых опытных прокаток в промышленных условиях и соответственно значительно снизить затраты на освоение новых видов продукции, в том числе хладостойкого рулонного проката для электросварных труб.

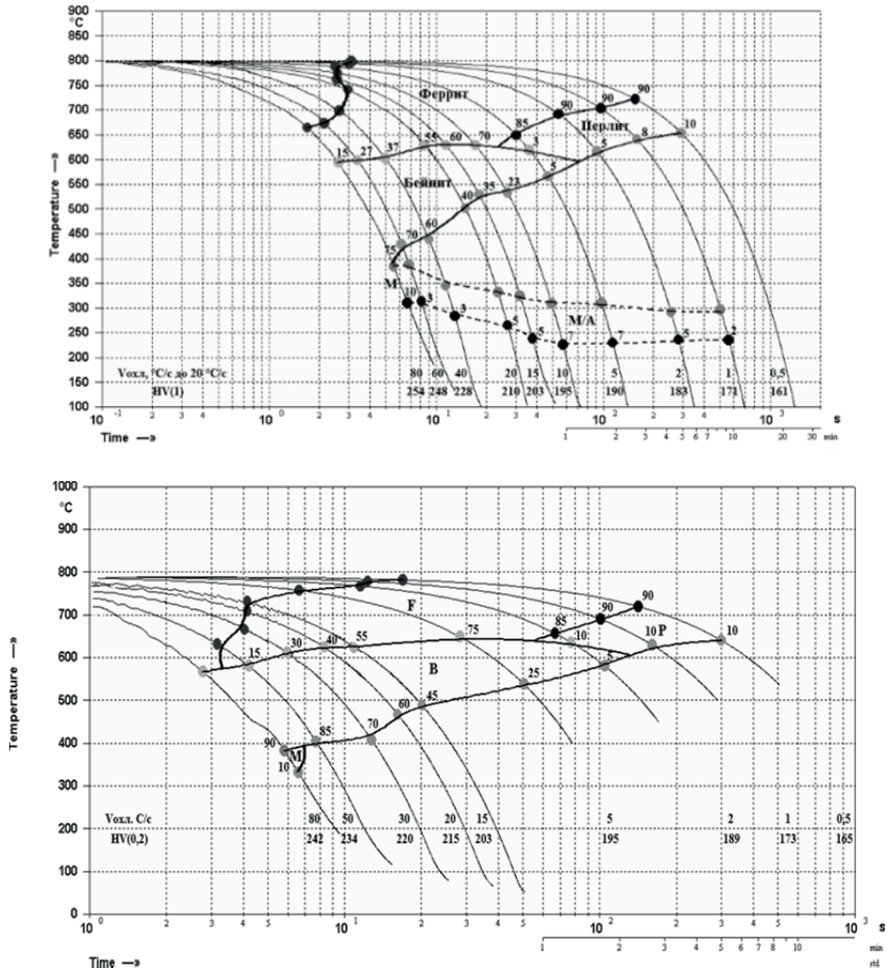
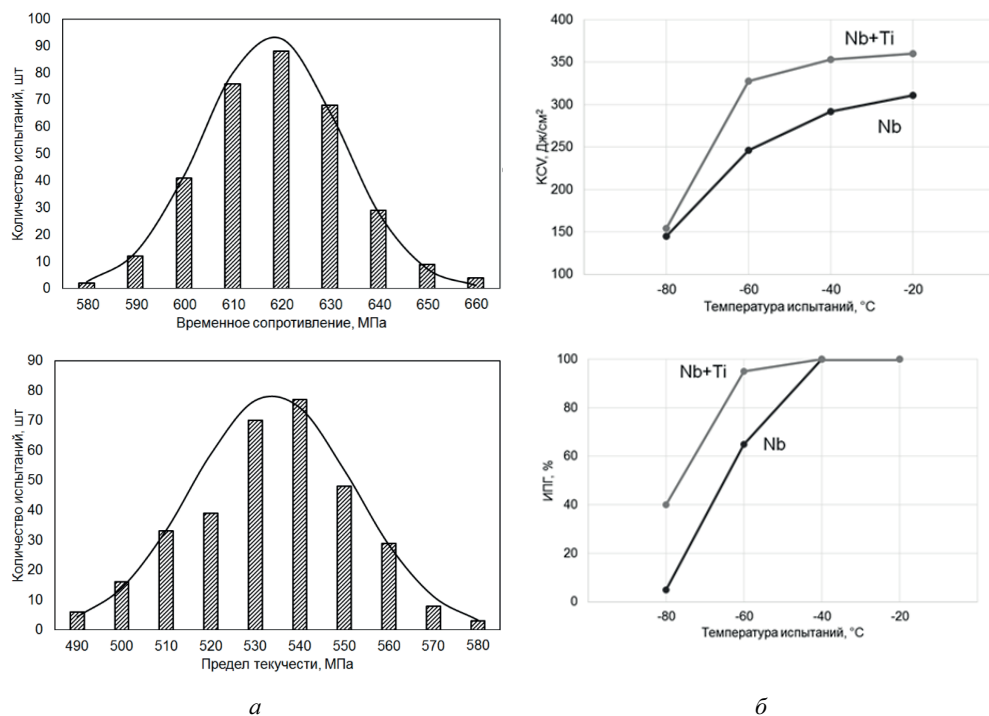


Рис 4. Термокинетические диаграммы сталей ЛПК

Целевая микроструктура готового проката сильно варьируется в зависимости от требуемого класса прочности. Для невысоких классов прочности K42-K48 микроструктура представляет собой смесь феррита и перлита. Для класса точности K52 в структуре формируется небольшая доля квазиполигонального феррита, а для получения K56-K60 требуется дальнейшее измельчение зерна и формирование бейнитной составляющей.

Комплекс мер по оптимизации режимов контролируемой прокатки позволяет достигать требуемого уровня прочностных свойств сталей классов прочности до K60

с гарантией вязких свойств до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  при микролегировании ниобием и до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  при дополнительном микролегировании титаном (рис. 5).



**Рис. 5.** Механические свойства на растяжение (а) и сравнение хладостойкости стали К60 с разными системами микролегирования (б)

В условиях уникального для России ЛПК разработана и освоена технология производства хладостойкого проката трубного назначения толщиной до 12,7 мм. Внедренные технологии позволяют достигать в прокате класса прочности до К60 гарантированного уровня ударной вязкости и доли вязкой составляющей при ИПТ при температуре до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Производство сталей с требованием по ударной вязкости при низких температурах составляет около 350 000 т в год, что является уникальным показателем для подобных комплексов в мире. Трубы, произведенные из рулонного проката ЛПК, использованы при строительстве таких крупных трубопроводов как БТС, ВСТО, других проектов ОАО «Газпром».

### Литература

- [1] Ламухин А.М., Дубинин И.В. Пуск литейно-прокатного комплекса и освоение производства высококачественного проката для электросварных труб. *Металлург*, 2010, № 1, с. 38–44.
- [2] Столхейм Д.Д. Современные схемы легирования и практика производства высокопрочных сталей для магистральных нефтегазопроводов. Ч. 1. *Металлург*, 2013, № 11, с. 53–67.
- [3] Эфрон Л.И. *Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали*. Москва, Металлургия, 2012. 696 с.

УДК 681.142

### **Fab lab технология прототипирования изделий электронной техники с использованием фотолитографии**

© Евдокимов Георгий Михайлович, Аваева Лина Григорьевна,  
Ревзин Григорий Григорьевич, Тетеревятников Андрей Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[georgeevd@yandex.ru](mailto:georgeevd@yandex.ru)

*Приведена классификация лабораторных методов производства печатных плат и проведен их анализ. Описан разработанный технологический цикл производства печатных плат. Изложен накопленный авторским коллективом опыт использования сухого пленочного фоторезиста при изготовлении печатных плат без металлизации переходных отверстий в условиях лаборатории. Даны рекомендации по использованию описанной технологии в fab lab (производственная лаборатория).*

**Ключевые слова:** фотолитография, быстрое прототипирование, аддитивные технологии, печатные платы, сухой пленочный фоторезист.

Первая сеть проектных лабораторий (fab lab) запущена в 1998 году в Массачусетском технологическом институте как лаборатория для создания единичных высокотехнологичных устройств в учебных целях. На сегодняшний день fab lab функционируют по всему миру и ориентированы не только на студентов, но и на любых творческих людей. Сеть лабораторий поддерживает политику свободного использования современного оборудования для самостоятельного создания какого-либо устройства. Кроме современных 3D-принтеров и фрезерных станков, fab lab оснащены рабочими местами для монтажа устройств, измерительными приборами для их наладки и отладки, а также имеют компонентную базу для прототипирования устройств любой сложности [1].

Технология печатных плат — одна из основ современного производства электронной аппаратуры (ЭА) и ее узлов. В серийном производстве отлажены методы, которые позволяют производить печатные платы высокой точности с металлизированными переходными отверстиями, в том числе многослойные. Устройства, исполь-

зующие передовые HDI-платы выпускаются миллионными тиражами (например смартфон Samsung Galaxy Note произведен в количестве около 10 млн шт.). Однако штучное изготовление даже самых простых печатных плат в заводских условиях является весьма дорогостоящим. Существует целый ряд задач, требующих изготовления уникальных печатных плат, например:

- 1) изготовление оснастки для тестирования электронных компонентов, узлов изготавливаемой ЭА, особенно при мелкосерийном и опытном производстве;
- 2) макетирование и прототипирование ЭА и ее узлов на различных этапах проектирования;
- 3) изготовление плат в радиокружках, высших учебных заведениях в учебных, научно-исследовательских и других целях;
- 4) изготовление штучной неотчетливой аппаратуры по заказам частного или непрофильного подрядчика, не имеющего собственного производства печатных плат (ПП);
- 5) изготовление узлов ЭА при ремонте в ситуациях, когда замена на штатные узлы заводского производства затруднена или невозможна [2].

В вышеперечисленных ситуациях решением могут стать различные технологии изготовления ПП, используемых в «кустарных» и лабораторных условиях. Мы приняли участие в организации fab lab на базе кафедры ИУ4 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приоритетная задача, на которую ориентирована лаборатория — реализация этапов сквозного проектирования электронных модулей, мехатронных и роботизированных систем, систем комплексной автоматизации и т. д., для которых требуется изготовление функционирующих прототипов и стендов электрического и функционального контроля. Технология печатных плат является одной из ключевых технологий, необходимых для решения поставленных задач.

С учетом вышеизложенного можно сформулировать основные цели и задачи исследований:

- анализ существующих методов производства печатных плат для быстрого прототипирования узлов ЭА и электронных модулей;
- анализ проблем использования фотолитографии в малооборудованной лаборатории и путей их решения;
- анализ накопленного опыта использования фотолитографии для решения задач быстрого прототипирования авторским коллективом.

В данной статье изложен опыт использования фотолитографии с применением сухого пленочного фоторезиста (СПФ) для прототипирования и штучного изготовления печатных плат для электронных модулей, накопленный для использования в fab lab кафедры ИУ4 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Данный опыт применим для любых лабораторий цифрового инструментального производства при решении вышеуказанных задач [3].

#### **Анализ методов прототипирования печатных плат в лабораторных условиях.**

Во времена появления отрасли производства электронной аппаратуры, а также в настоящее время в радиолюбительской сфере получил распространение метод навесного монтажа компонентов. При использовании этого метода сами компоненты и их выводы являются элементами несущей конструкции ЭА вкупе с различными конструктивными элементами, поддерживающими компоненты на своих местах в пространстве, и проводами для соединения удаленных друг от друга компонентов.

Наиболее нетребовательными к технологическим ресурсам методами изготовления проводящего рисунка на фольгированном диэлектрике являются методы нанесе-

ния маски перманентным маркером вручную с дальнейшим травлением и удалением фольги с пробельных мест вручную при помощи режущего инструмента (рис. 1). Маскирование перманентным маркером проводится после предварительного сверления отверстий для выводных компонентов.

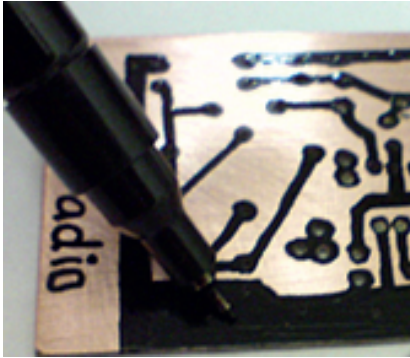


Рис. 1. Маска, нанесенная перманентным маркером

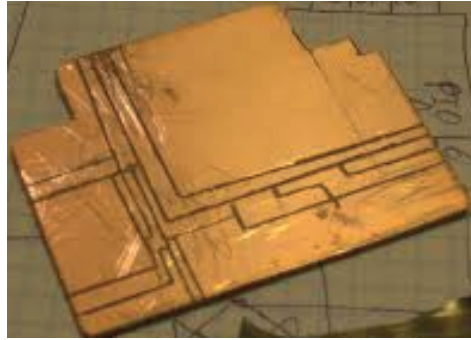


Рис. 2. Плата, изготовленная методом фрезерования

На рис. 2 представлена плата, на которой проводящий рисунок представляет собой области фольги, отделенные друг от друга фрезерованием.

Вышеперечисленные методы находят свое применение также и в комбинации с иными методами, например, при помощи перманентного маркера корректируются дефекты маскирования иными методами при производстве плат в «кустарных» и лабораторных условиях, что в частности используется и нами. Удаление фольги с пробельных мест при помощи скальпеля используется в серийном производстве для корректировки дефектов, например на предприятии ЗАО «ЦПТА» оператор установки оптического контроля качества проводящего рисунка удаляет излишки фольги, в случае ее недотрава с пробельного места [4–6].

Также существует технология фрезерования на станке с ЧПУ пробельных мест на фольгированном диэлектрике для получения проводящего рисунка. Значительное преимущество данного метода — получение печатной платы из заготовки происходит в один этап, идущий без участия оператора, если не требуется замена инструмента вручную. Оператору нужно только установить заготовку предусмотренным способом в рабочую область станка и запустить программу фрезерования, данное преимущество при штучном производстве компенсирует даже длительное время, которое уходит на фрезерование плат с большим количеством пробельных мест и сложной конфигурацией рисунка. Также к преимуществам данной технологии можно отнести возможность включить в единственный технологический этап по получению проводящего рисунка и сверловку отверстий, в том числе сложной конфигурации. Кроме того, фрезерование снимает необходимость в подготовке поверхности, достаточно отсутствия на поверхности заготовки твердых загрязнителей и этикеток.

К недостаткам данного метода можно отнести чувствительность к толщине заготовки, невозможность использования метода для получения гибких плат и плат из тонкого фольгированного диэлектрика (толщиной диэлектрика менее 0,4 мм) из соображений того, что фреза должна удалить как слой фольги, так и часть слоя диэлектрика для того, чтобы гарантировать удаление фольги с пробельного места. Также недостатком



является дорогостоящим фрезерованием станка с ЧПУ, что делает данный метод нерентабельным, кроме случаев, когда лаборатория располагает соответствующим станком для иных задач.

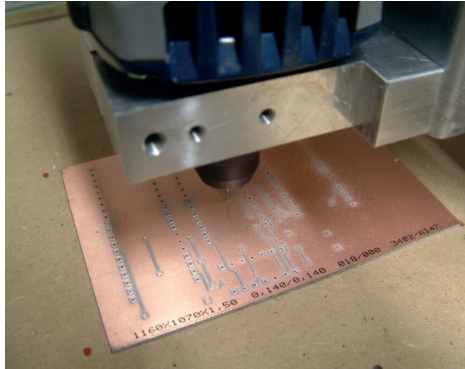


Рис. 3. Фрезерование печатной платы на станке с ЧПУ



Рис. 4. Градация качества получаемого рисунка в зависимости от метода

Абстрагируясь от времени, дороговизны и сложности технологий и руководствуясь критериями качества полученных ПП, вышеперечисленные методы можно условно распределить, как показано на рис. 4.

По результатам исследования можно рекомендовать методы ЛУТ и фотолитографии к использованию для быстрого прототипирования несложных печатных плат до четвертого класса точности в так называемых кустарных условиях.

### Литература

- [1] Гриднев В.Н., Гриднева Г.Н. *Проектирование коммутационных структур электронных средств*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 342 с. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств»: в 25 кн.; кн. 7).
- [2] Маркелов В.В., Кабаева А.С. *Управление качеством электронных средств*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 272 с. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств»: в 25 кн.; кн. 2).

- [3] Арабов Д.И., Лавин С.С., Иевский Д.С., Бабаджанян А.С. *Разработка концепт-дизайна модельного ряда «Навигатор» систем GPS/ГЛОНАСС/ГАЛИЛЕО*. Сб. трудов 9-ой международной конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы — 2007». Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 23–24 апреля 2007, с. 239–264.
- [4] Арабов Д.И., Малышев К.А. *Программно-аппаратный комплекс терморегулирования экструдера многофункционального фабрикатора*. Сб. трудов 15-й международной конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы — 2013». Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 24–25 апреля 2013, с. 301–305.
- [5] Арабов Д.И., Власов А.И., Гриднев В.Н., Зотьева Д.Е., Маркелов В.В. *FAB-LAB-технологии быстрого прототипирования изделий электронной техники. Современные научные исследования: методология, теория, практика: мат. II Меж. науч.-практ. конф.*, Нижний Новгород, ЦСРНИ, 2014, с. 162–179.
- [6] Курносенко А.Е., Соловьев В.А., Арабов Д.И. Программные модули для организации совместного проектирования электронной и механической составляющих изделия в САПР SOLID EDGE/NX. *Информационные технологии в проектировании и производстве*, 2014, № 3 (155), с. 85–89.

УДК 381.04

## Автоматизация формирования показателей для оценки технологичности изделий

© Адамова Арина Александровна<sup>1</sup>, Адамов Александр Петрович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Российская Федерация, Республика Дагестан, г. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет

[arina.adamova@rambler.ru](mailto:arina.adamova@rambler.ru)

*Исследована проблема автоматизации формирования показателей и оценки технологичности изделий электронной техники. Основное внимание уделено вопросам разработки информационного обеспечения автоматизированной системы сопровождения жизненного цикла изделий. Подробно рассмотрены этапы создания концептуальной инфологической модели с учетом потребностей пользователей (конструкторов и технологов). Исследованы принципы и методики формализации информации, запрашиваемой по каждой конкретной задаче в интерактивном режиме для количественной оценки технологичности.*

**Ключевые слова:** производственные системы, технологичность, изделия электронной техники.

Технологию реализации информационной среды, используемой для расчета уровня технологичности конкретных объектов проектирования, следует начинать с формальной постановки задачи, включающей в себя две взаимосвязанные подзадачи:

- создание блока отбора частных количественных показателей ТК изделий экспертным методом определения весов;

- создание блока расчета частных показателей, комплексного показателя технологичности и уровня технологичности изделия, т. е. отношения достигнутого значения технологичности к базовому, предопределенному нормативно-техническими документами или статистическими наблюдениями за аналогами.

**Методика проектирования информационного обеспечения.** Информационная модель системы автоматизации представляет собой идентифицированную совокупность взаимосвязанных сущностей, предназначенных для использования при решении следующих проектно-производственных задач [1]:

- отнесение изделия к определенному классу по признакам сходства;
- определение типа и технического уровня производства, где планируется серийный выпуск изделия [2];
- расчет частных показателей ТК изделия различных уровней разукрупнения;
- оценка комплексного показателя технологичности и сопоставления его с нормативным (базовым) значением;
- вывод о степени технологичности конструкции и выработка рекомендаций по дальнейшему повышению уровня технологичности промышленного изделия [3].

Обоснование выбора платформы следует начать с описания информационно-накопительного блока подсистемы. Информацию, используемую в подсистеме, можно разделить на следующие массивы [4–6].

1. Номенклатура показателей технологичности представляет собой множество основных и дополнительных показателей для количественной оценки технологичности. Основные показатели характеризуют важнейшие признаки разрабатываемой конструкции: трудоемкость, себестоимость, степень унификации и т. д.). Дополнительные характеризуют технологичность по какому-либо одному признаку (например, коэффициент освоения деталей, применения типовых технологических процессов и т. п.). Информация о показателях и их расчетных формулах извлекается из библиотек конструкторско-технологических подразделений предприятий, нормативно-технических и других методических документов, регламентирующих порядок оценки и обработки изделий на технологичность.

2. Тип анализируемых изделий и класс конструкций изделия являются одними из важнейших признаков классификации, влияющих на формируемый подсистемой набор показателей из рассмотренного ранее массива 1. Все оцениваемые на технологичность объекты, согласно нормативно-техническим документам, делятся на детали, сборочные единицы, изделия в целом. При этом различают следующие классы изделий: электронные, электромеханические, механические, радиотехнические, соединительные, коммутационные, распределительные, в зависимости от принципов их функционирования и заложенной в них элементной базы. От класса конструкций зависит не только набор показателей технологичности, но и их нормативные значения (в том числе и комплексного показателя).

3. Реально процессы обработки изделия на технологичность при проектировании начинаются со стадии эскизного проекта, продолжаются в ходе технического проекта и разработки рабочей документации. Последняя стадия разбита на три ответственные по насыщенности и эффективности процессов оценки ТК этапы: изготовление и испытание опытного образца, испытание установочной серии, установившееся серийное производство. Система показателей технологичности и нормативные значения комплексного показателя ТК напрямую зависит от стадии разработки документации на изделие.

4. Нормативные значения комплексного показателя ТК изделия представляют собой диапазоны числовых значений показателя, зависящие от комбинации структуры элементов массивов 1–3.

5. Конструкторские, технологические данные по изделию и предприятию могут быть получены из CAD/CAM-систем предприятия в электронном виде (тогда необходимо поддерживать связь с базами данных этих систем) либо представлены экспертам в виде твердых копий для подробного ознакомления с изделием перед его оценкой на ТК [7–9]. К конструкторским данным относятся чертежи, спецификации, перечни элементов, извещения на изменения и т. д., а к технологическим — топология, варианты маршрутных «расцеховок», библиотека нормализованных узлов, информация о техническом уровне и типе производства и т. д.

6. Накопительная информация о показателях технологичности оцениваемых изделий в виде массива данных позволяет проводить сравнительный анализ уровня технологичности изделия и методов ее обеспечения, т. е. увидеть динамику затрат всех видов в разрезе конкретных классов изделий.

**Решение проблемы достоверной оценки технологичности.** Таким образом, информационно-накопительный блок подсистемы должен состоять из баз данных и интерфейсных файлов. Он служит как для хранения входной информации, окончательных и промежуточных результатов, так и для поддержания связи между отдельными элементами внутри системы. Технология, инструментальные средства и информационное обеспечение создаваемой подсистемы количественной оценки ТК изделия должны обеспечивать поддержку и интеграцию деятельности не только программистов, но и конструкторов, технологов, экономистов, системотехников и методистов. Такой подход к решению проблемы достоверной оценки технологичности за счет интеграции знаний из объективных источников позволяет находить каждому специалисту оптимальное место в технологии создания информационного обеспечения автоматизированной подсистемы.

Отработка на технологичность конструкций изделий связана, как правило, с приведением расчетных работ по определению численных значений систем показателей и трудоемкой обработкой больших массивов информации. Особенно трудоемкой является оценка технологичности сложных изделий, обладающих значительным многообразием марок и сортов материалов, большим количеством типоразмеров составных частей конструкции, разнообразием других конструкторско-технологических решений. Для автоматизированного решения комплекса задач по отработке и оценке технологичности изделия необходимо было отказаться от узкого подхода автоматизации только расчетов численных значений системы показателей с выведением на их основе обобщенного показателя ТК. Перспективной оказалась комплексная автоматизация обеспечения производственной технологичности, когда автоматизированная подсистема встроена в интерпретированные CAD/CAE/CAM-системы инженерного анализа, конструкторского и технологического проектирования на предприятии и является составной частью комплексной системы обеспечения и управления качеством выпускаемых изделий. Автоматизированная подсистема имеет многомодульную структуру построения [7, 8].

Модуль ввода исходных данных предназначен для установки следующих начальных данных по оцениваемому объекту (детали, сборочной единице, изделию): наименования, вид объекта, класс объекта, стадия разработки, уровня значимости внутригруппового согласия экспертов, уровня доверительной вероятности  $P_0$ , набора показателей технологичности, ориентированных на данную конструкцию, первоначального списка экспертов. Доступ к модулю для записи, корректировки и удаления информации имеет только руководитель проекта через набор пароля в диалоговом окне. Модуль опроса экспертов осуществляет диалоговую процедуру опроса в режи-

ме парного сравнения количественных показателей ТК изделия по критерию информативности показателя. В конце процедуры данные сохраняются модулем в отдельных рабочих файлах базы данных.

Модуль статической обработки информации осуществляет обработку полученной от экспертов информации, которая заключается в вычислении суммарного числа предпочтений каждого показателя по каждому эксперту, определение среднего числа предпочтений. Для отсеечения недостоверных данных определяется коэффициент ранговой корреляции Спирмэна, вычисляется критерий Диксона, оценка согласованности мнений экспертов, значимость коэффициента конкордации по критерию Пирсона. Модуль строит результирующее ранжирование и гистограмму предпочтительности показателей, которая вместе с весовыми коэффициентами существенных показателей служит исходной информацией для модуля расчета показателей. Данные экспертов со значимыми оценками записываются модулем в стандартном формате в разделы библиотеки-архива. Определяются обобщенные ранжирования по группам экспертов, проверяется значимость согласия экспертов.

Программные средства автоматизированной подсистемы формирования показателей и оценки технологичности изделия позволяют предельно упростить операции обработки данных, а также создают предпосылки для его дальнейшего совершенствования. Развитие подсистемы возможно в направлении дополнения ее моделями, реализующими различные стандартные операции манипулирования данными, а также включения в нее средств, обеспечивающих создание и ведение информационной базы данных за продолжительный период времени. В свою очередь, анализ этой базы данных позволяет установить более обоснованные требования к составу работ по обеспечению технологичности изделий и видам ее оценки в динамике по стадиям проектирования и технологической подготовки производства. Это подтверждают и экспериментальные данные, полученные при апробировании подсистемы в условиях реального производства.

Таким образом, автоматизация процедур количественной оценки ТК промышленных изделий позволяет разработчикам принимать оптимальные решения при минимальных временных затратах с помощью новых подходов выбора системы показателей и методов их расчета, что делает возможным анализ проекта практически на любых стадиях его разработки, начиная с наиболее ранних.

### Литература

- [1] Адамова А.А., Адамов А.П., Ирзаев Г.Х. *Методологические основы обеспечения технологичности электронных средств*. Санкт-Петербург, Политехника, 2008.
- [2] Гриднев В.Н., Гриднева Г.Н. *Проектирование коммутационных структур электронных средств*: учеб. пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 342 с. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств»: в 25 кн.; кн. 7).
- [3] Маркелов В.В., Кабаева А.С. *Управление качеством электронных средств*: учеб. пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 272 с. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств»: в 25 кн.; кн. 2).
- [4] Адамова А.А., Власов А.И. Визуальное моделирование адаптации подготовки производства к выпуску новой продукции. *Информационные технологии в промышленности и производстве*, 2014, № 2, с. 46–56.
- [5] Ирзаев Г.Х., Адамова А.А. Автоматизация процесса формирования системы показателей для оценки технологичности конструкции изделия. *Автоматизация и современные технологии*, 2014, № 11, с. 27–33.

- [6] Адамова А.А., Адамов А.П. Многоуровневая модель формирования технологичности электронных средств на этапах проектирования и производства. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 11 (23), с. 12.
- [7] Власов А.И., Лыткин С.Л., Яковлев В.Л. *Краткое практическое руководство разработчика по языку PL/SQL*. Библиотека журнала «Информационные технологии», 2000.
- [8] Власов А.И., Михненко А.Е. Информационно-управляющие системы для производителей электроники. *Производство электроники*, 2006, № 3, с. 15–21.
- [9] Власов А.И., Михненко А.Е. Принципы построения и развертывания информационной системы предприятия электронной отрасли. *Производство электроники*, 2006, № 4, с. 5–12.

УДК 681.142

## Линейные модели распознавания в системах машинного зрения

© Алексеев Михаил Алексеевич, Арабов Далер Искандарович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[daler.ai@gmail.com](mailto:daler.ai@gmail.com)

*Рассмотрены особенности обработки данных машинного зрения в процессе фрезерования. Предложена методика обработки сканграфа профиля с высокой скоростью обработки и кратко проанализированы алгоритмы векторного квантования, лежащие в ее основе. Проанализирован алгоритм нахождения нулевой точки на заготовке в процессе фрезерования без участия оператора, с помощью системы машинного зрения. Проведен анализ различных методов получения нулевой точки, показаны результаты использования различных алгоритмов. Даны рекомендации по использованию рассмотренных методов. В заключении даны рекомендации по проведению фрезерования с визуальным контролем в реальном времени.*

**Ключевые слова:** линейные алгоритмы обработки изображений, фрезерование, машинное зрение.

В настоящее время в электронной промышленности на этапе онлайн-контроля для управления технологическими режимами часто применяют автоматическое оборудование — АТЕ (automatic test equipment, оборудование для автоматического тестирования). Типичное АТЕ-устройство является автоматическим диагностическим устройством, которое позволяет проводить быстрое и качественное тестирование [1]. Обычно оно представляет собой аппаратно-программный комплекс: аппаратная составляющая ответственна за сбор данных с устройства, подлежащего тестированию (устройство, подлежащее тестированию, обычно называют сокращенно UUT — unit under test), а программный модуль ответственен за обработку полученных данных и составление заключения о состоянии UUT. Аппаратный модуль может получать с UUT данные различного физического происхождения: электрического, теплового и др. полей (например, данные о напряжении или токе, картину распределения тепло-

вых полей, картину видимого излучения и др.). Программный модуль обычно осуществляет обработку полученных данных с помощью технологий искусственного интеллекта, использования статистики или того и другого и на основании обработки выдает заключение о работоспособности UUT с указанием критических мест на UUT. В системах класса АТЕ программное обеспечение играет очень важную роль, и во многих случаях для крупных производителей оно разрабатывается отдельно под каждое конкретное применение с учетом специфики продукции. В качестве примера можно привести воздушные войска США, которые имеют ряд комплексов АТЕ со сложной структурой и сложным программным обеспечением, применяющиеся для автоматического тестирования электронных модулей в авионике [2, 3].

Для контроля в реальном времени за формированием поверхностей деталей при 3D-фрезеровании также может с успехом применяться система класса АТЕ. В этом случае в аппаратную часть будет входить устройство технического зрения, а также компьютер или управляющий микроконтроллер [4–8].

Основной проблемой для производственных систем является проблема скорости обработки видеоряда и принятия решений по результатам контроля в автоматическом режиме [9–13]. Такие системы встроенные в технологическую линию должны быстро и четко проводить оценку сканграфа движения инструмента и формируемого профиля. Программный модуль такого комплекса будет получать в качестве входных данных *видеопоток с системы технического зрения*, проводить их обработку и выдавать заключение о правильности движения инструмента и параметрах формируемого профиля.

Среди систем класса АТЕ широко распространен подход на основе искусственных нейронных сетей, который позволяет исключить участие оператора на этапе обработки видеопотока [4, 5].

**Постановка задачи распознавания видеопотока.** Одним из важных моментов процессов фрезерования является установка нулевой точки. При использовании фрезерных станков низкого ценового диапазона, а также самодельных станков выставление нулевой точки на заготовке обычно осуществляет оператор. Данная особенность использования фрезерных станков вносит определенные неудобства при использовании станка, а также является достаточно неточной, таким образом, при использовании небольших заготовок возможна ситуация, когда изготавливаемая модель может не уместиться на заготовке.

Для автоматизации процесса определения нулевой точки имеет смысл использовать автоматизированную систему, которая позволит найти заготовку в рабочей зоне станка и определить координаты, куда надо передвинуть фрезу. Такая система заменит человека в качестве наблюдателя и сможет выполнять поставленную задачу значительно быстрее оператора [1].

Будем считать, что рабочая зона станка в начальный момент является однородной по цвету и чистой. Работа в основном происходит с черно-белыми изображениями, так как цветные изображения обладают высокой степенью инвариантности. Однако в особых случаях их применение имеет место. Обработка изображений велась с помощью библиотеки OpenCV.

Предварительная обработка изображений заключается в его фильтрации различными фильтрами:

- 1) 2D-фильтр [2];
- 2) гауссов фильтр [1];
- 3) медианный фильтр [1].

2D-фильтр представляет собой свертку изображения с ядром

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Данный фильтр делает изображение более четким, что позволяет лучше выделить края заготовки.

Гауссов фильтр представляет собой свертку изображения с двумерной гауссианой. Данная фильтрация позволяет в значительной степени избавиться от шума, вызванного особенностями текстуры, но, к сожалению, при этом скругляются углы и объекты начинают «расплываться», что является определенным недостатком, так как уменьшает точность нахождения нулевой точки.

Медианный фильтр представляет собой алгоритм, по которому каждому пикселю присваивается среднее значение яркости, выбранное из набора пикселей, входящих в определенную окрестность данного пикселя. Данный фильтр позволяет избавиться от шумов типа «соль и перец».

Опытным путем определена последовательность использования данных фильтров: сначала осуществляется 2D-фильтрация, далее — медианная, и под конец происходит фильтрация гауссовым фильтром.

**Методика выделения заготовки в рабочей зоне станка.** После предварительной фильтрации изображения необходимо выделить заготовку на фоне рабочей зоны станка. Первым методом осуществления этого является бинаризация с определенным порогом (рис. 1).



Рис. 1. Изображение до и после бинаризации

Далее, осуществляется разметка связанных областей или просто поиск массива черных точек в рабочей зоне и определение необходимой нулевой точки — точки в угле заготовки находящейся на определенном расстоянии от ближайших краев. Основной проблемой данного метода является выбор порога бинаризации и критерий, показывающий, что выбранный порог является наилучшим. Данный метод применим только в случаях, когда цвет заготовки сильно отличается от цвета заднего фона, также необходимо хорошее освещение.



Таким образом, если использовать бинаризацию для выделения заготовки в рабочей зоне станка, то необходимо удостовериться, что условия освещения позволяют осуществить работу алгоритмов. Данное ограничение значительно уменьшает применимость бинаризации в качестве метода обнаружения заготовки.

По-другому определить заготовку можно выделив ее края до исходной картинки. Выделение краев осуществляется с помощью одного из самых лучших методов — детектора краев Канни [1]. Данный детектор работает с черно-белым изображением, получая в результате бинарное изображение, содержащее все выделенные края. Объяснение принципов работы данного детектора не входит в наши задачи, но необходимо заметить, что так как данный детектор основан на анализе градиентов яркости пикселей, то для его работы ему необходимо определить значения верхнего и нижнего предела значения градиентов. Определение пределов значения градиентов можно произвести вручную, но тогда для каждого вида материала заготовки необходимо будет заново определять эти пределы. Для автоматизации этого процесса можно ввести критерий замкнутости контура заготовки. Тогда, начиная с максимальных значений, можно итерационно уменьшать размеры пределов до тех пор, пока не будет найден замкнутый контур в рабочей зоне станка.

В данной работе был произведен обзор и сравнение различных способов нахождения заготовки в рабочей зоне станка для последующей установки нулевой точки. Было показано, что наиболее простым методом является бинаризация изображения, однако данный метод довольно требователен к условиям освещения. Другой метод — нахождение краев заготовки является более удобным, так как обладает конкретным критерием правильности подбора параметров — замкнутость контура заготовки. Показано, что метод выделения заготовки по цвету имеет крайне узкий диапазон применимости. Обработка изображений велась с помощью библиотеки OpenCV на языке C++.

Таким образом, применяя предложенные методы можно решить задачу автоматического нахождения нулевой точки на заготовке с довольно высокой степенью надежности, особенно при применении детектора краев.

## Литература

- [1] Шапиро Л., Стокман Дж. *Компьютерное зрение*. пер. с англ. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006, 752 с.
- [2] Fishbune R. J. *Infrared Thermography for Electronic Assembly Design Verification*. IBM Power Technology and Qualification, 2000, 7 p.
- [3] Pacheco M., Wang Z., Skoglund L. et al. Advanced Fault Isolation and Failure Analysis Techniques for Future Package Technologies. *Intel Technology Journal*, vol. 09, Issue 4, pp. 337–352, November 9, 2005.
- [4] Бухалто А.Н., Бурый Е.В., Власов А.И. и др. *Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений*. Кн 7, под общ. ред. Ю.В. Гуляева и А.И. Галушкина, Москва, Радиотехника, 2003, 192 с. (Нейрокомпьютеры и их применение).
- [5] Медведев В.С., Потемкин В.Г. *Нейронные сети. MATLAB 6*. под общ. ред. В.Г. Потемкина. Москва, ДИАЛОГ-МИФИ, 2002, 496 с.
- [6] Conway J. H., Sloane N. J. A. *Fast Quantizing and decoding algorithm for lattice quantizers and coders*. IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-28, no. 2, pp. 227–232, Mar. 1982.
- [7] Ramamurthi V., Gersgo A. *Classified vector quantization of images*. IEEE Trans. Commun. COM-34, 1986, pp. 1105–1115,
- [8] Клюев В.В., ред. *Неразрушающий контроль. В 7 т. Т. 5: Тепловой контроль*. Москва, Машиностроение, 2004, 688 с.

- [9] Госсорг Ж. *Инфракрасная термография. Основы, техника, применение*. Москва, Мир, 1988, 399 с.
- [10] Брамсон М.А. *Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел*. Москва, Наука, 1965, 223 с.
- [11] Панфилова С.П., Власов А.И., Гриднев В.Н., Червинский А.С. *Бесконтактный тепловой контроль электронно-вычислительных средств*. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2007, № 6, с. 1–9.
- [12] Власов А.И., Гриднев В.Н., Константинов П., Юдин А.В. *Нейросетевые методы дефектоскопии печатных плат*. Электронные компоненты, 2004, № 8, с. 148–155.
- [13] Буянов А.И., Власов А.И., Загоскин А.В. *Применение нейросетевых методов при дефектоскопии печатных плат*. Нейрокомпьютеры и их применение, 2002, № 5, с. 42–70.

УДК 621.793.182

## **Монтаж и запуск жидкофазного магнетрона НМСА-52 на установке МВТУ-11-1**

**© Бабурин Александр Сергеевич, Макарова Мария Владимировна,  
Мартыненко Максим Алексеевич, Моисеев Константин Михайлович**

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[kirishkaketli@mail.ru](mailto:kirishkaketli@mail.ru), [turist5695@mail.ru](mailto:turist5695@mail.ru)

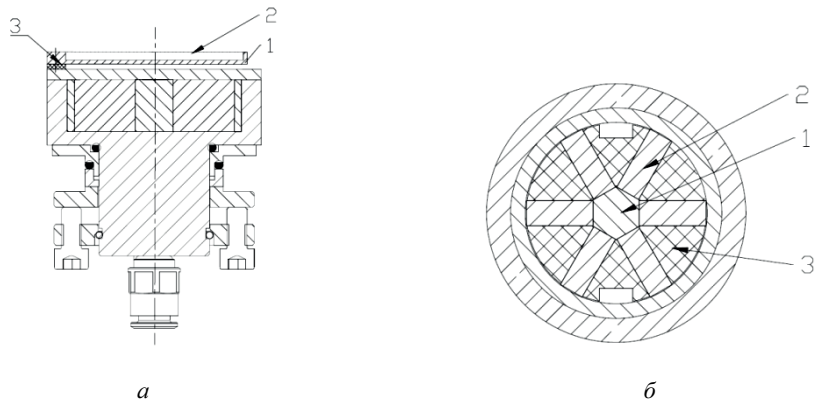
*Смоделирована магнитная система жидкофазного магнетрона. Приведено сравнение двух вариантов магнитной системы. Проведен ряд экспериментов по запуску магнетрона НМСА-52, смонтированного и запущенного на установке МВТУ-11-1, с различными вариациями мишени и разными условиями горения разряда. Определены лучшие режимы работы при запуске с тиглем и мишенью для жидкофазного расплынения для новой магнитной системы.*

**Ключевые слова:** жидкофазный магнетрон, моделирование магнитного поля, магнитная система.

Один из методов нанесения тонких пленок — метод ионного распыления в магнетронных системах с жидкой мишенью. Этот метод отличается высокой скоростью осаждения, большой энергетической эффективностью, а также высокими показателями чистоты и адгезии. Скорость осаждения в данном случае складывается из двух факторов: испарение и распыление.

В статьях установлено, что для достижения стабильного режима работы магнетрона с жидкой мишенью необходимо использовать магниты с большей индукцией магнитного поля в магнитной системе.

Для реализации данного метода нанесения на вакуумной установке МВТУ-11-1 лабораторией кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ОАО «НИИТМ» разработан и изготовлен новый жидкофазный магнетрон НМСА-52 (рис. 1).

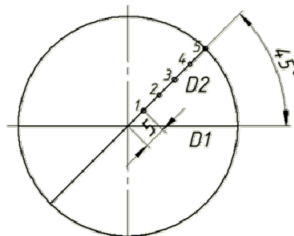


**Рис. 1.** Жидкофазный магнетрон НМСА-52:  
*а* — 1 — тигель; 2 — место под мишень; 3 — диэлектрические прокладки; *б* — 1 — магнетрон; 2 — магниты; 3 — изолятор

Целью данной работы являлся монтаж магнетрона и отработка режимов зажигания разряда и стабильной работы магнетрона.

В тигель, установленный на керамических подкладках, загружается мишень толщиной 3,75 мм. Магнетрон смонтирован на вакуумной установке МВТУ-11-1.

**Сравнительный анализ старой и новой системы.** Магнитное поле новой системы измерялось микротеслометром. Схема измерения магнитного поля представлена на рис. 2. Сравнительный анализ систем максимальной высоте представлен в табл. 1.



**Рис. 2.** Схема измерения магнитного поля

Таблица 1

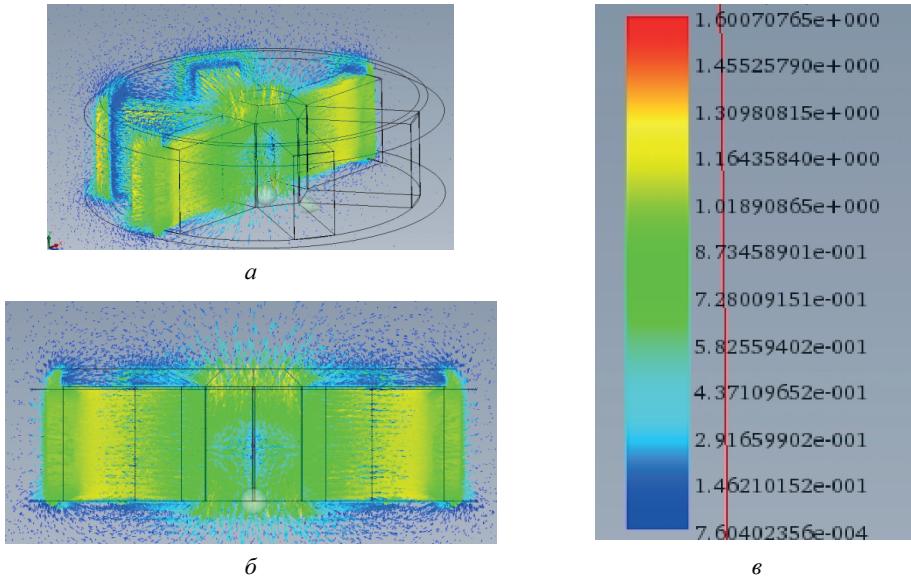
**Сравнительный анализ значения магнитной индукции на высоте  $h = 7,75$  мм**

Расстояние от центра	Среднее значение магнитного поля на различных расстояниях от центра		$S^2$		$S_{\text{нл}2}^2$	Сравнение, $t$	Критическое значение (0,01; 2)
	Новая система	Старая система	Новая система	Старая система			
0	4,5	11,0	0,5	2,0	1,3	4,30	9,92
5	32,5	37,5	24,5	12,5	18,5	0,27	
10	43,0	52,5	2,0	12,5	7,3	1,31	
15	39,5	47,5	4,5	12,5	8,5	0,94	
20	29,5	31,5	4,5	24,5	14,5	0,14	

Поскольку все значения  $t$ , рассчитанные при сравнении двух средних значений, меньше критического значения, то магнитные поля обеих систем на высоте  $h = 7,75$  мм сравнимы или одинаковы с уровнем значимости 0,01. Следовательно, магнитное поле магнитной системы не изменилось.

**Моделирование новой магнитной системы.** Модель магнитного поля новой магнитной системы представлена на рис. 3. Моделирование системы проводилось в программном комплексе SolidWorks.

Сравнение теоретических и практических значений представлено в табл. 2.



**Рис. 3.** Моделирование новой магнитной системы:  
*а, б* — вид магнитной системы с силовыми линиями; *в* — значения магнитной индукции, измеренные в Тл

Таблица 2

**Сравнение теоретических и практических значений индукции магнитного поля новой системы**

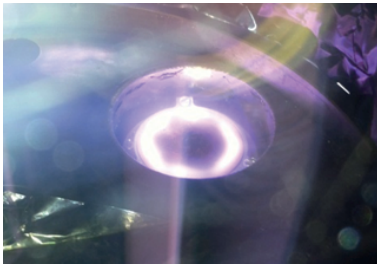
Расстояние от центра	Практические значения (средние), мТл	Расчетные значения, мТл
0	15,5	87
5	84,5	1000
10	120	43
15	108	14
20	51,5	1

Таким образом, индукция магнитов также не соответствует рассчитанному значению индукции.

**Практическая часть.** Проведен ряд экспериментов по запуску магнетрона с различными вариациями условий запуска. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Результаты первой серии экспериментов

Описание условий	Параметр	Результат
Тигель установлен через диэлектрические прокладки, установлена медная мишень толщиной 0,5 мм. Экран отсутствует. Источник ионов (ИИ) выключен	$p = 0,78$ Па; $U = 650$ В; Газ(Ar) = 1200 мВ	Легко зажегся, через 3...5 с стал ярко гореть. На режим не выходит
Конфигурация та же, ИИ включен	$p = 0,8$ Па; $U = 650$ В; Газ(Ar) = 1300 мВ	Зажегся. После выключения ИИ продолжил гореть. Горел до понижения напряжения до 450 В, после чего потух (рис. 4, а)
Конфигурация та же, ИИ включен. Мишень — медь толщиной 2,75 мм	$p = 0,89$ Па; $U = 650$ В; Газ(Ar) = 1300 мВ	Зажегся. После выключения ИИ продолжил гореть. Горел до понижения напряжения до 500 В
Тигель установлен через диэлектрические прокладки. Мишень — медь толщиной 0,5 мм. Экран отсутствует. ИИ выключен.	$p = 0,92$ Па; $U = 650$ В; Газ(Ar) = 1450 мВ	Зажегся, практически вышел на режим, расплавил часть мишени (рис. 4, б)
Тигель установлен через ситалловые прокладки толщиной 0,3 мм. Экран отсутствует. Мишень — медь толщиной 3,75 мм, ИИ выключен.	$I = 0,16$ А; $p = 1$ Па; Газ = 1499 мВ	Разряд легко зажегся. Работа стабильная. Мишень постепенно раскалялась. В жидкую фазу не перешла
Полная конфигурация. Диэлектрические прокладки, экран, Мишень — медь толщиной 3,75 мм	Параметры различные	Не зажегся



а



б

Рис. 4. Работа магнетрона при мишени толщиной 0,5 мм (а) и расплавленная мишень толщиной 0,5 мм (б)

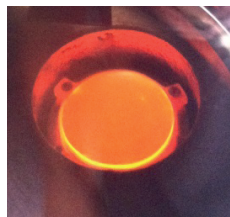


Рис. 5. Раскаленная мишень толщиной 3,75 мм при выключенном питании

Магнетрон НМСА-52 был смонтирован и запущен на МВТУ-11-1. В ходе проведения экспериментов получены определенные успехи в выведении магнетрона на жидкофазный режим. Была раскалена толстая мишень, чего не удалось сделать с магнетроном НМСА-50. Практическое значение индукции магнитного поля составило 84,5 мТл, расчетное — 1000 мТл в точке с максимальным расчетным значением магнитного поля.

Необходимо продолжить работы по выведению магнетрона на жидкофазный режим с помощью блока APEL-M-1,5PDC.

### Литература

- [1] Войнов Р.Ю., Третьяков Р.С., Талаева Ю.С. *Исследование энергопотребления диодных распылительных систем с твердым и жидким катодом*. Томск, Томский политехнический университет, 2009.
- [2] Макарова М.В., Бабурин А.С. *Измерение и моделирование магнитной системы жидкофазного магнетрона НМСА-50*. 2015.
- [3] Инструкция блока питания. URL: <http://apelvac.com/f/37/92/Manual%20APEL-M-3PDC.pdf> (дата обращения 14.06.2015).
- [4] Кузьмичев А.И. *Магнетронные распылительные системы*. Москва, Аверс, 2008.
- [5] Макарова М.В., Бабурин А.С. *Монтаж и запуск жидкофазного магнетрона НМСА-50. Всерос. науч.-техн. конф. «студенческая научная весна. Машиностроительные технологии»*. 7 апреля, 2015. Москва, 2015.

УДК 539.2:62-932

## Сравнение типов вращения подложки при нанесении покрытий методом магнетронного распыления

© Васильев Денис Дмитриевич, Малеванная Елизавета Ильинична,  
Моисеев Константин Михайлович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[d.d.vasiliev@ya.ru](mailto:d.d.vasiliev@ya.ru), [mei764@ya.ru](mailto:mei764@ya.ru)

*Рассмотрены наиболее часто использующиеся механизмы вращения подложек при нанесении тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления. Показано влияние типа движения на такой параметр пленок, как неравномерность. Приводится альтернативная конструкция механизма движения подложек, удовлетворяющая необходимым требованиям к таким механизмам. Проведен сравнительный анализ всех конструкций, выбран наиболее подходящий вариант для лабораторных условий.*

**Ключевые слова:** формирование покрытий, механизм движения, лабораторные условия, планетарное вращение, неравномерность, узел сложного движения подложек.

При отработке режимов формирования покрытий на лабораторных установках должны быть созданы условия для получения тонких пленок высокого качества. Для этого применяются различные типы движения подложек [1]. Существует много различных механизмов движения, однако ни один из них не является универсальным. Поэтому важной задачей является поиск оптимальной конструкции из существующих или создание новой, которая будет соответствовать предъявляемым требованиям по качеству покрытий и будет способна подстраиваться под различные условия в ходе решения каких-то других технологических вопросов.

Целью работы является проведение сравнения типов вращения подложкодержателя для выявления оптимального механизма, который обеспечит высокое качество покрытий в лабораторных условиях.

**Описание конструкций основных типов механизмов вращения.** Наиболее распространенным механизмом является механизм планетарного вращения подложек (рис. 1). Однако такой вариант будет непрактичным при расположении технологических источников не в одной плоскости.

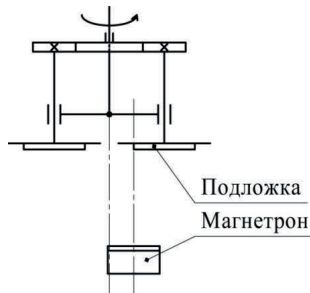


Рис. 1. Планетарное вращение подложек

Проблема формирования покрытий при наличии нескольких источников, расположенных не в одной плоскости, была решена разработкой планетарного механизма на установке МВУ ТМ Магна (НИИТМ) [2], схема которой представлена на рис. 2.

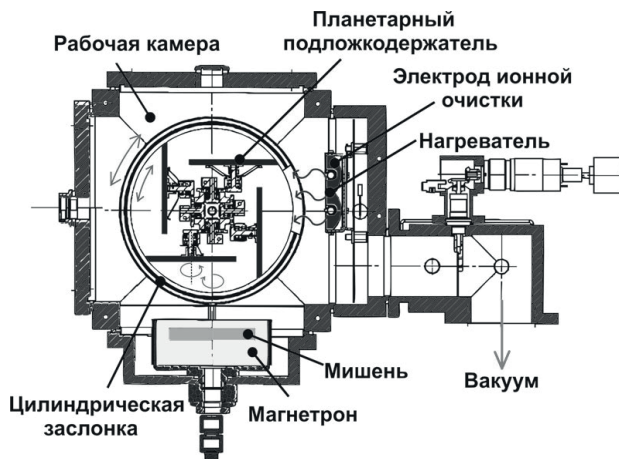


Рис. 2. Механизм планетарного вращения при радиальном расположении источников

Было проведено исследование [3], которое показало, что возможно создать более равномерные покрытия по сравнению с теми, что были получены на установках, где применялось планетарное движение подложкодержателя. Для этого необходимо заменить планетарный механизм на узел подложкодержателя, совершающий сложное движение (рис. 3). В связи с этим была разработана конструкция механизма вращения подложки для установки ВУП-11М [4]. Данный механизм совершает сложное движение: подложкодержатель поворачивает подложку относительно радиально расположенных источников, а та вращается вокруг своей оси. Совокупность этих движений, а также поворот подложкодержателя по определенному закону обеспечивают высокие требования к равномерности получаемых покрытий.

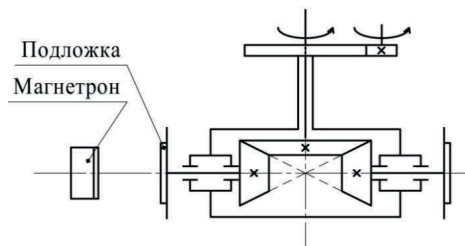


Рис. 3. Узел сложного движения подложкодержателя

**Сравнительный анализ.** Рассмотренные выше механизмы сравнивались по нескольким ключевым параметрам, данные представлены в таблице.

**Сравнительная характеристика рассмотренных механизмов**

Параметр	Планетарное вращение при расположении источников в одной плоскости	Планетарное вращение при радиальном расположении источников на установке	Узел сложного движения подложек
Количество одновременно обрабатываемых подложек	3	1	1
Количество обрабатываемых подложек за один вакуумный цикл	3	4	3
Неравномерность покрытия для квадратных подложек 100 мм, %	±2	±2	±2 / ±0,1
Скорость осаждения покрытия, относительно обычного планетарного вращения для заданной/получаемой неравномерности	1	1	1,33 / 0,72
Время проведения процессов нанесения покрытий при разных параметрах (15 подложек), ч	30	13,5	13,14
Время проведения процессов нанесения покрытий при отработанном режиме (10 подложек), ч	8	9,5	9,76



Параметр	Планетарное вращение при расположении источников в одной плоскости	Планетарное вращение при радиальном расположении источников на установке	Узел сложного движения подложек
Общее время проведения исследовательских работ, ч	38	23	22,9
Возможность работы на установке с источниками, расположенными не в одной плоскости	Нет	Да	Да
Возможность нанесения на каждую подложку покрытия при разных параметрах	Нет	Да	Да
Изменение геометрии нанесения покрытия	Нет	Нет	Да
Сложность расчетов параметров движения	Низкая	Низкая	Низкая / Высокая

Неравномерность покрытия рассчитывалась исходя из кинематики движения квадратных подложек размером 100 мм для каждого механизма. Полученные результаты совпали с паспортными данными на установки. Скорость осаждения покрытия также была рассчитана для каждого случая и оценена относительно скорости осаждения при планетарном вращении подложек. При расчете времени отработки технологии нанесения покрытий исходными данными являлись: скорость осаждения; количество подложек, обрабатываемых одновременно; количество подложек, обрабатываемых за один вакуумный цикл. Пятнадцать подложек при разных параметрах берется при условии использования центрального композиционного ортогонального плана эксперимента, 10 образцов — с отработанным режимом нанесения покрытия. Рассчитывается количество циклов, необходимое для получения всех покрытий; далее это количество умножается на 1,5 ч — приблизительное время запуска-остановки оборудования. Время суммируется.

Сравнение механизмов вращения подложек показало, что каждый механизм оказывается хорош для определенных условий, поэтому выбор определенного типа зависит от существующих ограничений, требований и задач. При нанесении покрытий при разных параметрах механизм планетарного вращении при радиальном расположении источников и узел сложного движения подложек показали почти одинаковое время, однако узел сложного движения является более универсальным: он легче подстраивается под размеры подложек, а также обеспечивает неравномерность покрытия до 0,1%. Таким образом, конструкция узла сложного движения подложек по результатам сравнительного анализа оказалась оптимальным вариантом механизма движения подложкодержателя для лабораторных условий.

### Литература

- [1] Панфилов Ю.В. *Расчет режимов процесса нанесения тонких пленок в вакууме и параметров оборудования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1988, 20 с.

- [2] Одинокое В.В., Павлов Г.Я. Новое технологическое оборудование для инновационных технологий микро-, нано- и радиоэлектроники. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2011, № 3, с. 41–43.
- [3] Васильев Д.Д., Моисеев К.М. Расчет сложного движения для повышения равномерности тонкопленочного покрытия. *7-я Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология»: материалы конференции*; Мин-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань, КНИТУ, 2015, с. 105–106.
- [4] Моисеев К.М. Многопозиционные вакуумные технологические установки. *Наноинженерия*, 2014, № 8, с. 18–22.

УДК 621.79.024.6

## **Исследование влияния различных растворов при жидкостной очистке на чистоту подложки и адгезионную прочность покрытий**

© Васильев Денис Дмитриевич, Макарова Юлия Сергеевна,  
Моисеев Константин Михайлович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[julchamak@gmail.com](mailto:julchamak@gmail.com), [d.d.vasiliev@bmtu.ru](mailto:d.d.vasiliev@bmtu.ru)

*Проведено исследование влияния изопропилового спирта и слабощелочного раствора А1 при жидкостной очистке на чистоту подложки и адгезионную прочность покрытий. Были проведены эксперименты по очистке подложек по технологиям со спиртом и с раствором А1. Проведен контроль чистоты и адгезии покрытий гониометром и адгезиметром соответственно, и на основе полученных результатов произведено сравнение технологий.*

**Ключевые слова:** жидкостная очистка, краевой угол смачивания, адгезионная прочность, гониометр, ультразвуковая ванна.

Чистота поверхности подложек играет огромную роль при изготовлении устройств микроэлектроники. Во время производственного процесса наличие на поверхности пластины разного рода загрязнений неизбежно, что препятствует получению высокой адгезионной прочности наносимого покрытия. Для выполнения качественной очистки подложек, как правило, используются ультразвуковые ванны (УЗВ).

Анализ литературных данных по жидкостной очистке, а также проведенные предварительные исследования [1] позволили сформировать порядок действий по очистке керамических и стеклянных подложек, подходящий для использования данной технологии в лабораторных условиях:

1) очистка в УЗВ при температуре 65...70 °С, 10 мин в 3%-ном слабощелочном растворе А1;

2) очистка в УЗВ при температуре 65...70 °С, 10 мин в изопропиловом спирте;

- 3) очистка в УЗВ при температуре 50...60 °С, 10 мин в дистиллированной воде;  
 4) промывка подложек под струей дистиллированной воды комнатной температуры.

Данная технология очистки показала высокие результаты по адгезии покрытий к стеклянным и керамическим подложкам никелевого покрытия [2], поэтому целью работы стало исследование влияния использования каждого компонента очистки: спирта и 3%-ного раствора А1 на краевой угол смачивания поверхности подложки и на адгезионную прочность Ni покрытия.

**Проведение эксперимента.** Исследование проводилось на трех стеклянных образцах. Каждый из них чистился в УЗВ по одной из трех технологий очистки: стандартная (указана выше), без спирта с раствором А1 (отсутствие 2-го пункта в технологии) и без раствора А1 со спиртом (отсутствие 1-го пункта в технологии). После проведения операций очистки подложки сушились в сушильном шкафу.

На очищенные подложки наносились пленки Ni методом магнетронного распыления никелевой мишени на установке ВУП-11М [3] в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении». Все покрытия формировались при одних параметрах процесса в едином вакуумном цикле (табл. 1).

Таблица 1

**Параметры нанесения никелевого покрытия магнетронным распылением**

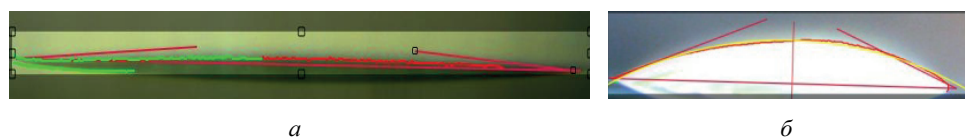
Параметр	Значение
Остаточное давление, Па	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Рабочее давление, Па	$2,5 \cdot 10^{-1}$
Рабочий газ	Ar
Поток газа, л/ч	1,04
Мощность, Вт	200
Время, мин	10
Материал мишени	Ni
Диаметр мишени, мм	100

Контроль краевого угла смачивания, позволяющего оценить чистоту поверхности подложки, проводился на гониометре ЛК-1. Каждая подложка была исследована в четырех разных точках (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2

**Результаты очистки по критерию угла**

№ измерения	Значение краевого угла смачивания, °		
	Стандартная очистка	Без раствора А1 со спиртом	Без спирта с раствором А1
1	12,224	23,423	3,891
2	7,348	29,752	12,740
3	9,836	26,880	6,856
4	8,420	26,357	8,574
Среднее	9,457	26,603	8,015



**Рис. 1.** Результаты очистки: образец «без спирта с раствором А1» (а); образец «со спиртом без раствора А1» (б)

Нанесенное никелевое покрытие проверялось на адгезию методом скрайбирования и методом отрыва [4]. Результаты показаны в табл. 3.

Таблица 3

**Адгезия покрытия к очищенным стеклянным подложкам**

Состав растворов	Метод скрайбирования	Метод отрыва
Стандартная очистка. Последовательность применения компонентов: раствор А1; изопропиловый спирт; дистиллированная вода; проточная вода	 0	 Измерить не удалось
Без раствора А1 со спиртом. Последовательность применения компонентов: изопропиловый спирт; дистиллированная вода; проточная вода	 1	 Измерить не удалось
Без спирта с раствором А1. Последовательность применения компонентов: раствор А1; дистиллированная вода; проточная вода	 0	 Измерить не удалось

Анализ полученных значений позволил заключить, что при использовании раствора А1 краевой угол смачивания значительно уменьшается. Также по приведенным результатам видно, что при очистке подложек без раствора А1 адгезионная проч-

ность приемлема, но хуже, чем с его использованием. Поэтому разработанная технология очистки может быть оптимизирована, т. е. операцию жидкостной очистки можно проводить без использования изопропилового спирта. Тогда время очистки подложек можно сократить на 10 минут, что составляет около 30 %.

### Литература

- [1] Макарова Ю.С., Васильев Д.Д. Отработка режимов предварительной очистки подложек по критерию угла. *Всерос. науч.-техн. конф. «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: мат. конференции, 7–10 апреля, 2015, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, ООО «КванторФорм», 2015, № гос. регистрации 0321501427.*
- [2] Малеванная Е.И., Васильев Д.Д. Отработка технологии формирования бездефектных тонких пленок никеля на стеклянных подложках методом магнетронного распыления. *Всерос. науч.-техн. конф. «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 7–10 апреля, 2015, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, ООО «КванторФорм», 2015, № гос. регистрации 0321501427. URL: studvesna.ru?go=articles&id=1291 (дата обращения 29.06.2015).*
- [3] Моисеев К.М. *Многопозиционные вакуумные технологические установки.* Наноинженерия, № 8, 2014, с. 18–22
- [4] *Приборы контроля качества покрытий.* Elcometer. Электрон. дан., с. 34–35, URL: <http://ndtdv.ru/download/elcometer.pdf> (дата обращения 14.06.2015).

УДК 621.793

## **Технология формирования никелевых тонкопленочных электродов на стеклянных подложках методом магнетронного распыления через металлический трафарет**

© Макарова Юлия Сергеевна, Васильев Денис Дмитриевич,  
Моисеев Константин Михайлович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

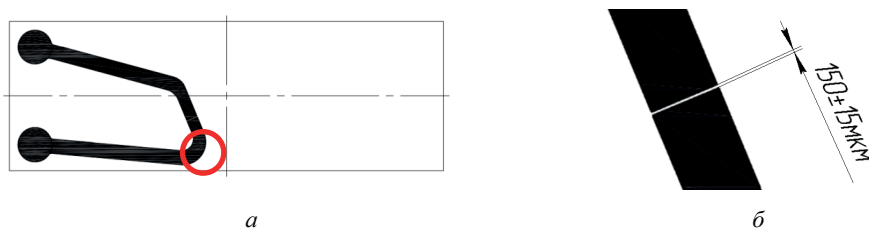
[julchamak@gmail.com](mailto:julchamak@gmail.com), [d.d.vasiliev@bmstu.ru](mailto:d.d.vasiliev@bmstu.ru)

*Работа посвящена исследованию технологии формирования никелевых тонкопленочных электродов методом магнетронного распыления на стеклянные подложки с помощью трафарета, плотно прижатого к подложке и имеющего отверстия формы требуемого изображения электродов на подложке. Проведен эксперимент по нанесению никелевого покрытия магнетронным распылением с использованием тонкой мишени из никеля. Зазор по техническому заданию должен был составлять  $150 \pm 15$  мкм. Проведен контроль параметров полученных тонкопленочных электродов, зазора между ними и сделано заключение о возможности применения данной технологии вместо процесса фотолитографии.*

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, металлический трафарет, никелевые электроды.

Процесс фотолитографии применяется не только при изготовлении непосредственно тонко- и толстопленочных слоев гибридно-пленочных интегральных микросхем (ГПИС), но и при изготовлении трафаретов для их производства [1]. Операция фотолитографии достаточно трудоемка и требует специального оборудования и условий для его проведения. Данная работа посвящена исследованию возможности применения альтернативного способа для получения тонкопленочных элементов на стеклянных подложках методом магнетронного распыления через трафарет вместо фотолитографии. Актуальность исследования заключается в том, что при отказе от фотолитографии значительно сокращается трудоемкость, стоимость, время проведения процесса и повышается качество готового изделия (покрытие не будет взаимодействовать с фоторезистом и растворами для раздувания фоторезиста).

В соответствии с поставленной задачей на стеклянной подложке необходимо сформировать никелевые тонкопленочные электроды, зазор между которыми должен соответствовать  $150 \pm 15$  мкм (рис. 1). Чертеж трафарета имеет аналогичный вид, причем на рис. 1 черным обозначены вырезанные лазером области. Ширина зазора в этом случае составляет 165 мкм, так как необходимо брать размер элемента больше для получения нужного размера, в связи с наличием некоторой ширины реза.



**Рис. 1.** Требуемые электроды:  
*а* — общий вид; *б* — значение зазора

**Проведение эксперимента.** Первым этапом эксперимента стал контроль самого трафарета и сравнение действительных его размеров с заданными. Контроль проводился с помощью твердомера ПМТ-3М, который позволяет измерять линейные размеры плоских объектов.

Лазерная резка обеспечивает клиновидный профиль реза [2], что потребовало проводить контроль обеих сторон трафарета. Контролировались середина формируемого зазора и его края. В результате ширина перемычки на лицевой стороне составила около  $134,0 \pm 8,0$  мкм (причем углы имеют некий радиус, что обуславливается большим воздействием из-за изменения направления движения лазера в этих областях, и ширина перемычки в этой области достигает 126 мкм), а на оборотной — около  $150,0 \pm 6,5$  мкм. Снимки проведенного контроля представлены на рис. 2.

Проведение контроля позволило не только оценить точность размеров трафарета, но и определиться с тем, какую сторону трафарета прикладывать к стеклянной подложке. На рис. 2 видно, что оборотная сторона неровная и на ней есть микро-

стружки, которые не позволят плотно прижать перемычку к подложке, поэтому прикладываемой стороной стала лицевая.

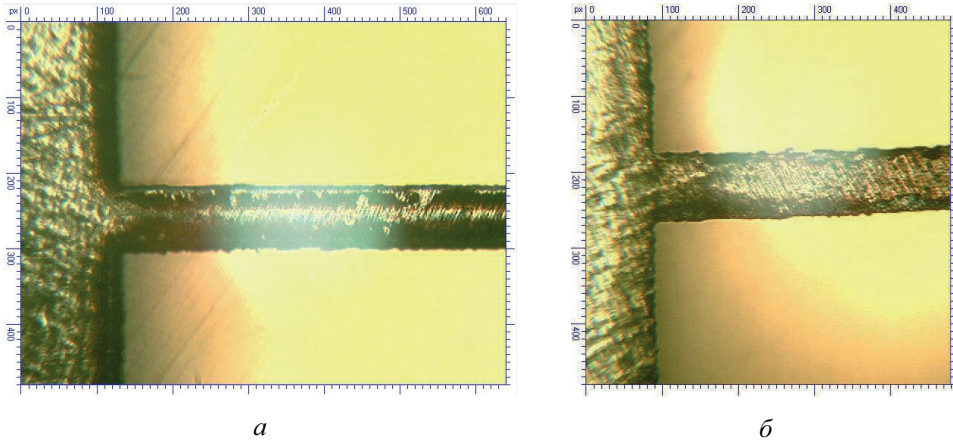


Рис. 2. Снимки перемычки стального трафарета: *a* — лицевая сторона; *б* — оборотная

Следующим этапом эксперимента являлось проведение предварительной жидкостной очистки стеклянной подложки по отработанной технологии, обеспечивающей высокие результаты по адгезионной прочности покрытия и его качеству [3].

Затем было проведено нанесение никелевого покрытия на установке ВУП-11М [4]. Необходимо было также плотно закрепить трафарет на подложке. Параметры процесса приведены ниже:

Остаточное давление, Па.....	$6,0 \cdot 10^{-3}$
Рабочее давление, Па.....	$2,5 \cdot 10^{-1}$
Рабочий газ.....	Ar
Поток газа, л/ч.....	1,04
Мощность, Вт.....	200
Время, мин.....	16
Материал мишени.....	Ni
Диаметр мишени, мм.....	100

Полученный образец был проконтролирован с помощью оптического микроскопа. Измеренные значения ширины зазора варьировались в пределах  $100 \pm 10$  мкм, что не соответствует поставленным требованиям.

На рис. 3 видно, что значение ширины зазора изменяется по его длине. Это обусловлено неточностями изготовления трафарета. Но размеры зазора значительно отличаются от размеров перемычки трафарета, что не позволяет использовать данный трафарет (размеры перемычки трафарета варьируются в пределах  $150 \pm 6$  мкм, а полученный зазор —  $100 \pm 10$  мкм) по причинам размытости границ электродов, обусловленных подпылением в данных зонах, которое составило около 40 мкм (рис. 4).

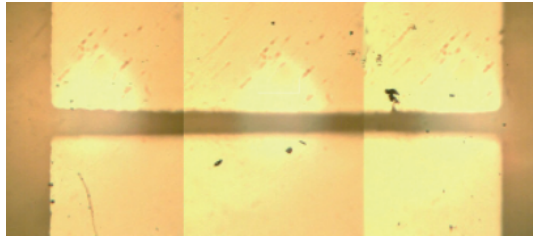


Рис. 3. Зазор между никелевыми электродами

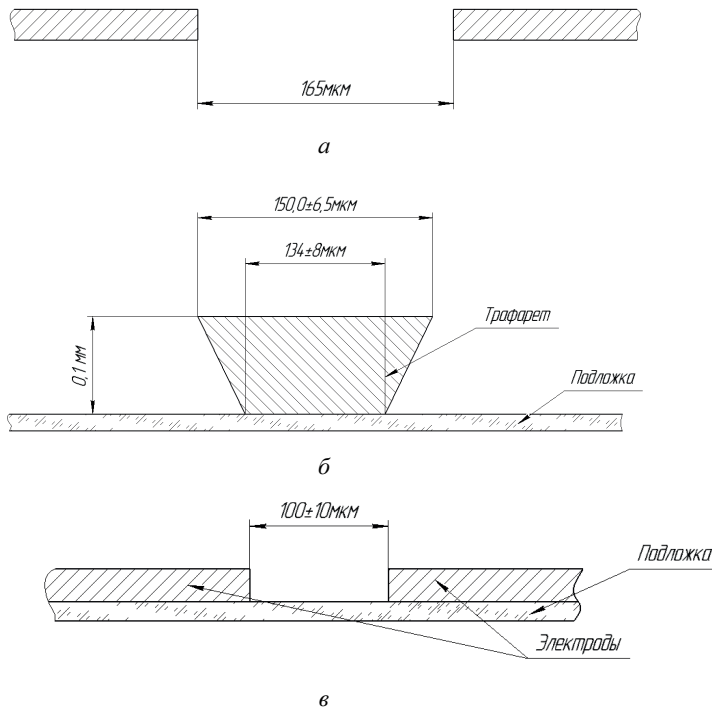


Рис. 4. Схема процесса нанесения через трафарет:

*a* — чертеж зазора; *б* — установка трафарета на подложке; *в* — полученное сечение электродов после нанесения покрытия (*в*)

Таким образом, причиной разброса размеров, скорее всего, стало то, что трафарет прижимался лицевой стороной к подложке, поэтому меньшая сторона трапециевидной перемычки была на подложке, а также наличие заусенцев на оборотной стороне. Предположительно для подобного рода задач с жесткими требованиями соответствия размеров любые трафареты будут давать аналогичные эффекты (несоответствие требуемым размерам, неровность и размытость краев) в большей или меньшей степени. Однако при точном изготовлении самого трафарета, который не имел бы закруглений в углах, неравномерность перемычки по длине и микростружки



на оборотной стороне, существует возможность удовлетворения поставленным требованиям и получения нужной ширины зазора, т. е. при изготовлении шаблона по чертежу с размерами зазора 165 мкм получился зазор между электродами — около 100 мкм. Различие составляет около 30 %, поэтому при изготовлении шаблона следует выполнять чертеж трафарета с размерами больше 30 % в отличие от требуемых.

### Литература

- [1] Шмаков М., Паршин В. Школа производства ГПИС. Фотолитография. Первый этап: формирование слоя резиста. *Технологии в электронной промышленности*, 2007, № 3, с. 70.
- [2] Ковалев О.Б., Фомин В.М. *Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов*. Москва, Физматлит, 2013, с. 76–79.
- [3] Малеванная Е.И., Васильев Д.Д. Отработка технологии формирования бездефектных тонких пленок никеля на стеклянных подложках методом магнетронного распыления. Всероссий. науч.-техн. конф. «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 7–10 апреля, 2015, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, ООО «КванторФорм», 2015, № гос. регистрации 0321501427. URL: [studvesna.ru?go=articles&id=1291](http://studvesna.ru?go=articles&id=1291) (дата обращения 29.06.2015).
- [4] Моисеев К.М. Многопозиционные вакуумные технологические установки. *Наноинженерия*, 2014, № 8, с. 18–22.

УДК 004.942

## Применение оптимизации при калибровке моделей в системе приборно-технологического моделирования TCAD Sentaurus

© Глушко Андрей Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[andrei19386@mail.ru](mailto:andrei19386@mail.ru)

*Обоснована актуальность калибровки моделей, заложенных в САПР приборно-технологического моделирования. Рассмотрены неавтоматизированный и автоматизированный способ калибровки. Показаны преимущества автоматизированного способа калибровки. Определены ограничения и целевая функция в оптимизационной задаче калибровки. Для воплощения автоматизированного способа калибровки предложено использовать ранее разработанный программный модуль оптимизации. С использованием этого модуля проведена калибровка модели ионной имплантации фосфора в кремниевую пластину.*

**Ключевые слова:** TCAD, моделирование, ионная имплантация, калибровка, оптимизация, автоматизация.

Элементами современной бортовой аппаратуры являются интегральные микросхемы высокой степени интеграции. Корректное функционирование этих схем определяется в конечном счете электрическими характеристиками составляющих их элементов — транзисторов, резисторов, конденсаторов и т. п. Необходимость совершенствования элементной базы приводит к неизбежности внесения изменений в технологический процесс формирования кристаллов интегральных схем. Такое внесение изменений методом проб и ошибок неприемлемо, поскольку связано с высокими материальными и временными затратами.

Основным инструментом проектирования технологических процессов становятся современные системы приборно-технологического моделирования, к таким системам относится, в частности, TCAD Sentaurus фирмы Synopsys. Однако перед использованием этой системы необходимо модели, встроенные в систему, откалибровать. Калибровка — не что иное, как параметрическая идентификация модели, т. е. определение такой комбинации неизвестных коэффициентов модели, при которой достигается наименьшее расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными [1].

Калибровка может проводиться двумя способами. Первый способ, используемый ранее, был связан с непосредственным вовлечением в процесс калибровки оператора ЭВМ, который методом подбора задает комбинацию неизвестных коэффициентов модели и запускает процесс с этими значениями коэффициентов модели на расчет. Затем он анализирует результаты моделирования и делает вывод о том, в какую сторону нужно изменить тот или иной коэффициент модели, чтобы добиться приемлемого расхождения с экспериментальными данными. Такой подход нетрудно использовать, если в модели только один-два неизвестных коэффициента. На практике таких коэффициентов бывает существенно больше, поэтому время, затрачиваемое на калибровку, зависит от скорости работы оператора, от того насколько «повезет» оператору при выборе комбинации коэффициентов, и поэтому для минимизации расхождения с экспериментальными данными является неприемлемым. Необходимо также отметить, что любое участие человека в процессе счета сопряжено с возможными субъективными ошибками. Снижается и точность определения минимального расхождения.

В рамках настоящей работы для выполнения калибровки моделей предлагается использование разработанного в [2] модуля оптимизации. Достоинством такого подхода является возможность его применения для решения широкого круга задач. В данном случае в качестве целевой функции используется функция вычисления суммы квадратов разности между результатами измерения некоторой величины и результатами ее моделирования:

$$f(K_1, K_2, \dots, K_n) = \sum_i (y_{\text{экс.}i} - y_{\text{мод.}i})^2 \rightarrow \min,$$

где  $K_1, K_2, \dots, K_n$  — неизвестные коэффициенты модели;  $y_{\text{экс.}i}$  — значение измеряемой величины в  $i$ -й точке;  $y_{\text{мод.}i}$  — расчетное значение этой величины в  $i$ -й точке.

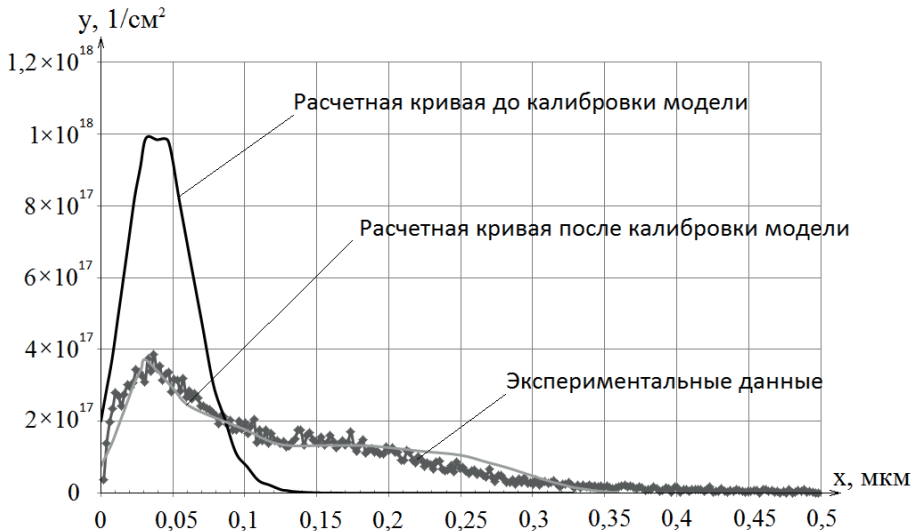
Неравенства-ограничения основаны на ограничениях, вводимых самой системой приборно-технологического моделирования. Как правило, одним из таких ограничений является положительность всех неизвестных коэффициентов модели, т. е.

$$\begin{cases} K_1 > 0 \\ K_2 > 0 \\ \dots \\ K_n > 0 \end{cases}$$

В общем случае данная система неравенств может дополняться и другими ограничениями. Для корректной работы модуля оптимизации следует предварительно все ограничения записать в виде системы неравенств  $g_j(x) > 0$ . При этом поскольку модуль оптимизации, разработанный в [2] ищет минимум функции, то само значение целевой функции следует брать со знаком «+». В процедуру вычисления целевой функции и функций-ограничений передаются неизвестные коэффициенты модели, эта процедура возвращает массив значений, причем первое значение является значением целевой функции, а оставшиеся элементы массива — значения функций ограничений  $g_j(x)$ .

К примеру, проведем калибровку модели процесса ионной имплантации фосфора в однородную кремниевую эпитаксиальную пластину. Измеряемой величиной является концентрация фосфора на заданной глубине. Экспериментальные данные о концентрации примеси фосфора получены методом вторичной ионной масс-спектропии. Неизвестными коэффициентами при калибровке являются параметры распределения Пирсона IV [3].

Поскольку программа моделирования автоматически строит расчетную сетку конечных элементов [4], абсциссы экспериментальных и расчетных точек, вообще говоря, не совпадают. Ввиду этого для определения значения концентраций в промежуточных точках была выполнена кусочно-линейная интерполяция. Результаты калибровки представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Результаты калибровки модели процесса ионной имплантации фосфора в кремниевую пластину

Как видно на рис. 1, кривая, отражающая расчетную зависимость в процессе калибровки существенно приблизилась к результатам измерений концентрации методом ВИМС. Расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными снизилось до 2 %. При этом выполнено около 60 итераций оптимизации, весь процесс калибровки занял 40 минут.

Следует отметить, что не всегда задача калибровки может быть успешно решена с использованием существующего программного модуля, разработанного в [2]. Дело в том, что используемый в [2] алгоритм Нелдера — Мида позволяет получить только локальный минимум целевой функции. При неудачном выборе начального приближения (начальных значений неизвестных коэффициентов модели) снижается точность определения параметров модели. Это значит, что результат калибровки может располагаться далеко от глобального минимума (который, в принципе, и следует найти). Во избежание таких ситуаций в дальнейшей работе необходимо добавление в разработанный программный модуль оптимизации дополнительных алгоритмов, позволяющих выполнять поиск глобального экстремума, например, алгоритма Монте-Карло.

Предлагаемый подход можно применять не только для калибровки моделей процессов ионной имплантации, но и других процессов формирования структур, а также для калибровки моделей, используемых при расчете электрофизических параметров исследуемых структур.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (грант НШ-2903.2014.9) и гранта РФФИ № 15-07-03116.*

### Литература

- [1] Зинченко Л.А. *САПР Наносистем*: учеб. пособие. Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн. Кн. 17. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 224 с.
- [2] Глушко А.А., Юлкин А.С. Особенности оптимизации технологических режимов производства КНИ КМОП СБИС по критерию стойкости к воздействию спецфакторов. *Тр. НИИСИ РАН. «Математическое и компьютерное моделирование сложных технических систем: теоретические и прикладные аспекты»*. Т. 3, № 1. Москва, Изд-во НИИСИ РАН, 2013, с. 20–23.
- [3] *Моделирование элементов и технологических процессов*. Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема. Москва, Радио и связь, 1988, 496 с.
- [4] Власов А.И., Назаров А.В. *Основы моделирования микро- и наносистем*: учеб. пособие. Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн. Кн. 14. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 144 с.

УДК 681.142

## Современные системы распознавания регистрационных знаков транспортных средств

© Горелов Дмитрий Викторович, Власов Андрей Игоревич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[gorelovdmittii@gmail.com](mailto:gorelovdmittii@gmail.com)

*Рассматриваются основные этапы обработки изображений с камер для определения регистрационных знаков транспортных средств (ТС). Проведен анализ ключевых моментов, касающихся построения автоматизированных систем. Рассмотрена общая архитектура систем распознавания, описаны проблемы, возникающие на основных стадиях их работы, приведен обзор наиболее широко известных алгоритмов детектирования номерных пластин.*

**Ключевые слова:** обработка изображения, регистрационный знак, система распознавания, детектирование номерной пластины.

На сегодняшний день системы машинного зрения гарантированно распознают символы на номерных знаках при хорошей освещенности, относительно чистой поверхности и горизонтальном расположении номерной пластины [1]. Однако на практике данные условия неидеальны. Сильное загрязнение и расположение под другим углом номера не только затрудняет распознавание символов, но и определение расположения номера на изображении [2, 3]. Для решения перечисленных проблем разработчики систем применяют разные методы и алгоритмы обработки изображений.

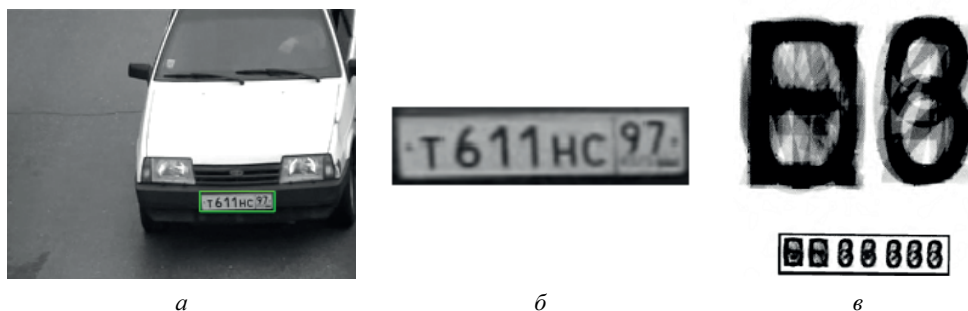
В основном все системы автоматического распознавания номеров состоят из трех основных подсистем. Первая подсистема служит для захвата изображения при помощи устройств видеозахвата или IP-камер. Вторая подсистема отвечает за цифровую обработку данных. Данная подсистема включает в себя следующие этапы: формирование изображения, детектирование номерного знака, сегментация номерного знака и классификация символов. Третья подсистема отображает информацию в виде последовательности текстовых символов с автомобильного регистрационного номера.

**Формирование изображения.** Для получения изображения регистрационных номеров ТС используют камеры. Существуют системы с непрерывно работающими камерами и системы, в которых устройства фиксации изображений включаются в момент появления автомобиля [1, 4]. Системы с непрерывно работающими камерами в реализации сложнее, так как они должны уметь выделять определенные ТС из основного потока и определять номерные пластины. Методы с камерами, работающими в определенные моменты, иногда не позволяют полностью получить изображение номера.

Немаловажным фактором являются параметры используемых камер. Узость динамического диапазона камер порой сдерживает развитие автоматизированных систем распознавания регистрационных знаков ТС. Для решения этой проблемы возможно применение камер более высокого разрешения и использование различных

алгоритмов обработки. После этапа получения изображение происходит его анализ и обработка для последующего детектирования и выделения отдельных символов для распознавания [1].

**Детектирование номерной пластины.** После этапа получения изображения происходит детектирование номера [5, 6]. Детектирование — это выделение области изображения, где располагается номер (рис. 1). Эта стадия очень важная, так как от нее зависит дальнейшее корректное распознавание символов. Для выделения знака используются методы в зависимости от признаков изображения. Основными признаками являются краевые точки, текстуры, цвет и симметрия.



**Рис. 1.** Детектирование номерной пластины:

*a* — изображение, полученное с помощью камеры; *б* — выделенный регистрационный знак ТС; *в* — шаблон номера, полученный путем объединения отдельных слоев

Такие факторы, как загрязнение номера, уровень освещенности, совпадение по цвету с кузовом (например, с бампером), отражение света от поверхности, наличие других надписей и символов негативно влияют на корректное детектирование номерной пластины автомобиля [7].

Для выделения номера может быть использована информация о цвете пластины и символах на ней. В этом случае при поперечном сканировании изображения получается последовательность цветовых кодов, для дальнейшей классификации которых применяют искусственные нейронные сети (ИНС) и генетические алгоритмы [8]. Использование цветовой информации дает ряд преимуществ, но в то же время вырастают объемы вычислений при обработке.

**Метод сравнения с шаблоном.** Метод определяет степень соответствия отдельных частей анализируемого изображения и построенного шаблона номерного знака [1, 9]. Область, имеющая наибольшее сходство с шаблоном, сегментируется как искомый номерной знак. Построение шаблона играет важную роль для получения корректных результатов. Очевидно, что шаблон должен максимально отражать все характерные признаки, присущие области номерного знака на изображении. Шаблон для букв и цифр строится путем последовательного добавления слоев, каждый из которых соответствует одной букве и цифре. После полученные слои объединяются в один общий слой. Пример метода с шаблоном представлен на рис. 1, *в*.

После построения шаблона необходимо определить способ нахождения степени соответствия между выделенной областью изображения и шаблоном [1, 10]. Наиболее часто с этой целью применяется перекрестная корреляция, которая основана на вычислении квадрата евклидова расстояния между шаблоном и изображением:

$$d^2(u, v) = \sum_x \sum_y [I(x, y) - T(x - u, y - v)]^2,$$

где  $I(x, y)$  — интенсивность изображения в точке  $(x, y)$ ,  $T(u, v)$  — построенный шаблон.

Преимущество данного метода — простота вычисления меры сходства [1]. К минусу относится большой объем вычислений [11, 12].

**Применение морфологических операторов.** Морфологические операторы являются хорошим инструментом обработки изображений, в основе которого лежат понятия максимумов и минимумов [13]. При выделении области номерного знака этим методом предполагается, что символы состоят из тонких линий, которые темнее или ярче основного фона [13]. Происходит операция замыкания элементов, размер которых превышает размеры символов [1, 13]. При вычитании результата из исходного изображения получается картина, содержащая символы номерного знака, как показано на рис. 2. После данной процедуры необходимо определить границы номерной пластины [1, 2]. Для этого применяется операция замыкания с горизонтальным структурирующим элементом, размер которого превышает максимальное расстояние между символами. Для того, чтобы удалить объекты малой высоты, можно применить операцию размыкания с вертикальным структурирующим элементом, размер которого равен минимальной высоте символов [14].



Рис. 2. Разность замыкания и исходного изображения

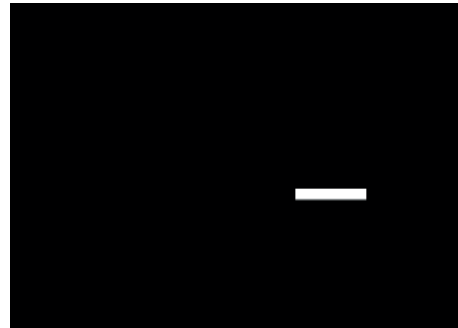


Рис. 3. Окончательный результат обработки изображения

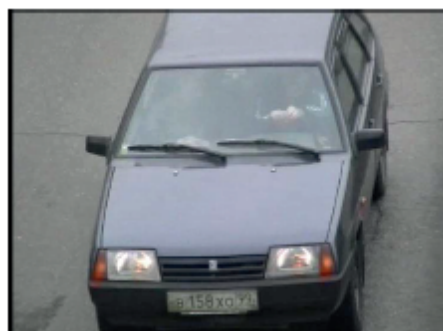
Применив эту операцию повторно, на этот раз таким образом, чтобы удалить все объекты, высота которых не превышает максимальную высоту символов, составим затем новое изображение путем вычитания полученного изображения из предыдущего. Окончательный результат обработки изображения показан на рис. 3.

Недостаток морфологических методов детектирования в том, что методы данной категории предполагают знание конкретного размера номерного знака на изображении [1]. При изменении масштаба обрабатываемого изображения алгоритм перестает корректно детектировать номера. Кроме того, данный подход чувствителен к зашумленным изображениям [1, 12].

**Вычисление проекций изображения.** В основе данного метода лежит тот факт, что величина интенсивности символов на номерных знаках сильно отличается от интенсивности фона [1, 5]. Процедура детектирования в данном методе проходит в несколько этапов. Первый этап включает в себя поиск границ объектов на изображе-

нии [10, 12]. На втором этапе происходит проецирование изображения на горизонтальную и вертикальную оси. Третий этап включает в себя определение границ номерной пластины.

Для нахождения краев изображения применяются градиентные маски, такие как Превитта, Собеля и Робертса [10, 12]. На рис. 4 показан результат, который был получен при помощи проекций изображения. На следующем шаге производится вычисление проекций изображения на горизонтальную и вертикальную оси. На рис. 5 и 6 приведены примеры вычисления проекций.

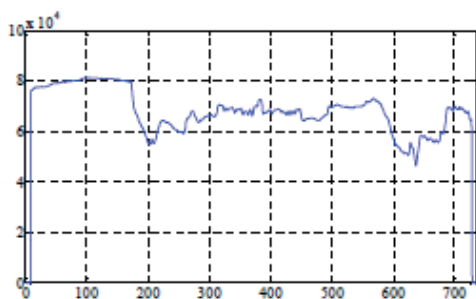


*a*

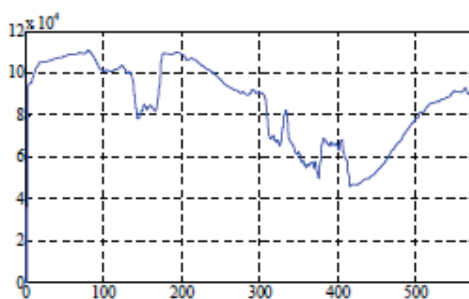


*б*

**Рис. 4.** Применение масок оператора Превитта к изображению:  
*a* — исходное изображение; *б* — после применения дифференциальных масок



**Рис. 5.** Изображение и его проекция на горизонтальную ось



**Рис. 6.** Изображение и его проекция на вертикальную ось



Метод проекций достаточно прост и быстр при вычислении [14]. Однако метод не позволяет провести различие между областью, занимаемой номером, и областями, включающими в себя посторонние знаки [2, 4].

**Сегментация символов номерного знака.** После детектирования номера идет стадия сегментации отдельных символов [1, 5]. Для этой цели наиболее часто используется метод построения горизонтального бинаризованного изображения (рис. 7). Однако изменение положения камеры относительно ТС приводит к перспективным искажениям изображения [1, 5]. Также существенно влияет наклон номера автомобиля, что приводит в проекционных методах к значительным ошибкам.

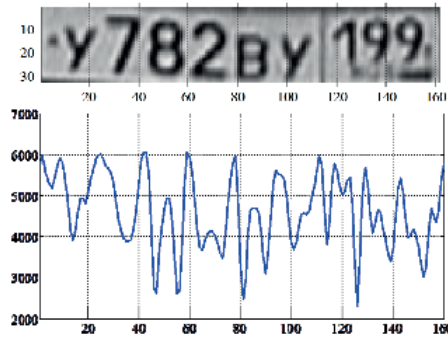


Рис. 7. Сегментация номерной пластины методом проекций

Другим альтернативным методом может служить метод поиска разделяющих линий, основанный на минимизации стоимостной функции изображения. Он позволяет производить сегментацию цифрового изображения, учитывая его содержание. В основе алгоритма лежит использование стоимостной функции — некоторой условной величины, характеризующей важность данного пикселя в текущем изображении [1, 15]. Разделительные линии между символами проводятся по тем цепочкам пикселей, которые наименее важны в этом изображении.

**Классификация текстовых символов.** Классификация символов одна из последних, но в то же время ответственных стадий в автоматических системах распознавания номерных знаков ТС после сегментации символов. Среди распространенных методов распознавания можно выделить метод сравнения с шаблоном [1, 5]. Каждый поступивший на вход символ сравнивается с эталонным образцом из базы. Необходимо приведение всех символов к одному и тому же размеру. К сожалению, такой метод может давать погрешности даже при изменении уровня освещенности объектов [5, 10].

К другим методам сравнения можно отнести построение гистограмм, проекций интенсивностей и т. д. В практических задачах классификация решается с помощью алгоритмов машинного обучения [16, 8].

Проведен обзор алгоритмов распознавания символов регистрационных знаков ТС. По результату проведенного обзора были выделены основные этапы работы автоматической системы распознавания, которые включают в себя захват и обработку изображения, детектирование номерной пластины, сегментирование регистрационного знака на основе информации исходного изображения и классификацию отдельных символов.

Литература

- [1] Shapiro L. G., Stockman G. *Computer vision*. Prentice-Hall, 2001.
- [2] Петров В.А., Волохов В.А. Распознавание регистрационных номеров транспортных средств с использованием комитета классификаторов. *Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны. Мат. междунар. науч.-практ. конф.*, ч. 2, 2011, с. 332–334.
- [3] Трапезников И.Н., Федорин Д.В., Петров В.А., Носков А.А. Исследование устойчивости алгоритмов машинного обучения к шумам в задаче распознавания символов. *Новые информационные технологии в научных исследованиях: мат. XVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов*, 2012, с. 224–226.
- [4] Szeliski R. *Computer vision: algorithms and applications*. Springer, 2010.
- [5] Bishop C. M. *Pattern recognition and machine learning*. Springer, 2006.
- [6] Anishiya P., Joans S.M. Number Plate Recognition for Indian Cars Using Morphological Dilation and Erosion with the Aid Of Ocrs. *International Conference on Information and Network Technology*. Singapore, IACSIT Press, IPCSIT vol. 4, 2011, p. 115.
- [7] Jia W., X. He, H. Zhang, Q. Wu. Combining Edge and Colour Information for Number Plate Detection. *Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand 2007*. Hamilton, New Zealand, December 2007, p. 227–232.
- [8] Шахнов В.А., Власов А.И., Поляков Ю.А., Кузнецов А.С. Нейрокомпьютеры: Архитектура и схемотехника. *ChipNews*, 2011, № 1, с. 18–21.
- [9] Петров В.А., Федорин Д.В., Кралин А.Е. Применение НОГ-дескрипторов для описания объектов на цифровых изображениях. *66 Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием*. Электрон. сб. тез. докл. Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2013, с. 740.
- [10] Курсы лаборатории компьютерной графики и мультимедиа при ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова. URL: <http://courses.graphicon.ru/main/vision/lections>.
- [11] Форсайт Д., Понс Ж. *Компьютерное зрение. Современный подход*. Москва, ИД «Вильямс», 2004.
- [12] Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. Москва, Техносфера, 2005.
- [13] Hung K.-M., Hsieh C.T. A Real-Time Mobile Vehicle License Plate Detection and Recognition. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2010, vol. 13, no 4, p. 433–442.
- [14] Приоров А.Л., Апальков И.В., Хрящев В.В. *Цифровая обработка изображений*. Ярославль, ЯрГУ, 2007.
- [15] Avidan S., Shamir A. *Seam Carving for Content-Aware Image Resizing*, 2007.
- [16] Балухто А.Н., Бурый Е.В., Власов А.И. *Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений*. Кн. 7. Под ред. А.И. Галушкина, Ю.В. Гуляева. Москва, Радиотехника, 2003, 192 с.

УДК 629.113

## Моделирование электротехнических систем легкового автомобиля

© Дебелов Владимир Валентинович<sup>1</sup>, Козловский Владимир Николаевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, Самарская обл., г. Тольятти, ОАО «АвтоВАЗ»

<sup>2</sup> Россия, Самарская обл., г. Тольятти, Поволжский государственный  
университет сервиса

[VV.Debelov@vaz.ru](mailto:VV.Debelov@vaz.ru)

*Решается задача интеграции систем управления в единый комплекс. Разработан комплекс унифицированных виртуальных имитационных моделей электротехнических систем управления с возможным расширением функциональных областей. Модели организованы в математической программной среде MATLAB и позволяют формировать программные коды на языке C++, что обеспечивает реализацию программ непосредственно в рамках контроллера электронной системы управления двигателем автомобиля. Экспериментально отработаны полученные при имитационном моделировании результаты. Представлен эффективный комплекс управления двигателем современного автомобиля.*

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс управления, двигатель внутреннего сгорания, автомобиль.

Повышение качества функционирования современного легкового автомобиля неразрывно связано с решением комплекса задач по улучшению безопасности, надежности, комфорта, экологичности при одновременном сохранении динамических характеристик. Для решения обозначенных задач мировые лидеры автопрома активно занимаются разработкой и внедрением электротехнических систем управления, которые обеспечивают их эффективное решение.

Качество функционирования автомобиля определяется рядом технических параметров, существенная часть которых обеспечивает эффективность работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Потребитель в Западной Европе весьма требователен к вопросам топливной экономичности и вредным выбросам. Но при этом автомобиль не должен терять динамические характеристики и гарантировать высокий уровень комфорта.

Сегодня на отечественных автомобилях активно внедряется и совершенствуется комплекс электронной педали акселератора и электронного привода дроссельной заслонки. Конструкторами разрабатывается новая система сдвига фаз газораспределения ДВС, реализуется система «Старт-стоп» и обосновываются принципы регулирования скорости легкового автомобиля.

Серьезной проблемой, препятствующей дальнейшему развитию систем управления силовой установкой автомобиля, является эффект децентрализации функций управления. Использование же современных средств математического имитационного моделирования обеспечивает возможности для проведения комплексных работ, связанных с теоретическим анализом, а также проектированием сложных электротехнических систем автомобилей.

Таким образом, становится актуальной важная научно-техническая задача по разработке математических моделей новейших систем регулирования фаз газораспределения ДВС, системы «Старт-стоп» и системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости с оптимальными параметрами.

В работе решается важная научно-техническая задача получения наилучших показателей работы ДВС за счет управления фазами газораспределения, снижения расхода топлива, уменьшения времени работы ДВС в режиме холостого хода, управления фазами газораспределения, регулирования скорости автомобиля в режимах поддержания и ограничения.

Цель работы состоит в разработке комплекса математических имитационных моделей электротехнических систем управления автомобиля для создания эффективной системы с единым комплексным управлением.

Активное развитие электротехнических комплексов и систем управления на транспорте, которое мы наблюдаем в последние десятилетия, предопределило формирование целого пласта научно-технических разработок, обеспечивающих повышение уровня безопасности, экологичности и комфорта эксплуатации автомобилей. Высокий уровень актуальности данной темы также определяется трансформацией традиционного автомобилестроения, связанной с появлением автомобилей с комбинированной энергоустановкой, где важность систем оптимизации и управления ДВС становится ключевой задачей процесса проектирования.

Пуск ДВС, управление моментом воспламенения топливно-воздушной смеси, обеспечение комфортной среды в салоне автомобиля, организация безопасного пространства внешней среды автомобиля, передача информации о маневрах автомобиля другим участникам дорожного движения, контроль работы агрегатов и узлов, а также автомобиля в целом — все это функции микропроцессорных систем управления.

Рассматривая процесс проектирования современных электротехнических комплексов, можно классифицировать его по двум категориям: разработка и отладка систем по отдельности; проектирование продукта на фундаменте общей концепции. Создание математических имитационных моделей систем и реализация их на базе общей концепции построения программно-аппаратного комплекса позволяет производить модернизацию и расширение функций электротехнических систем управления без существенных капиталовложений.

Система изменения фаз газораспределения Variable Valve Timing (VVT) предназначена для регулирования параметров работы газораспределительного механизма в зависимости от режимов работы двигателя. Применение данной системы обеспечивает повышение мощности и крутящего момента двигателя, топливную экономичность и снижение вредных выбросов.

К регулируемым параметрам работы газораспределительного механизма относятся: момент открытия (закрытия) клапанов; продолжительность открытия клапанов; высота подъема клапанов. В совокупности эти параметры составляют фазы газораспределения — продолжительность тактов впуска и выпуска, выраженную углом поворота коленчатого вала относительно «мертвых» точек. Фаза газораспределения определяется формой кулачка распределительного вала, воздействующего на клапан.

Ужесточение требований к экологическим и экономическим показателям автомобиля требует создания интеллектуальных систем, способствующих обеспечению эффективности работы ДВС. Система «Старт-стоп» предназначена для снижения вредного техногенного воздействия на окружающую среду путем оптимизации

работы ДВС, для снижения расхода топлива, повышения энергоэффективности. Достигается это сокращением времени работы двигателя в режиме холостого хода, частичной рекуперацией энергии при движении накатом или при торможении автомобиля.

Для работы системы поршни необходимо остановить в строго определенном положении, чтобы в каждом цилиндре был необходимый объем топливовоздушной смеси для оптимального запуска двигателя. Интеллектуальная система управления двигателем контролирует положение поршней во время остановки двигателя, выполняет нумерацию цилиндров, и с началом движения в цилиндры впрыскивается топливо и воспламеняется топливовоздушная смесь. Таким образом происходит запуск двигателя. При запуске двигателя в дополнение к энергии сгорания топлива добавляется энергия стартера, который включается на непродолжительное время.

Система позволяет оптимизировать энергетический баланс автомобиля и увеличить ресурсы системы электропитания для пуска автомобиля, независимо от индивидуального характера вождения и условий его эксплуатации. Система «Старт-стоп» служит для выполнения быстрых и оптимальных пусков, в результате которых снижается количество техногенных выбросов и уменьшается время прокрутки стартером, производится подача топливовоздушной смеси с требуемым стехиометрическим соотношением.

Системы регулирования скорости получили широкое распространение после изобретения системы поддержания скорости, которая была предназначена для снижения утомления водителя по удерживанию педали акселератора в одном и том же положении на большом протяжении времени движения автомобиля по прямой дороге. Эти системы получили развитие, так как способствовали повышению эффективности труда, уменьшали временные затраты на отдых водителя и способствовали сокращению времени движения транспортного средства. Созданная пассивная система поддержания скорости предоставляла водителю ограниченные возможности. Получили развитие системы обеспечивающие регулирование открытия дроссельной заслонки на величину, требуемую для поддержания заданной скорости.

Важным аспектом в решении задач по разработке электротехнических систем управления ДВС является их интеграция в рамках единого комплекса с обеспечением возможности повышения эффективности дальнейших работ связанных с развитием, а также улучшением их взаимодействия в рамках единой концепции определяющей общность систем.

Представленная концепция программного обеспечения контроллера системы управления двигателем (КСУД) позволяет описать взаимосвязи модулей программного обеспечения и их функции, а также иерархию программного обеспечения и привязку к аппаратным ресурсам систем управления ДВС.

Особенностью концепции является возможность ее соблюдения как в рамках одного программного продукта на уровне математических моделей с добавлением вставок программного кода, так и на базе проектов. Совместимость достигается за счет преобразований сигналов и типов величин, а проект представляет собой элементы программного кода, полученного с помощью различных инструментов компьютерного моделирования и трансляции его в программные коды.

В результате работы выполнены комплексные научно-технические исследования по созданию общей концепции, обеспечивающей единый подход к реализации и разработке электротехнических систем управления ДВС, на основе которой разработаны математические имитационные модели систем:



Рис. 1. Концепция архитектуры программного обеспечения КСУД

1. Регулирования фаз газораспределения. Модель обеспечивает повышение скорости достижения требуемого момента ДВС автомобиля на 12% и расширяет диапазон частот вращения двигателя с получением максимального крутящего момента.

2. «Старт-стоп» с функцией быстрый запуск ДВС с минимальными энергетическими потерями. Применение математической модели системы «Старт-стоп» в практике автомобилестроения обеспечивает снижение времени прокрутки ДВС с 0,9 до 0,3, с одновременным сокращением времени определения момента искрообразования и топливоподачи.

3. Регулирования скорости автомобиля. Позволяет управлять углом открытия дроссельной заслонки через контроллер системы управления ДВС без применения дополнительных блоков управления, с обеспечением непосредственного воздействия на исполнительные механизмы.

Практическим результатом разработок математических имитационных моделей систем управления ДВС является универсальный электротехнический комплекс, реализованный в перспективных проектах автомобилей производства ОАО «АВТОВАЗ», а также ряд инструментов проектирования, позволяющих разрабатывать компоненты других электронных систем автомобиля, используя единый подход в реализации алгоритмов управления.

### Литература

- [1] Дебелов В.В., Козловский В.Н., Строганов В.И., Пьянов М.А. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Ч. 1. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 2014, № 1, с. 40–48.
- [2] Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Строганов В.И. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Ч. 2. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 2014, № 2, с. 19–28.

- [3] Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Строганов В.И. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля. *Электроника и электрооборудование транспорта*, 2014, № 4, с. 5–12.
- [4] Дебелов В.В., Козловский В.Н., Иванов В.В., Строганов В.Е., Ютт В.Е. Электронная система регулирования скорости движения автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости. *Грузовик*, 2013, № 12, с. 19–23.
- [5] Дебелов В.В., Козловский В.Н., Ютт В.Е. Электронная система управления автомобиля «Start-Stop». *Электроника и электрооборудование транспорта*, 2014, № 2, с. 6–9.

УДК 62-522.2:537.626

## **Моделирование методом конечных элементов магнитной системы магнитореологического дросселя гидравлического привода для прецизионного вакуумного оборудования**

© Долинин Павел Александрович, Базиненков Алексей Михайлович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[pavel\\_dolinin@mail.ru](mailto:pavel_dolinin@mail.ru)

*Предложен альтернативный вариант гидравлического магнитореологического (МР) механизма перемещений для вакуумного технологического оборудования, обеспечивающий высокую грузоподъемность при малой погрешности позиционирования. В качестве рабочей жидкости в механизме применяется МР жидкость. Поток жидкости в механизме можно управлять при помощи внешнего магнитного поля, создаваемого магнитной системой МР дросселя. Представлено моделирование магнитной системы дросселя с помощью метода конечных элементов, и проведен анализ магнитных полей в системе дросселя и оценка взаимного влияния каналов управления механизмом.*

**Ключевые слова:** *привод, магнитореологическая жидкость, конечные элементы, дроссель, магнитопровод.*

Современное исследовательское (сканирующие зондовые микроскопы, адаптивные составные телескопы) и технологическое (фотолитографии, ионной имплантации) оборудование требует перемещения объектов с высокой точностью, причем перемещаемые объекты часто имеют достаточно большую массу (до 100 кг). Кроме общеизвестных приводов, таких как механический, гидравлический, пневматический, сейчас активно применяются механизмы перемещений на основе так называемых умных материалов, например, пьезоэлектрических, магнитострикционных и материалов с памятью формы. Одним из таких материалов является магнитореологическая жидкость (МРЖ), которая быстро и обратимо меняет свои реологические свойства под действием внешнего магнитного поля [1].

Разработанный в научной группе гидравлический МР привод [2, 3] позволяет, сохранив высокую нагрузочную способность, добиться низкой погрешности позици-

онирования за счет применения МРЖ и обеспечить хорошие вакуумные характеристики за счет применения сильфонных герметизаторов.

Для перемещения поршня (штока) МРЖ подается в цилиндры и за счет МР дросселей создается перепад давлений. С подачей электрического тока на управляющие катушки МР дросселей в них создается магнитное поле, которое способно изменять вязкость МРЖ в рабочих зазорах дросселей. Сильфоны выполняют роль герметизирующих элементов и упругих направляющих. Таким образом, характеристики МР дросселей играют очень важную роль в обеспечении приводом заданных характеристик.

В каждый гидроцилиндр привода встроено по два МР дросселя и одной из возможных проблем является взаимное влияние их магнитных полей. Главной задачей настоящего исследования стало выявление взаимного влияния магнитных полей МР дросселей друг на друга.

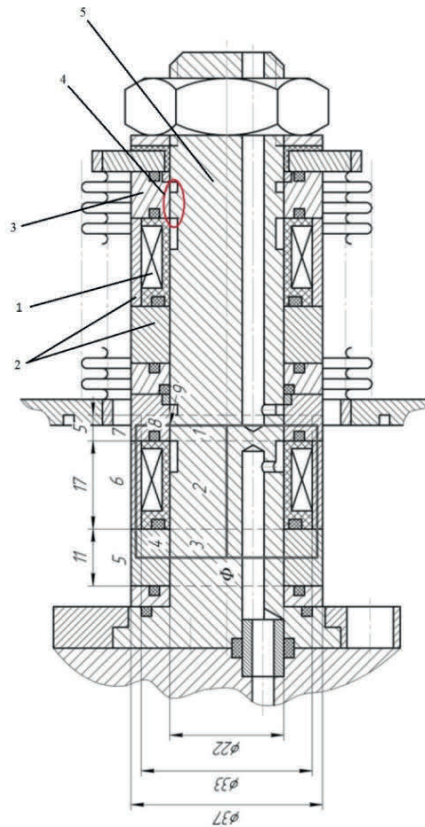


Рис. 1. Схема МР дросселя:

1 — катушка; 2 — магнитопровод; 3 — кольцо дросселя; 4 — рабочий зазор; 5 — шток

**МР дроссель.** МР дроссель работает по следующему принципу: на катушку подается ток, под действием которого генерируется магнитное поле, охватывающее катушку, прилегающий к ней магнитопровод и кольцо дросселя, расположенное над рабочим зазором. Шток, как и перечисленные элементы, выполнен из магнитного материала — стали 20 (рис. 1). Кольцо представляет собой втулку с нарезанными с



внутренней стороны канавками, являющимися концентраторами магнитного поля. Под действием последнего частицы МРЖ образуют структуры (за счет МР эффекта), вследствие чего локально меняется вязкость жидкости. Таким образом, регулируется ее поступление в цилиндры, за счет чего создается разность давлений в цилиндрах, которая заставляет шток совершать перемещение. Входной и выходной дроссели расположены внутри каждого гидравлического цилиндра привода. Нижним на рис. 1 показан входной дроссель (далее — первый), а выходной дроссель (далее — второй) показан верхним.

Катушки отделены друг от друга немагнитными кольцами, выполняющими роль магнитной изоляции, чтобы предотвратить взаимное влияние полей катушек. Главной задачей настоящего исследования стало выявление взаимного влияния катушек.

Для проведения расчета сформирована трехмерная упрощенная модель МР дросселя и проведено ее моделирование методом конечных элементов, особое внимание уделено распределению характеристик магнитного поля внутри рабочего зазора (рис. 2).

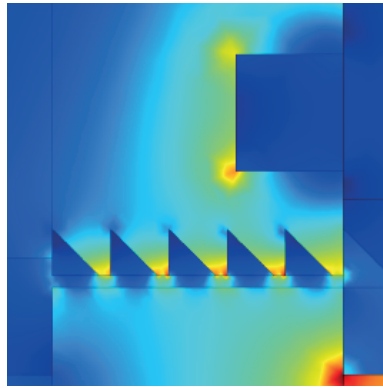


Рис. 2. Распределение полной магнитной индукции по зазору

С целью выявления взаимного влияния МР дросселей друг на друга необходимо провести анализ данных с одной из них при четырех способах включения катушек, потом с другой, снятие показаний всегда производится с исследуемой:

- 1) работает только одна катушка;
- 2) катушки работают в одной фазе;
- 3) катушки работают в противофазе;
- 4) работает только вторая катушка.

Сначала необходимо было задаться расчетным значением магнитной индукции, с которым впоследствии будут сравниваться прочие показания, после чего будет сделан вывод о значимости или незначимости влияния второй катушки на первую. В общем случае влияние первой катушки на вторую не равно влиянию второй на первую, поэтому придется оценивать влияние для каждой катушки по вышеприведенным способам их подключения.

Влияние было исследовано при максимальной плотности тока, поскольку максимальное влияние полей друг на друга проявилось при максимальных плотностях тока. В результате построения срезов магнитного поля в МР дросселе по зазору и зубцам (рис. 5) определено расчетное значение индукции в зазоре.

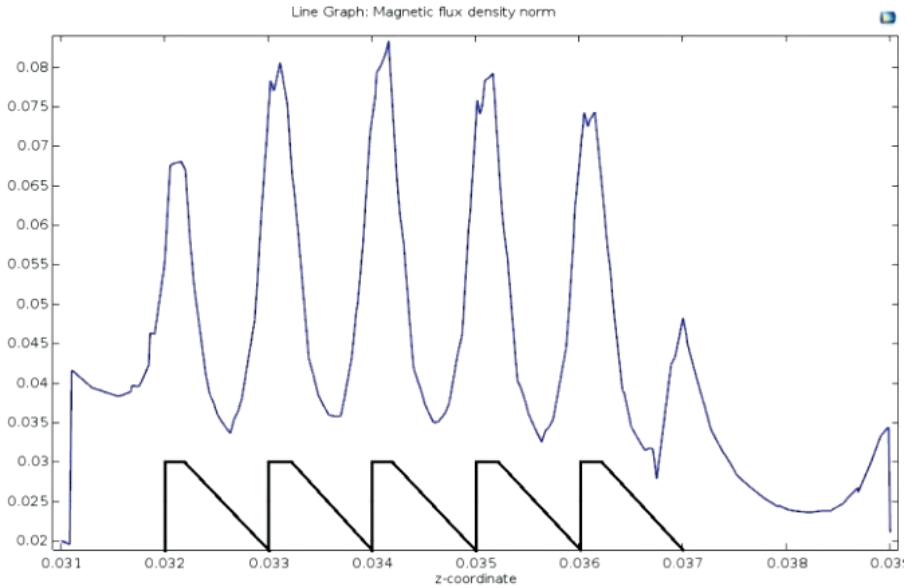


Рис. 3. Распределение магнитной индукции по одной из линий

В качестве расчетного значения было принято  $B_{расч1} = 0,0975$  Тл, после проведения аналогичных операций для второй катушки было получено  $B_{расч2} = 0,0932$  Тл. Для упрощения оценки были построены графики изменения полной магнитной индукции по ширине рабочего зазора первого (рис. 4) и второго (рис. 5) дросселей.

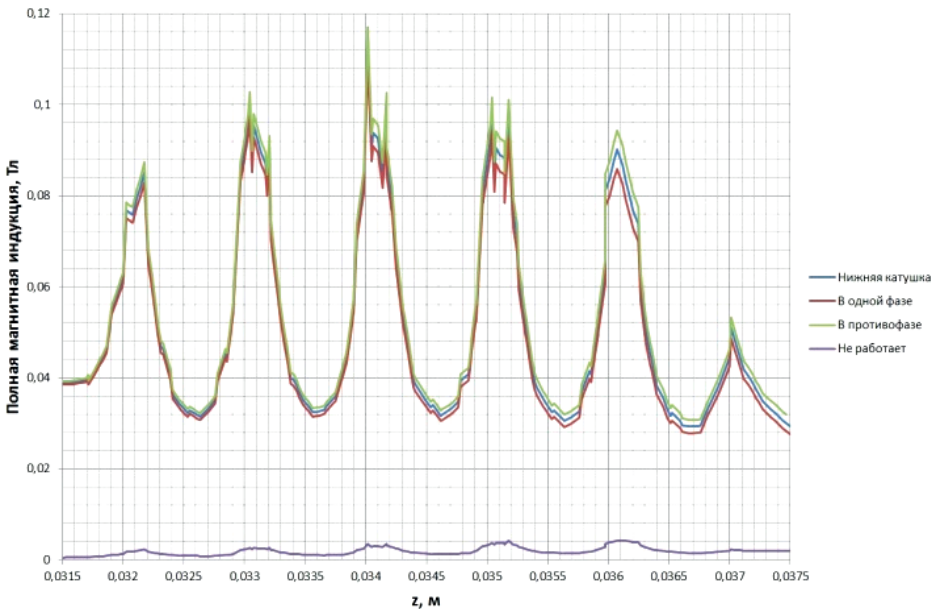


Рис. 4. Распределение магнитной индукции в зазоре первого дросселя

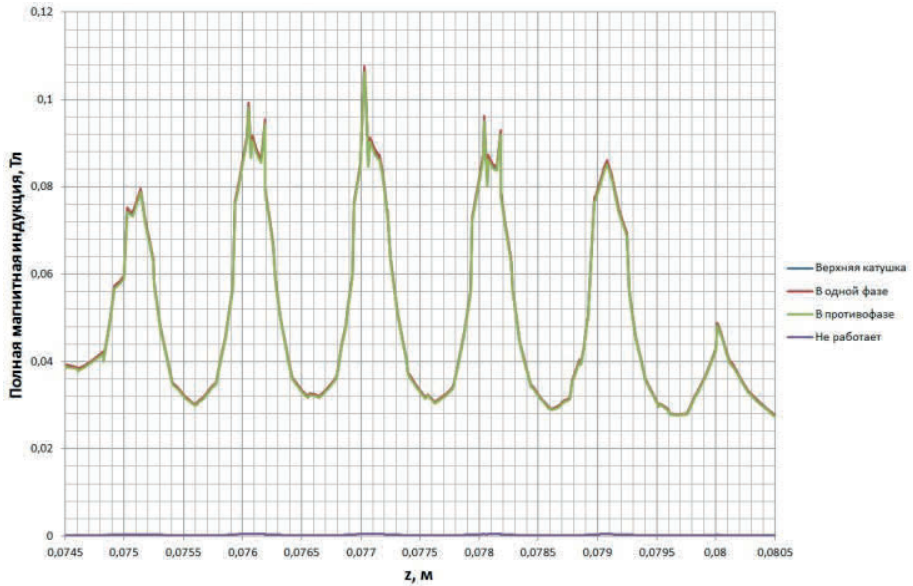


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в зазоре второго дросселя

В ходе анализа модели штока и моделирования магнитных процессов, в нем протекающих, было выявлено взаимное влияние полей, создаваемое катушками, выраженное в долях процентов от расчетных величин.

Влияние магнитных полей дросселей составило от 0,55 до 3,4% в зависимости от схемы подключения обмоток катушек. Влияние второй катушки на первую оказалось существеннее, чем первой на вторую. Поскольку предполагается, что МР привод будет позиционировать объекты с высокой точностью, необходимо учитывать вышеуказанное влияние в системе автоматического управления.

## Литература

- [1] Михайлов В.П., Базиненков А.М., Акимов И.Ю. Системы активной виброизоляции реологического типа. *Мат. XIII Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России»*. Москва, 2007, с. 150–158.
- [2] Борин Д.Ю. Магнитореологический механизм для позиционирования зеркал сверхбольших астрономических телескопов с нанометровой точностью. *Федеральная научно-техническая конференция творческой молодежи России по естественным, техническим, гуманитарным наукам: мат. конф.* Москва, МИЭМ, 2003, с. 115–117.
- [3] Михайлов В.П., Базиненков А.М., Борин Д.Ю., Акимов И.Ю. *Магнитореологическая позиционирующая и виброизолирующая система*. Пат. РФ 2443911, заявл. 2010128978/06, 14.07.2010; опубл. 27.02.2012. БИ № 6.

УДК 621.3

## Обеспечение теплоотвода в гибридно-пленочных интегральных схемах с помощью тонких пленок

© Журавлева Людмила Васильевна, Аверьянихин Артур Евгеньевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[fogel09@mail.ru](mailto:fogel09@mail.ru)

*Представлен метод обеспечения не только надежного крепления подложек в гибридно-пленочных интегральных схемах, но и интенсивного теплоотвода от навесных компонентов большой мощности с использованием тонких пленок. Тонкие пленки из меди с подслоем формируются в виде сегментов, что обеспечивает равномерное распределение припоя в результате локального лужения отдельных сегментов.*

**Ключевые слова:** гибридно-пленочная интегральная схема, подложка, тонкие пленки, крепление, теплоотвод, кристаллы, приклейка, сегментное лужение, пайка, технологичность.

Одним из основных конструктивных элементов гибридно-пленочных микросхем является подложка, на которую устанавливаются и монтируются компоненты и микросхемы [1]. Выбор метода крепления подложек на основания корпусов зависит от требований не только к надежности крепления, но и необходимости обеспечения интенсивного теплоотвода.

Объектом исследования является операция крепления подложек из поликора и ситалла на основания корпусов, в которые герметизируются изделия электронной техники, изготовленные по гибридно-пленочной технологии.

Целью работы является обеспечение эффективного теплоотвода от монтируемых на подложку навесных компонентов, выделяющих большое количество тепла.

Научная и практическая новизна работы заключается в применении сегментного лужения обратной стороны подложек с последующей их пайкой на основания корпусов. Для обеспечения условий лужения используются тонкие пленки меди толщиной 1...2 мкм.

Практическая ценность работы заключается в обеспечении технологичности операции крепления подложек на основания корпусов методом пайки.

**Подложки.** Подложка представляет собой квадратную или прямоугольную пластину стандартного размера, толщиной 0,2...1,6 мм, на которой размещаются навесные или пленочные компоненты, микросхемы, контактные площадки для монтажа и проводники. Сторона, на которой производят монтаж, является рабочей.

Материал подложки оказывает сильное влияние на параметры всей микросхемы, поэтому к нему предъявляются особые требования. Он должен обладать высоким удельным электрическим сопротивлением; быть механически прочным при небольших толщинах; быть химически инертным к осаждаемым веществам; иметь высокую физическую и химическую стойкость при нагревании до нескольких сотен градусов;

не выделять газов в вакууме; иметь термический коэффициент расширения, возможно близкий к термическому коэффициенту расширения осаждаемых слоев.

В настоящее время такого материала, который бы обладал комплексом всех перечисленных свойств, нет. Наиболее полно этим требованиям соответствуют некоторые типы стекол и керамики, например ситалл (СТ50-1), фотоситалл, поликор (99 %  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ ), электровакуумное стекло (С41-1), керамика (22ХС) [2, 3].

**Основные методы крепления подложек на основания корпусов.** Метод крепления подложек на основании корпуса, а также кристаллов и других компонентов на подложках зависит от выбора материала присоединительного слоя — клея, стекла, припоя и т. д. В свою очередь, материал присоединительного слоя должен обеспечивать эффективный отвод теплоты в подложку или корпус в зависимости от выделяемой мощности, хорошее согласование температурных коэффициентов расширения (ТКР) соединяемых элементов в широком диапазоне рабочих температур, стойкость к динамическим воздействиям в условиях воздействия вибраций и ударов. В отдельных случаях присоединительный слой должен быть электропроводным.

Эффективность отвода теплоты зависит, прежде всего, от удельной теплопроводности материала присоединительного слоя, а также его геометрии — толщины и площади. Наибольшее сопротивление имеют клеевые соединения (вследствие малого коэффициента теплопроводности). Так как перегрев кристалла, т. е. перепад температур в системе «кристалл-основание», зависит от мощности, выделяемой кристаллом, то присоединительные слои с большим тепловым сопротивлением могут применяться для компонентов, выделяющих малую мощность. Достаточно малые тепловые сопротивления имеют присоединительные слои на основе металлических припоев.

**Крепление подложек методом приклейки.** Клеевые соединения используют для микросхем и компонентов пониженной мощности. Технология клеевых соединений проста и может быть применена для широкого круга материалов (с использованием клеев на эпоксидной основе) и диапазона рабочих температур. Клеевые соединения стойки к вибрациям.

Приклеивание дает возможность соединять самые разнообразные материалы в различных сочетаниях (от больших до малых толщин), упрощать конструкцию узла, снижать расход металлов, не применять крепежной арматуры и припоев. Процесс склеивания легко поддается автоматизации, что делает его технологичным и заметно более дешевым по сравнению с другими видами крепления.

К недостаткам процесса приклейки следует отнести незначительную тепловую стойкость клеевых соединений, сравнительно низкую прочность, а также длительность технологического процесса (длительная выдержка при отверждении). Для клеевых соединений недопустимы длительные нагрузки, так как эти соединения склонны к ползучести (текучести).

Наиболее перспективными являются эпоксидные клеи, отверждающиеся без выделения побочных продуктов. Они универсальны, выдерживают кратковременный нагрев до 430 градусов. Прочность эпоксидных клеев почти не зависит от толщины клеевого слоя, что значительно упрощает их нанесение. Обычно адгезионные свойства таких клеев выше когезионных. Вследствие малой ползучести они деформируются под действием длительной нагрузки значительно меньше, чем другие клеи. Основным недостатком эпоксидных смол является высокий ТКР и пониженная теплопроводность, поэтому клеи на основе этих смол всегда содержат наполнители (металлические порошки — алюминиевая пудра, нитрид бора, волокнистые материалы и др.) [2].

Монтаж кристаллов и подложек, предназначенных для работы в герметизированных корпусах, возможен только теми клеями, которые не содержат активных компонентов, способных при температуре эксплуатации выделяться из клеевой прослойки и заполнять объем корпуса. В связи с этим широкое применение находят клеи марок ВК-2, ВК-4, ВК-8 и ВК-9.

Качество поверхности соединяемых элементов оказывает большое влияние на прочность клеевого слоя. Поэтому с поверхностями перед склеиванием тщательно удаляют загрязнения и жировые пленки, причем следы используемых органических растворителей должны быть полностью удалены сушкой. При отверждении клея остаточный растворитель создает пористость и внутренние напряжения, снижающие прочность слоя. Для удаления растворителей, входящих в состав клея, производят сушку на воздухе в течение 1–1,5 ч, после чего проводят термообработку в соответствии с выбранным режимом отверждения.

Прочность клеевого слоя в объеме зависит от совершенства структуры полимера. Количество дефектов увеличивается с толщиной слоя и прочность соединения падает. Рекомендуется слой ограничивать толщиной 0,05–0,1 мм. Точную дозировку по толщине и площади клеевого слоя обеспечивает применение пленочных клеев [3].

Процесс склеивания состоит из подготовки поверхностей соединяемых деталей, нанесения клея, его подсушивания (открытая выдержка) и отверждения клеевых соединений. Признаком чистой и хорошо смачиваемой поверхности является сохранение на ней сплошной пленки воды в течение 1...2 мин. Показателями качества клеевых соединений являются предел прочности при сдвиге и наличие дефектов при визуальном контроле. При монтаже подложек на основание корпуса контроль предела прочности на сдвиг не проводится.

**Пайка стеклами.** Пайка стеклами позволяет достичь хорошего согласования соединяемых материалов по ТКР, так как, варьируя состав стекла, можно изменять его ТКР в широких пределах. К легкоплавким стеклам относят обычно стекла, температура размягчения которых не превышает 550 °С. Для часто используемых сочетаний материалов «ковар – ситалл, поликор, кремний» требуются тугоплавкие стекла.

Технология пайки стеклом сводится к нанесению суспензии (пасты) стеклянного порошка в деионизованной воде на очищенную поверхность, сжатую соединенных деталей в приспособлении-кассете, сушке и последующему оплавлению в печи в контролируемой атмосфере.

**Крепление подложек методом пайки.** Пайка металлическими сплавами обеспечивает высокую электропроводность соединения, механическую прочность, хорошее согласование по ТКР. Существенное влияние на процесс пайки оказывает состояние поверхности паяемых материалов. Для получения механически прочного соединения необходимо, чтобы место пайки было тщательно очищено от грязи, жиров, продуктов коррозии и окисных пленок, которые сильно мешают растеканию припоя. Очистка деталей достигается различными способами: обезжириванием, травлением, полированием, промывкой в воде и отжигом в восстановительной атмосфере или в вакууме.

В качестве присоединительного слоя используются мягкие припои в виде пасты, которую наносят на обратную сторону подложки трафаретным способом, или в виде фольги припоя. Фольгу припоя фиксируют на поверхности основания корпуса с помощью флюса. Для обеспечения адгезии на обратную сторону подложки наносят сплошную тонкую пленку меди (1...2 мкм) с подслоем хрома. В процессе оплавления в инертной среде образуется паяное соединение.

Основным недостатком такого метода пайки является то, что из-за наличия сил поверхностного натяжения слой полуды принимает выпуклую форму. Характерным дефектом такого паяного соединения при монтаже подложек являются непропаи по периметру подложки и трещины в подложке по углам (рис. 1) [4].

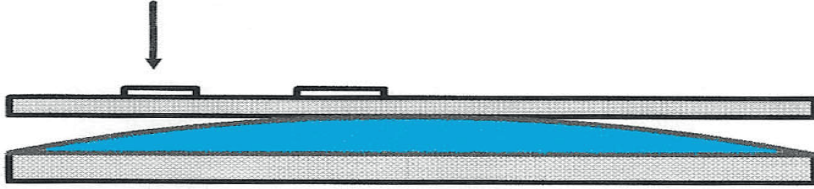


Рис. 3. Пайка подложки со сплошной металлизацией

Для обеспечения равномерного по всей поверхности паяного соединения предлагается использовать сегментное лужение обратной стороны подложки. Для этого на обратной стороне подложки с помощью фотолитографии формируется сегментная тонкая пленка меди. Металлизированная таким способом подложка после очистки облуживается погружением в расплавленный припой. При сегментном лужении припой осаждается только на металлизированных участках подложки (сегментах). При этом методе основным недостатком лужения является незначительная разновысотность припоя на различных сегментах поверхности подложки (рис. 2), однако это не влияет на качество паяного соединения.

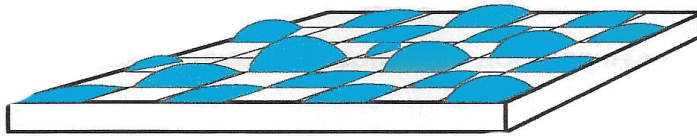


Рис. 4. Сегментное лужение обратной стороны подложки

Качество лужения оценивается визуально под микроскопом при 16-ти кратном увеличении. Пайка подложек может проводиться с помощью неподвижного источника тепла (стационарный нагреватель) или подвижного источника тепла (конвейерные печи) в инертной среде.

Из результатов анализа различных методов крепления подложек на основания корпусов различных конструкций следует, что для обеспечения надежного крепления и интенсивного теплоотвода целесообразно использовать пайку с предварительным лужением подложек с сегментными тонкими пленками.

#### Литература

- [1] Гимпельсон В.Д. *Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники*. Москва, Машиностроение, 1976, 328 с.
- [2] Журавлева Л.В. *Электроматериаловедение: учебник для нач. проф. образования*. Москва, Издательский центр «Академия», 2013, 352 с.

- [3] Меркулов А.И., Меркулов В.А. *Основы конструирования интегральных микросхем: учеб. для студентов вузов*. Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013, 270 с.
- [4] Егоркин К.С., Кулик Д.В. Методы крепления подложек на основания корпусов в технологии производства электронной аппаратуры. *Сб. науч. тр., 16-я Молодежная междунар. науч.-техн. конф. «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы»*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–25 апреля 2014 г.

УДК 621.391

## Адаптер для передачи адреса и данных из общей шины в q-шину аппаратуры радиопеленгационной системы

© Журков Александр Петрович, Демин Алексей Анатольевич,  
Силаев Владимир Михайлович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[fizmail@inbox.ru](mailto:fizmail@inbox.ru)

*Исследованы взаимодействия общей шины и q-шины аппаратуры местного диспетчерского пункта распределенной радиопеленгационной системы наблюдения, представлены функциональная схема адаптера и временные диаграммы его работы.*

**Ключевые слова:** передача данных, радиоаппаратура, радиопеленгация, шины.

Путем радиопеленгации источника с двух и более удаленных друг от друга точек можно определить местоположение источника излучения путем триангуляции. Аппаратура наземной локальной радиопеленгационной системы (АРПС) состоит из аппаратуры местного диспетчерского пункта (АМДП), каналов связи и аппаратуры пеленгаторных позиций (АПП), которые в зависимости от условий размещения могут быть удалены от АМДП на расстояния до 200 км и являются необслуживаемыми [1–4].

Адаптер 1 входит в состав блока АМДП [2] распределенной радиопеленгационной системы наблюдения и предназначен для передачи адреса и данных из «общей шины» в «q-шину» и передачи данных из q-шины в общую шину, а также для формирования и выдачи контрольных разрядов в q-шину.

Технические характеристики адаптера 1:

1. напряжение питания  $+(5 \pm 0,35)$  В;
2. потребляемый ток не более 1,5 А.

Функциональная схема адаптера 1 приведена на рис. 1. В состав функциональной схемы входят: мультиплексор MUX; схема свертки по модулю 2-M2; магистральные приемники ИЛИ 1, ИЛИ 2, ИЛИ 4; магистральные передатчики 1, 2, 3; приемник ИЛИ 3.

Адаптер функционирует следующим образом: магистральные приемники ИЛИ 1, ИЛИ 2 принимают из общей шины адреса и данные соответственно. С выходов магистральных приемников ИЛИ 1, ИЛИ 2 информация поступает соответственно на адресные входы А и на информационные входы D мультиплексора MUX. Мультиплексор переключается сигналом «Адрес/данные», который поступает с платы адап-



тера 2. Вход мультиплексора MUX соединен со входом магистрального передатчика &2. С выхода магистрального передатчика &2 информация при наличии сигнала «Прием/выдача» передается в магистраль КА/D [15...00]. Прием и выдача данных из q-шины осуществляется через приемник ИЛИ 4 и передатчик &1. Режим работы определяется сигналом «Прием/выдача». Контрольные разряды формируются на выходе схемы M2 и через магистральный передатчик &3 передаются в q-шину.

Сигналы интерфейсов, используемые в схеме адаптера 1, приведены в таблице.

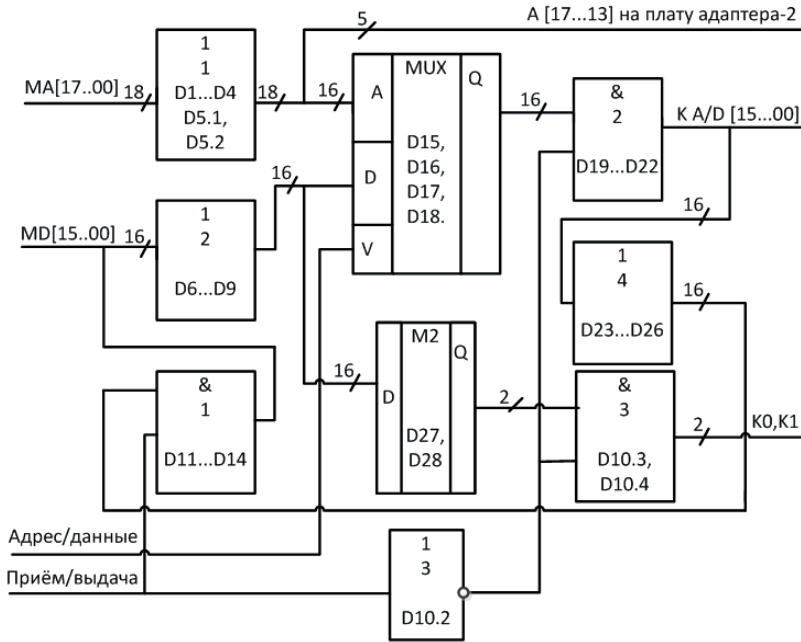


Рис. 1. Функциональная схема адаптера 1

**Сигналы интерфейсов адаптера**

Наименование сигнала	Обозначение	Наименование сигнала	Обозначение
Синхронизация задатчика	CX3 (H)	Ввод данных, Вывод данных	K Ввод (H), K Вывод (H)
Синхронизация исполнителя	CXH(H) x(H)	Сигнал синхронизации активного устройства	K СИА (H)
Подшина данных	D[15...00]	Сигнал синхронизации пассивного устройства	K СИП (H)
Управление	Управл [I]	Вывод байта	K Байт (H)
Занято	Зан (H)	Требование прерывания	ТПР (H)
Прерывание	Прерыв	Предоставление прерывания	K ППР (H)
Запрос передачи	Зп (H)	Выбор внешнего устройства	K ВУ (H)
Разрешение передачи	РПВ	Линия адреса данных	A/D[15...00]
Подтверждение выборки	ПВБ (H)	Подшина адреса	A[17...00]

Адресные сигналы шины MA/Df...MA/DOO поступают на входы А мультиплектора MUX через магистральные приемники (D1, D2, D3, D34, D 5.1, D5.2). Данные из магистрали D[15...00] передаются на входы D мультиплектора MUX через магистральные приемники (D6, D7, D 8, D9). В качестве мультиплектора MUX используются микросхемы (D15, D16, D 17, D18). Схемы свертки по модулю два используются (D27, D28). С выходов мультиплектора сигналы передаются на шину KA/D [15...00] через магистральные передатчики (D 19, D 20, D 21, D 22). Для приема и передачи данных из шины KA/D [15...00] в шину MD [15...00] используются магистральные передатчики (D23, D 24, D 25, D 26, D10, D11, D 12, D 13, D 14).

Временные диаграммы, поясняющие работу адаптера в режимах «Ввод», «Вывод» и «Прерывание», приведены на рис. 2.

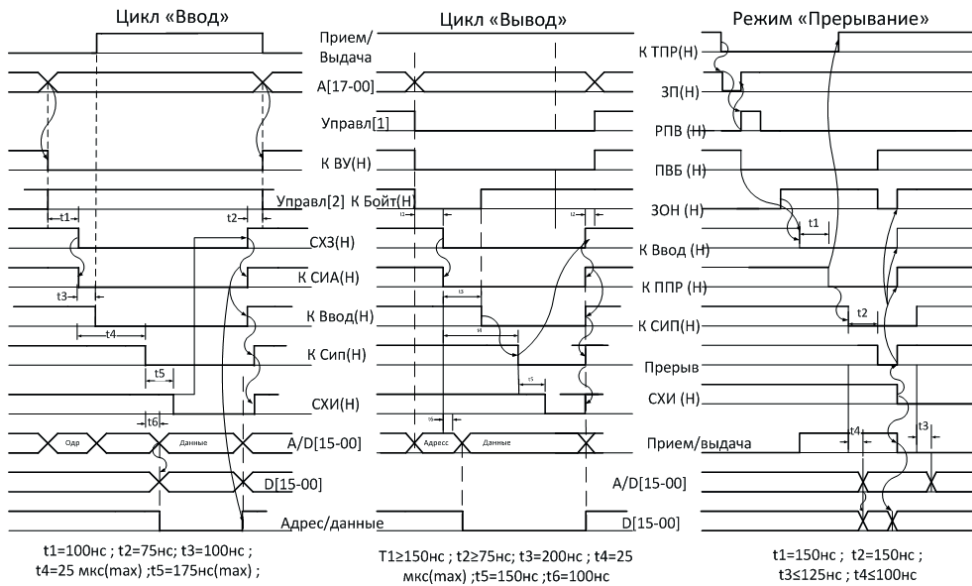


Рис. 2. Временные диаграммы работы адаптера 1

Адаптер 1 реализован в радиопеленгационной системе Нива [5] и обеспечивает взаимодействие и передачу адреса и данных между общей шиной в q-шине АМДП РПС.

### Литература

- [1] Журков А.П. Обзор российских патентов по радиопеленгации. *Науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского: Мат. конф.* Москва, МИЭМ НИУ ВШЭ, 2015, с. 217–218.
- [2] Аминев Д.А., Журков А.П., Козырев А.А., Увайсов С.У. Алгоритмы работы программного обеспечения микропроцессорных систем контроля аппаратуры пеленгаторной позиции. *Тр. НИИР.* Москва, 2014, №3, с. 11–17.
- [3] Аминев Д.А., Журков А.П., Увайсов С.У. Рекомендации по построению системы контроля и диагностики узлов аппаратуры обработки радиопеленгационной информации. *Сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. «Радиовысотометрия — 2013».* Екатеринбург, 2013, с. 291–294.

- [4] Uvaysova S.S., Uvaysova A.S., Lvov B.G., Zhurkov A.P. Ensure maintainability direction finder positions. Innovative Information Technologies: *Materials of the International scientific-practical conference*. Ed. by S.U. Uvaysov. Part 3. Moscow, HSE, 2014, pp. 164–166.
- [5] Aminev D.A., Zhurkov A.P. Radio direction finding system «NIVA» and requirements to ensure its diagnostic control. *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: мат. междунар. науч.-техн. конф.* Отв. ред. И.А. Иванов; под общ. ред. С.У. Увайсов. Москва, МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014, pp. 453–455.

УДК 381.04

## **Интегральная методика оценки показателей технологичности конструкций электронной аппаратуры при реализации синхронных технологий управления проектами**

© Карпунин Алексей Александрович, Лавров Алексей Васильевич,  
Макушина Наталья Владимировна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[AlexK811@yandex.ru](mailto:AlexK811@yandex.ru)

*Рассмотрены особенности реализации синхронных технологий управления проектами применительно к созданию изделий электронной техники. Основное внимание уделено вопросам проектирования технологического процесса сборки и монтажа радиоэлектронной аппаратуры. Представлены рекомендации по реализации синхронных технологий формализации и обработки данных (ТУ и технических требований, комплекта конструкторской документации, программы выпуска и т. д.). Основное внимание уделено интегральным методам анализа технологичности конструкции, определяющим пригодность аппаратуры к заданному объему выпуска продукции.*

**Ключевые слова:** производственные системы, синхронные технологии, управление проектами, технологическая подготовка производства, технологичность, электронная аппаратура.

Под **технологичностью конструкции** понимают совокупность ее свойств, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технологической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте, по сравнению с соответствующими показателями конструкций изделий аналогичного назначения при обеспечении заданных показателей качества [1–4].

Согласно стандартам ЕСТПП различаются два основных вида технологичности конструкции [5]:

- производственная, которая обеспечивается сокращением затрат труда, средств и времени на технологическую подготовку производства и на процесс изготовления изделия;

• эксплуатационная, которая проявляется в сокращении затрат труда, средств и времени на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Вид изделия, тип производства и уровень развития науки и техники являются главными факторами, определяющими требования к технологичности конструкции изделия. Для оценки технологичности конструкции используются многочисленные показатели, которые делятся на качественные (дифференциальные) и количественные (интегральные). К качественным показателям относят: взаимозаменяемость, регулируемость, контролепригодность и инструментальную доступность конструкции. Количественные показатели технологичности конструкций:

- базовые (исходные) показатели, регламентируемые отраслевыми стандартами;
- показатели, достигнутые при разработке изделий;
- показатели уровня технологичности конструкции, определяемые как отношение показателей технологичности разрабатываемого изделия к соответствующим значениям базовых показателей.

Номенклатура показателей технологичности конструкций выбирается в зависимости от вида изделия, специфики и сложности конструкции, типа производства и стадии разработки конструкторской документации.

**Методика оценки базовых показателей технологичности.** Интегральная методика позволяет по ограниченному набору базовых показателей технологичности получить комплексную суммарную оценку блоков устройств, дифференциальная методика использует более широкий набор коэффициентов и оценивает технологичность отдельных элементов конструкции [6–7]. Особую важность выбор методики имеет при реализации процедур визуального синтеза производственного процесса с использованием методик структурно-функционального анализа [8–13].

Базовые показатели технологичности блоков устройств в соответствии со стандартом отраслевой системы технологической подготовки производства ОСТ 4ГО.091.219–81 «Методы количественной оценки технологичности конструкций изделий РЭА» определяются для четырех основных групп: электронных, радиотехнических, электромеханических и коммутационных.

Таблица 1

**Базовые показатели технологичности**

Порядковый номер частичного показателя технологичности в ранжированной последовательности	Весовая характеристика, $\varphi_i$
1	1,0
2	1,0
3	0,8
4	0,5
5	0,3
6	0,2
7	0,1

Затем на основании расчета всех показателей вычисляют комплексный показатель технологичности по формуле

$$K = \frac{\sum K_i \varphi_i}{\sum \varphi_i},$$

где  $K_i$  — частичные  $i$  показатели (коэффициенты) технологичности.

Состав показателей технологичности

Номер показателя	Частичный коэффициент (показатель) технологичности	Обозначение	Весовая характеристика $\phi_i$
1	Применение микросхем и микросборок	$K_{мс}$	1,0
2	Автоматизации и механизации монтажа	$K_{ам}$	1,0
3	Автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу	$K_{мп\ эрэ}$	0,8
4	Автоматизации и механизации регулировки и контроля	$K_{арк}$	0,5
5	Повторяемости ИЭТ	$K_{повт}$	0,3
6	Применения типовых ТП	$K_{ТП}$	0,2
7	Прогрессивности формообразования	$K_{ф}$	0,1

Значение коэффициента технологичности находится в пределах  $0 < K < 1$ .

К **электронным устройствам и блокам** относятся логические и аналоговые блоки оперативной памяти, блоки автоматизированных систем управления и электронно-вычислительной техники, где число ИМС больше или равно числу ЭРЭ. Состав показателей технологичности для них в ранжированной последовательности приведен в табл. 2. Для каждого блока рассчитывают не более семи показателей технологичности, каждый из которых имеет свою весовую характеристику. Величина весовой характеристики зависит от порядкового номера частного показателя в ранжированной последовательности.

**Концепция обеспечения технологичности в условиях синхронных технологий проектирования.** Для повышения технологичности конструкций устройств в условиях синхронных технологий проектирования необходимо выполнение следующих мероприятий:

**А. Совершенствование конструкции блоков путем:**

- 1) расширения использования ИМС, микросборок, функциональных элементов;
- 2) увеличения сборности конструкции за счет использования базовых несущих конструкций (БНК);
- 3) увеличения количества деталей, изготовленных прогрессивными способами формообразования;
- 4) обоснования выбора качеств точности, шероховатости поверхности;
- 5) рациональной компоновки элементов на плате, что обеспечивает автоматизированную сборку и монтаж;
- 6) минимизации числа подстроечных и регулировочных элементов.

**В. Совершенствование технологических процессов:**

- 1) автоматизацией подготовки элементов к монтажу;
- 2) совершенствованием ТП сборки и монтажа;
- 3) автоматизацией операций контроля и настройки;
- 4) применением прогрессивных методов формообразования.

Таким образом, предложенная концепция управления технологичности изделий электронной техники в условиях реализации синхронных технологий проектирования является актуальной и предоставляет возможность на этапах освоения серийного производства автоматизировать систему управления технологичностью электронных средств. Посредством предложенной методики оценивается технологичность конструкции и показывается конструктивно-технологическое совершенство изделия на каждом этапе разработки и технологической подготовки производства.

## Литература

- [1] Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В. и др. *Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств*. Под общ. редакцией В.А. Шахнова. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005, 568 с. (Серия «Информатика в техническом университете»).
- [2] Гриднев В.Н., Гриднева Г.Н. *Проектирование коммутационных структур электронных средств*: учеб. пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 342 с. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств»: в 25 кн.; кн. 7).
- [3] Маркелов В.В., Кабаева А.С. *Управление качеством электронных средств*: учеб. пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 272 с. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств»: в 25 кн.; кн. 2).
- [4] Адамова А.А., Адамов А.П., Ирзаев Г.Х. *Методологические основы обеспечения технологичности электронных средств*. Санкт-Петербург, Политехника, 2008.
- [5] Хенке Х.-И., Фабиан Х. *Технология производства радиоэлектронной аппаратуры*. под ред. В.Н. Черняева. Москва, Энергия, 1980, 464 с.
- [6] Адамова А.А., Власов А.И. Визуальное моделирование адаптации подготовки производства к выпуску новой продукции. *Информационные технологии в промышленности и производстве*, 2014, № 2, с. 46–56.
- [7] Власов А.И. Системный анализ технологических процессов производства сложных технических систем с использованием визуальных моделей. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2013, № 10, ч. 2, с. 17–26.
- [8] Власов А.И. Пространственная модель оценки эволюции методов визуального проектирования сложных систем. *Датчики и системы*, 2013, № 9, с. 10–28.
- [9] Маркелов В.В., Власов А.И., Зотьева Д.Е. Управление и контроль качества изделий электронной техники. Семь основных инструментов системного анализа при управлении качеством изделий электронной техники. *Датчики и системы*, 2014, № 8, с. 55–67.
- [10] Ирзаев Г.Х., Адамова А.А. Автоматизация процесса формирования системы показателей для оценки технологичности конструкции изделия. *Автоматизация. Современные технологии*, 2014, № 11, с. 27–33.
- [11] Адамова А.А., Адамов А.П. Многоуровневая модель формирования технологичности электронных средств на этапах проектирования и производства. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 11 (23), с. 12.
- [12] Адамов А.П., Ирзаев Г.Х., Адамова А.А. К проблеме автоматизированной количественной оценки технологичности современных электронных средств. *Проектирование и технология электронных средств*, 2006, № 1, с. 19–22.
- [13] Маркелов В.В., Власов А.И., Зотьева Д.Е. Функциональная визуальная модель контроля качества ЭС. *Проектирование и технология электронных средств*, 2014, № 1, с. 25–30.

УДК 658.012

## **Организация управления автоматизированным инструментом персонального цифрового производства**

© Колесников Максим Андреевич<sup>1</sup>, Юдин Антон Владимирович<sup>1</sup>,  
Кузнецов Владимир Евгеньевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Россия, г. Москва, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

[skycluster@gmail.com](mailto:skycluster@gmail.com)

*Рассматриваются вопросы внедрения технологий персонального цифрового производства. Основное внимание уделено вопросам подготовки технологической базы для массового развития станкостроения любительского уровня. На примере нескольких типичных современных станков описан подход к организации интерфейса управления приводами автоматизированного станка, с целью показать возможность упрощения создания новых вариантов подобных производственных машин (уменьшение сложности и сроков разработки).*

**Ключевые слова:** управление, интерфейс, робот, цифровое производство, автоматизация.

Промышленное конвейерное массовое производство в последние годы все чаще перестает быть единственной альтернативой для создания доступной и востребованной продукции. С развитием электроники и электронной техники стало возможно создавать конкурентоспособные, относительно недорогие станки и устройства, отвечающие индивидуальным потребностям покупателя. Ожидается, что в недалеком будущем эта тенденция образует устойчивый сегмент рынка персонального цифрового производства [1–3].

Сегодня по всему миру множатся лаборатории цифрового производства, в которых пока еще немногие счастливицы имеют возможность апробировать новые подходы к разработке и производству. Использование компактных станков и относительно дешевых материалов дает возможность по-новому взглянуть не только на производство, но и на обучение. Возможность не только спроектировать и изготовить деталь, но и создать необходимый для этого инструмент, оснастку или даже высокоточный станок делает подобные заинтересованные лаборатории фундаментальными атомами экономики будущего. Успешное внедрение персонального цифрового производства в рамках страны станет сильнейшим толчком к развитию малого и среднего предпринимательства.

Нашей целью является создание технологической базы для развития станкостроения любительского уровня.

**Концепция управления станком персонального цифрового производства.** В настоящее время большинство автоматизированных станков требуют особого обращения и зачастую недоступны пользователю без специального обучения. Будь то

большие производственные установки или небольшие станки, используемые в частных целях, их управление осуществляется микроконтроллерами, исполняющих G-коды. Подобная организация управления станком при всей кажущейся универсальности и правильности подхода в реальности приводит к тому, что интерпретатор G-кодов одного станка отличается (а часто значительно) от интерпретатора другого. Эта разница архитектур к тому же дополняется специфической реализацией G-кодов в понимании разработчика, а иногда и определяется самим аппаратным обеспечением.

Суть предлагаемого подхода сводится к переходу от архитектуры G-кодов, доставшейся нам в наследство от бурного расцвета массовой промышленности и автоматизации прошлого века, к новой организации управления производственной машиной, которая сможет достойно ответить на ожидающиеся многочисленные вызовы создания подобных машин разными людьми. Если раньше номенклатура станков была относительно мала и ограничения G-кодов оставались внутри специальных производственных помещений, то с наступлением эры цифрового производства данное ограничение необходимо снять.

Для отказа от исчерпавшего себя подхода необходимо в первую очередь создать аппаратно-программную платформу, позволяющую программно описывать и аппаратно реализовывать кинематику исполнительных приводов станка. Подобный универсальный интерфейс управления позволил бы по крайней мере упростить программирование перемещений инструмента за счет единого редактора перемещений для всех станков, исполненных на подобной платформе.

**Примеры кинематики типовых станков.** В качестве примера типового цифрового инструментального оборудования рассмотрим комплекс Makelangelo (рис.1), позволяющий создавать изображения на вертикальной плоскости. Устройство имеет дружественный пользователю простой в освоении интерфейс управления, доступно описанный на сайте разработчика [4].

Устройство работает в одной плоскости. Считая ее в декартовой системе координат, перемещение по оси  $Y$  осуществляется встречным вращением шаговых двигателей, а по оси  $X$  — синхронным (двигатели вращаются в одну сторону).

Кинематические уравнения, описывающие данную систему, имеют вид

$$l_X = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad l_Y = \sqrt{(AB - x)^2 + y^2},$$

где  $l_X$  и  $l_Y$  — расстояния от левого и правого двигателей соответственно, определяющие точку с координатами  $(X; Y)$ ;  $AB$  — расстояние между двигателями, определяемое пользователем.

Устройство по воспроизведению виртуальных изображений на материальной плоскости [5, 6] (рис. 2). Для воспроизведения изображений предлагается интегрировать в структуру цифрового производства простейший комплекс, имеющую структуру, похожую на пример из предыдущего пункта, однако более компактно, не ограничено одной рабочей плоскостью и вместо изменения длины направляющих менять угол их поворота.

Кинематические схемы устройств из пунктов 1 и 2 во многом схожи, так что имеется возможность ограничиться подробным рассмотрением только одной из них. Основная работа устройства происходит в плоскости  $XU$  и обеспечивается работой двигателей (рис. 3). Ось  $Z$  является неосновной и описывает перемещение инструмента при его подаче к основной рабочей плоскости, осуществляется с помощью двигателя.



Данное устройство также имеет интерфейс управления, позволяющий создавать изображения и выбирать режим работы (в том числе использовать различные инструменты [5]). Аналогично с предыдущим примером: перемещение по оси  $Y$  осуществляется встречным вращением сервоприводов, а по оси  $X$  — синхронным.

Кинематические уравнения для данной системы:

$$\arctg \frac{y}{x} = \alpha; \quad \arctg \frac{y}{XY - x} = \beta,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — углы поворота левого и правого двигателей соответственно, определяющие точку с координатами  $(X; Y)$ ;  $AB$  — расстояние между двигателями, определяемое пользователем.

Интерфейс содержит средства синхронизации виртуальных узлов с их механическими эквивалентами посредством идентификационного номера, присвоенного каждому узлу, а также дает возможность задавать пользовательские рабочие параметры (расстояние между узлами).

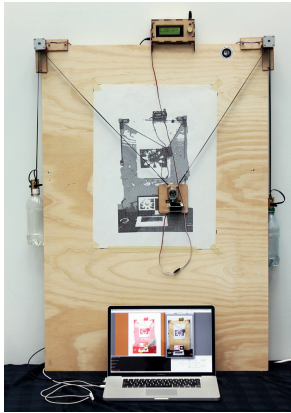


Рис. 1. Станок Makelangelo

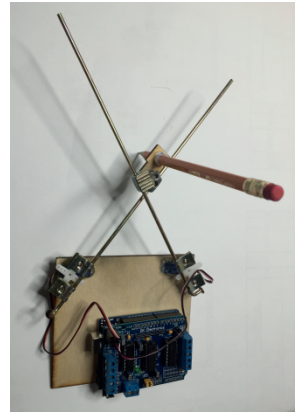


Рис. 2. Устройство рисования

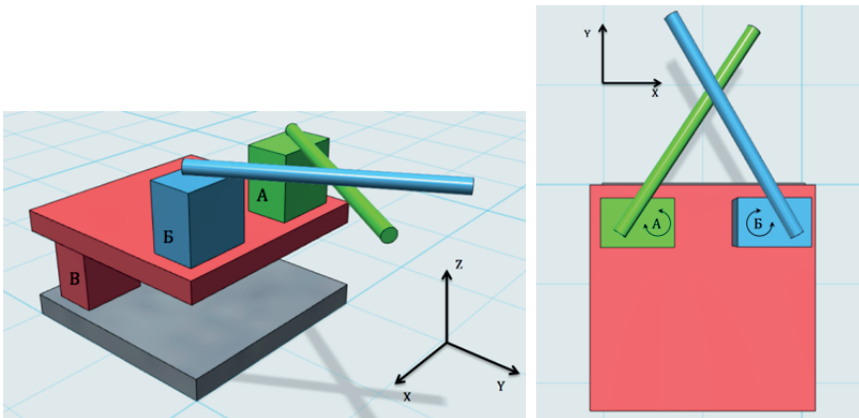


Рис. 3. Кинематическая схема

Открытое устройство 3DOF Palletizing Robot (рис. 4) также позволяет создавать различные изображения или надписи на плоскости, однако в отличие от устройств рассмотренных выше, кинематика данного аппарата сложнее, что видно из конструкции устройства [7].

Непосредственно робо-рука состоит из двух плеч, каждое из которых управляется шаговым двигателем. Рука закреплена на вращающейся платформе, приводимой в движение мотором (рис. 4).

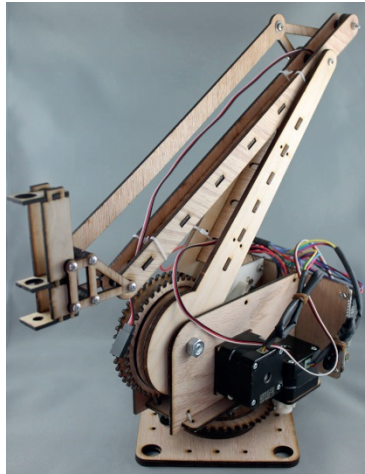


Рис. 4. Робо-рука Marginally Clever

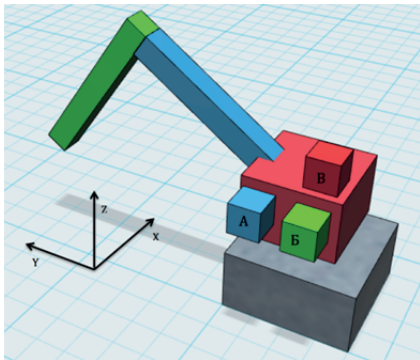


Рис. 5. Кинематическая схема (изометрия)

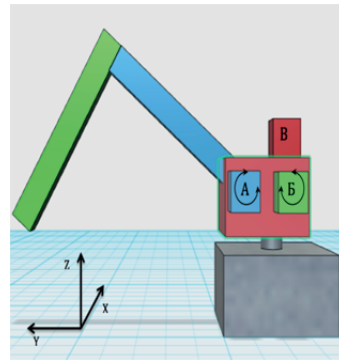


Рис. 7. Кинематическая схема

Кинематические формулы:

$$Y = \arctg \frac{y}{x} \text{ (угол поворота платформы в плоскости } XY\text{);}$$

$$\alpha = \arcsin \frac{b}{2R} \text{ (угол наклона правого плеча относительно плоскости } XY\text{);}$$

$$\beta = \arcsin \frac{r}{2R} \text{ (угол наклона левого плеча относительно синего);}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2},$$

где  $R(r)$  — радиус описанной окружности вокруг треугольника, составленного плечами робо-руки.

Дальнейшую работу планируется вести в направлении осуществления модульной реализации устройства рисования (рис. 2), создания необходимого программного обеспечения для его управления.

Интерфейс управления данного устройства содержит средства синхронизации виртуальных узлов с их механическими эквивалентами, посредством идентификационного номера, присвоенного каждому узлу, а также возможность задавать пользовательские рабочие параметры (расположение узлов в пространстве). Таким образом, разрабатывается настраиваемая конфигурация виртуальных узлов [8], которая может быть перенесена и на другие производственные машины (рис. 1), даже значительно отличающиеся кинематикой работы (рис. 4).

### Литература

- [1] Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В. и др. *Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств*. Под общ. ред. В.А. Шахнова. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 568 с. (Серия «Информатика в техническом университете»).
- [2] Гриднев В.Н., Гриднева Г.Н. *Проектирование коммутационных структур электронных средств*: учеб. пособие. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 342 с. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств»: в 25 кн.; кн. 7).
- [3] Арабов Д.И., Власов А.И., Гриднев В.Н., Зотьева Д.Е., Маркелов В.В. FAV-LAB-Технологии быстрого прототипирования изделий электронной техники. *Современные научные исследования: методология, теория, практика* — материалы II Международной научно-практической конференции. Нижний Новгород, Центр содействия развитию научных исследований, 2014, с. 162–179.
- [4] Сайт разработчика makelangelo. URL: <http://www.makelangelo.com>.
- [5] Арабов Д.И., Малышев К.А. Программно-аппаратный комплекс терморегулирования экструдера многофункционального фабрикатор. *Сб. трудов 15-й междунар. конф. «Научные технологии и интеллектуальные системы — 2013»*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–25 апреля 2013, с. 301–305.
- [6] Колесников М.А. Аппаратно-программный комплекс по воспроизведению виртуальных изображений на материальной плоскости. *Сб. трудов 17-й международной конференции «Научные технологии и интеллектуальные системы — 2015»*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 22–23 апреля 2015, с. 355–361.
- [7] *Конструкция устройства 3DOF Palletizing Robot*. URL: [http://learn.marginallyclever.com/index.php/Arm3\\_v1](http://learn.marginallyclever.com/index.php/Arm3_v1).
- [8] Vlasov A., Yudin A. Distributed Control System in Mobile Robot Application: General Approach, Realization and Usage. *Communications in Computer and Information Science*, 2011, vol. 156, pp. 180–192.

УДК 621.317.3

## Разработка стенда диагностики электрооборудования вагонов-цистерн

© Саченко Екатерина Алексеевна, Кузьменко Александр Васильевич

Россия Федерация, г. Брянск, Научно-производственное объединение  
«Электронтехника»

[kittie-kat@ya.ru](mailto:kittie-kat@ya.ru), [et32@et.ru](mailto:et32@et.ru)

*Предлагается стенд диагностики электрооборудования вагонов-цистерн для перевозки расплавленных химических продуктов, который позволит повысить качество диагностики и упростить технологию обслуживания вагонов-цистерн за счет автоматизации процесса сбора данных. Представлено структурно-функциональное описание стенда, приведена схема обмена стенда с базой данных результатов диагностики. Приведен сравнительный анализ характеристик существующих средств диагностики электрооборудования вагонов-цистерн и предлагаемого устройства.*

**Ключевые слова:** вагоны-цистерны для перевозки расплавленных химических продуктов, диагностика электрооборудования вагонов-цистерн.

Вагоны-цистерны с электроподогревом используются для перевозки расплавленных химических продуктов — жидкого пека, расплавленной серы, битума [1]. Перед погрузкой вагоны-цистерны проходят технический осмотр с целью проверки целостности и пригодности к дальнейшей эксплуатации. Помимо проверки исправности механических соединений, автотормозной и автосцепной частей, оценки состояния котла в осмотр входит проверка электрооборудования вагона-цистерны (ЭОВЦ).

ЭОВЦ представляет собой систему трубчатых электронагревателей (ТЭН), предназначенных для подогрева котла в пунктах слива-налива подвижного состава. ТЭН объединены в съемные секции и размещены в специальных нишах под котлом цистерны. Подключение электрооборудования к сети промышленного переменного тока напряжением 380 В осуществляется с панели управления [1].

Традиционные методы диагностики предусматривают следующие виды проверок: оценка исправности системы обогрева, проверка изоляции и прозвонка предохранителей. Для проверки исправности системы электрообогрева ее включают на 10–15 мин и оценивают суммарный ток потребления каждой группы ТЭН. При исправности не менее 75 % ЭОВЦ он составляет от 300 до 420 А. Для проверки изоляции применяется мегомметр типа М1101 с напряжением 1000 В, а для прозвонки предохранителей — стандартный омметр со щупами [2].

Существующая система диагностики ЭОВЦ, эксплуатируемая транспортными компаниями России и стран СНГ, реализована в виде стационарного пункта разогрева, оснащенного трехфазными амперметрами. Вагон-цистерна передвигается к пункту разогрева, где ЭОВЦ подключается к силовой сети с применением переносимых силовых кабелей. После разогрева ТЭН производятся необходимые измерения с руч-

ной регистрацией результатов в журнале проведения работ. Такая система диагностики имеет ряд недостатков: привязка к месту размещения пункта проверки; высокая трудоемкость выполнения работ по диагностике; большие затраты энергоресурсов; высокий риск производственного травматизма; отсутствие возможности автоматизированного сбора данных измерений.

В связи с этим актуальной является задача разработки простого и безопасного мобильного устройства для комплексной диагностики ЭОВЦ с возможностью автоматизированного сбора данных результатов измерений. Целью настоящей работы является разработка структуры и функционала стенда диагностики ЭОВЦ (СДЭОВЦ).

Функциональная схема СДЭОВЦ представлена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: ИТ — источник тока, УН — усилитель напряжения, ИН — источник напряжения, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ЧРВ — часы реального времени, АБ — аккумуляторная батарея, ПЗС — прибор звуковой сигнализации (динамик), ДТ — датчик температуры, ИК «ТЭНЫ» — измерительный канал цепей секций ТЭН, ИК «Изоляция» — измерительный канал цепей изоляции ТЭН и термореле, ИК «Термореле» — измерительный канал цепей управления термореле, ИК «Прозвонка» — измерительный канал прозвонки на щупах.

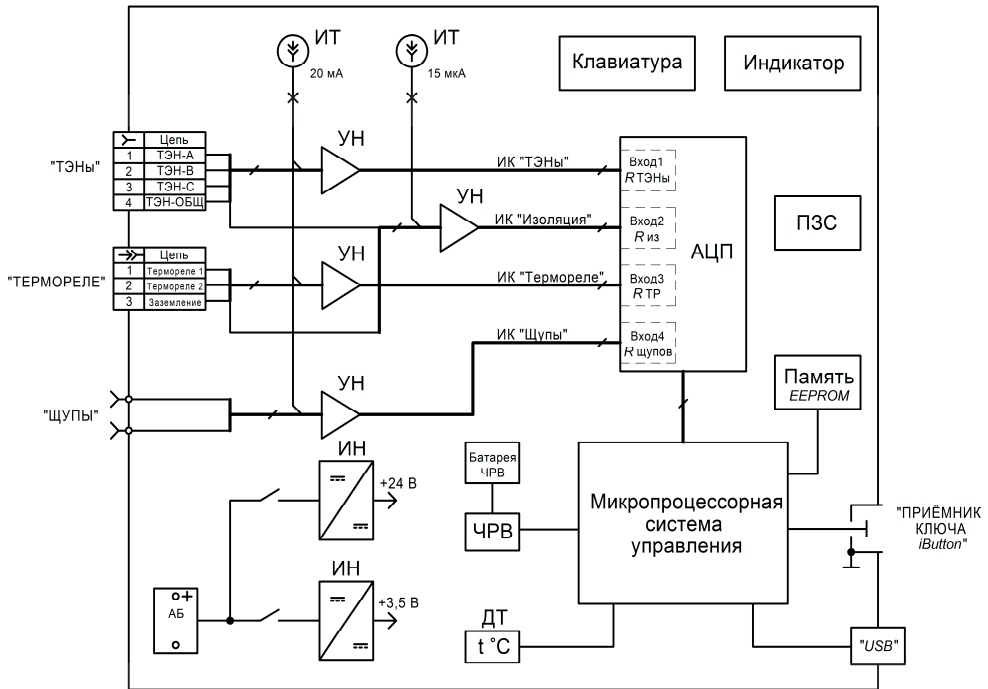
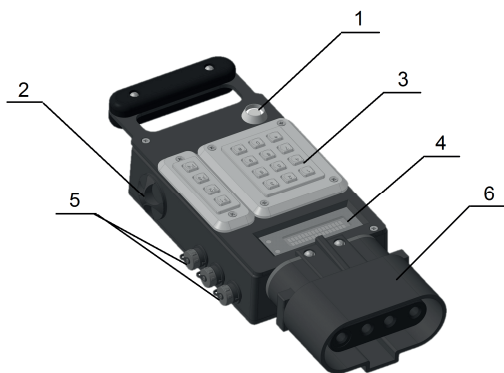


Рис. 1. Функциональная схема СДЭОВЦ

УН обеспечивают преобразование уровней измерительных сигналов для передачи на входы АЦП. ИТ 20 мА и ИТ 15 мкА используются для питания цепей измерения сопротивлений в диапазоне до 30 Ом и сопротивлений изоляции от 100 кОм до 1,3 МОм. Для питания СДЭОВЦ используется АБ с ИН, которые формируют напряжение питания 3,5 В и контрольное напряжение измерительных цепей 24 В.

Встроенный ДТ предусмотрен для автоматического анализа результатов измерений с привязкой их к текущему температурному профилю. ЧПВ необходимы для установки метки точного времени при сохранении результатов измерений в энерго-независимую память EEPROM. Данные измерений могут быть скопированы из памяти EEPROM в базу данных (БД) на персональном компьютере (ПК) через USB-интерфейс.

Приемник ключа iButton является частью механизма защиты от несанкционированного доступа к работе с СДЭОВЦ. Он представляет собой гнездо для ввода электронного ключа iButton типа DS1990 фирмы Maxim. Так как СДЭОВЦ предназначен для эксплуатации на улице в тяжелых погодных условиях, предлагается изготовить его в корпусе IP67 и обеспечить диапазон рабочих температур от  $-45$  до  $+50$  °С. Основные технические решения в части конструкции СДЭОВЦ отражены на рис. 2, где видно, что СДЭОВЦ подключается непосредственно к штепсельному разъему панели управления вагона-цистерны без применения промежуточных соединительных кабелей.



**Рис. 2.** Трехмерная модель конструктива СДЭОВЦ:

1 — приемник ключа iButton; 2 — отсек аккумуляторной батареи; 3 — клавиатура; 4 — индикатор; 5 — разъемы для подключения: кабеля термореле, USB, щупов; 6 — штепсельный разъем

Основные технические характеристики СДЭОВЦ приведены ниже. Перечень требований к функционалу предлагаемого стенда был выработан по согласованию со специалистами ведущей российской транспортно-экспедиторской компании ООО «Газпромтранс».

Напряжение питания батареи, В .....	3,7
Время работы от полностью заряженной батареи, ч .....	12
Диапазон измерения сопротивлений ТЭН, Ом .....	3...30
Диапазон измерения сопротивлений на щупах, Ом .....	3...30
Диапазон измерения сопротивлений изоляции, Ом .....	$1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^6$
Режимы работы .....	ручной/полуавтомат
Тип энергонезависимой памяти .....	EEPROM
Интерфейс подключения к ПК .....	USB
Наличие звуковой сигнализации .....	есть
Индикация режима и текущего результата измерения .....	есть

Накопление результатов измерений в памяти EEPROM возможно только в полуавтоматическом режиме работы, который доступен ограниченному кругу лиц. Для входа в режим «полуавтомат» необходима идентификация пользователя по ключу.

Следовательно, до начала работы с СДЭОВЦ необходимо заполнить в БД список «пользователь–ключ» с информацией о ключах пользователей, а также список настроек, содержащий температурные профили с уставками по сопротивлению и записать их в память СДЭОВЦ. После этого пользователь, зарегистрированный в списке «пользователь–ключ», может работать с устройством в полуавтоматическом режиме.

По мере накопления данных в журналах СДЭОВЦ они могут быть считаны из памяти устройства в соответствующие журналы в БД. Как только данные перенесены в БД, они могут быть просмотрены или выведены на печать в форме отчетов на рабочем месте оператора. Структурная схема обмена СДЭОВЦ с БД представлена на рис. 3. Обмен с устройством производится с помощью специального программного обеспечения, установленного на рабочем месте оператора.

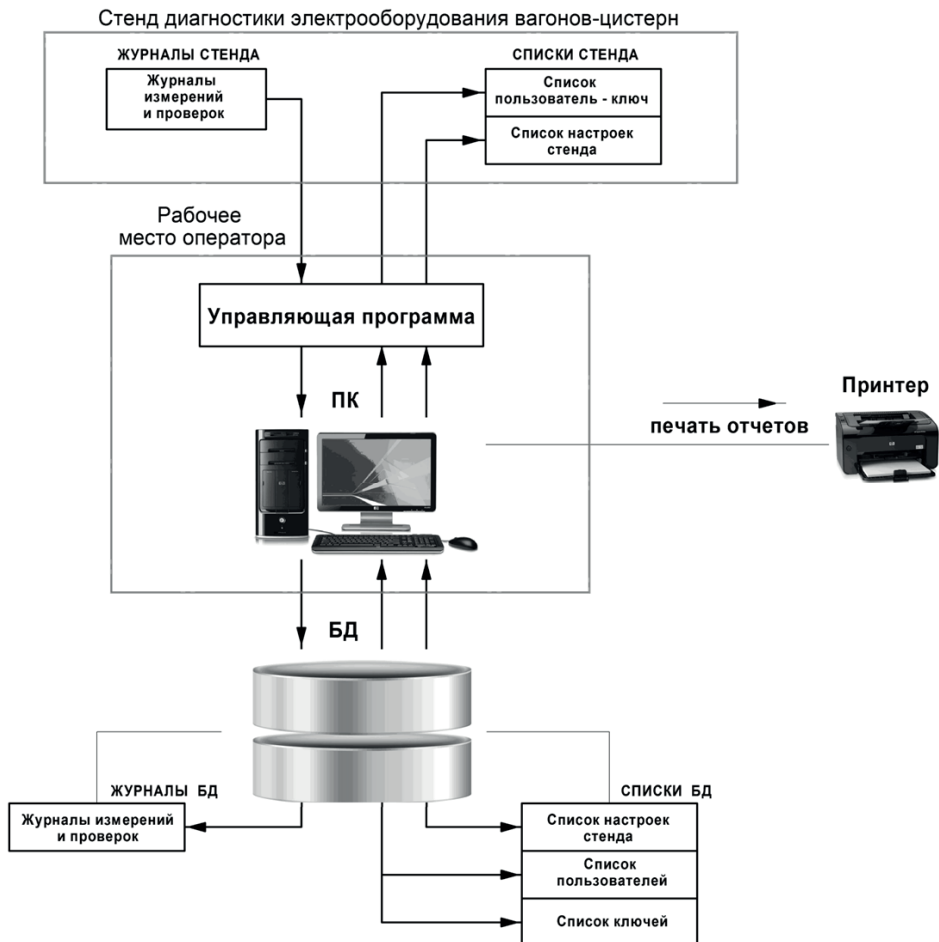


Рис. 3. Структурная схема обмена СДЭОВЦ с БД

Предложенная разработка имеет ряд преимуществ перед существующими средствами диагностики ЭОВЦ: применение напряжения питания безопасного уровня; малый вес и габариты; повышение качества проверки; снижение трудоемкости обслуживания и регистрации результатов проверки; переход на ведение электронных архивов паспортизации; ограничение доступа к работам по диагностике и т. д.

В настоящее время ведутся работы по изготовлению опытного образца СДЭОВЦ с дальнейшим его испытанием на вагонных парках российских транспортно-экспедиторских компаний.

### Литература

- [1] *Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов*. Справочное пособие. Москва, Министерство путей сообщения РФ, 1993, с. 251.
- [2] ГОСТ 13268—88. *Электронагреватели трубчатые*. Введ. 1990—01—01. Москва, Изд-во стандартов, 1989, 14 с.
- [3] Титце У., Шенк К. *Полупроводниковая схемотехника*. Т. 2. пер. с нем. Москва, ДМК Пресс, 2007, 942 с.

УДК 51-74:621

## Математическое моделирование активных выпрямителей напряжения в режиме рекуперации

© Саченко Екатерина Алексеевна, Андриянов Алексей Иванович

Россия, г. Брянск, Брянский государственный технический университет

[ereies-bgtu@yandex.ru](mailto:ereies-bgtu@yandex.ru), [kittie-kat@ya.ru](mailto:kittie-kat@ya.ru)

*Рассматривается кусочно-гладкая математическая модель активного выпрямителя напряжения, работающего в режиме рекуперации электроэнергии. Она может быть использована для изучения динамических режимов данного преобразователя и выбора оптимальных параметров системы управления. Представлен сравнительный анализ результатов моделирования работы преобразователя с использованием кусочно-гладкой математической модели и компьютерной модели MATLAB Simulink. Предлагаемая математическая модель позволяет существенно повысить скорость расчета при моделировании процессов в преобразователях исследуемого класса.*

**Ключевые слова:** *активный выпрямитель напряжения, рекуперация электроэнергии, динамические режимы, кусочно-гладкая математическая модель.*

Активные выпрямители напряжения (АВН) получают широкое распространение в современной промышленности. По сравнению с диодными и тиристорными выпрямителями они позволяют реализовать синусоидальную форму входного тока питающей сети, коэффициент мощности, близкий к единице, а также обеспечить заданный уровень постоянного выходного напряжения. Важным свойством АВН является



обеспечение рекуперации электроэнергии в питающую сеть при торможении электродвигателей, поэтому они находят применение для решения задач, связанных с циклически чередующимися процессами замедления и ускорения, а именно: на железнодорожном и городском общественном транспорте; в крановом, конвейерном и лифтовом оборудовании. В силу своих преимуществ АВН также широко используются для построения энергосберегающих систем электропривода.

Актуальной задачей при исследовании АВН на этапе эскизного проектирования является изучение их динамических режимов и выбор оптимальных параметров регуляторов. В настоящее время для этого используются компьютерные модели, создаваемые в системах имитационного моделирования MATLAB Simulink, OrCAD и т. п. Этот подход имеет ряд недостатков: низкая скорость расчета, невозможность достижения приемлемой точности расчета динамических режимов в связи с использованием численных методов, сложность выбора численного метода и его параметров для обеспечения его устойчивости, сложность исследования нелинейных динамических свойств АВН.

Альтернативным подходом является использование кусочно-гладких математических моделей [1], которые позволяют исключить указанные недостатки. Целью настоящей работы является построение математической модели АВН для описания их работы в режиме рекуперации.

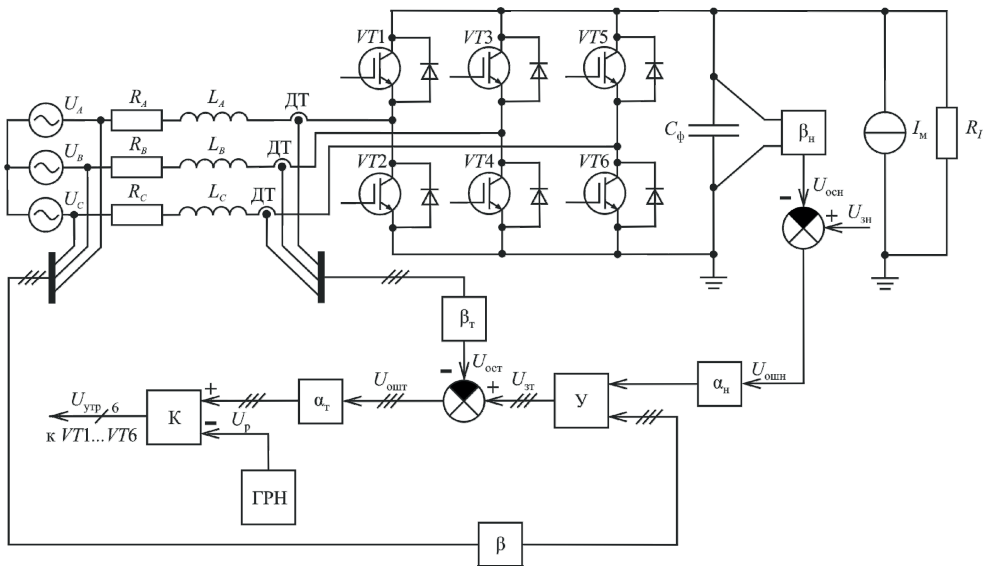
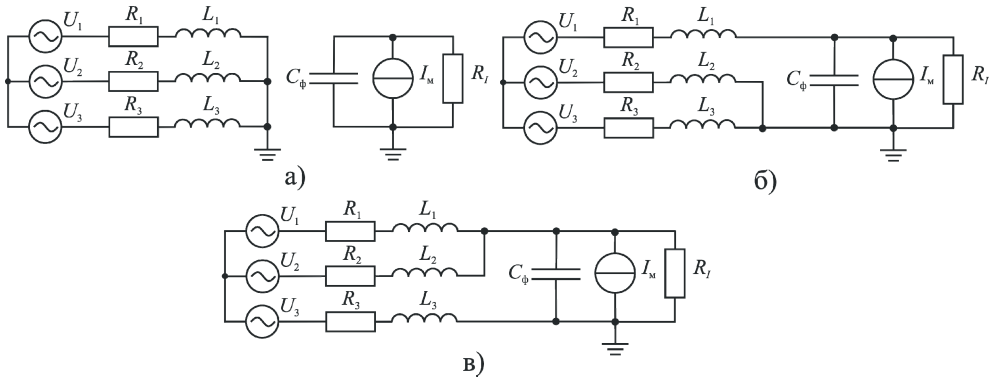


Рис. 1. Функциональная схема АВН

Схема замещения АВН, построенная на базе мостовой транзисторной схемы, представлена на рис. 1. При разработке схемы замещения система «инвертор напряжения — электродвигатель», являющаяся источником энергии для АВН, была представлена в виде источника тока с конечным внутренним сопротивлением [2]. На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $U_A, U_B, U_C$  — фазные напряжения питающей сети,  $L_A, L_B, L_C$  — индуктивности дросселей фильтра,  $R_A, R_B, R_C$  — активные сопротивления дросселей фильтра,  $C_\phi$  — емкость конденсатора фильтра,  $I_M$  — источник тока,

$R_I$  — внутреннее сопротивление источника тока,  $VT$  — транзисторы с обратными диодами, ДТ — датчики входного тока,  $\beta_n$  — коэффициент обратной связи по напряжению,  $\beta_t$  — коэффициент обратной связи по входному току,  $\beta$  — коэффициент усиления датчиков входного напряжения,  $\alpha_n$  — коэффициент пропорционального регулятора напряжения,  $\alpha_t$  — коэффициент пропорционального регулятора тока,  $У$  — блок перемножения сигналов, ГРН — генератор развертывающего напряжения,  $К$  — ШИМ-компаратор,  $U_{осн}$  и  $U_{ост}$  — сигналы обратной связи по напряжению и по току соответственно,  $U_{оштн}$  и  $U_{оштт}$  — сигналы ошибки по напряжению и по току соответственно,  $U_{зн}$  и  $U_{зт}$  — сигналы задания по напряжению и по току соответственно,  $U_p$  — развертывающее напряжение,  $U_{упр}$  — сигналы управления транзисторами.

Так как АВН работают в импульсном режиме, для их описания будет использована кусочно-гладкая математическая модель, которая может быть представлена системой дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [3]. Для составления математического описания АВН на каждом участке гладкости можно выделить три базовые схемы замещения (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема замещения АВН при различных комбинациях открытых ключей:  
 а — 1, 3, 5 или 2, 4, 6; б — 1, 4, 6 или 2, 3, 6, или 2, 4, 5; в — 1, 3, 6 или 2, 3, 5, или 1, 4, 5

На каждом участке гладкости приняты следующие обозначения:  $U_j$  — напряжение  $j$ -й фазы,  $L_j$  — индуктивность дросселя фильтра  $j$ -й фазы,  $R_j$  — активное сопротивление дросселя фильтра  $j$ -й фазы. В зависимости от комбинации открытых ключей значения этих величин определяются в соответствии с таблицей. Варианты 1 и 2 полностью повторяют друг друга с точки зрения параметров схем замещений.

Следовательно, можно выделить семь принципиально различных типов участков гладкости, каждый из которых характеризуется своей схемой замещения с определенными параметрами.

**Параметры схем замещения АВН**

Номера открытых ключей	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
1, 3, 5	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$L_A$	$L_B$	$L_C$
2, 4, 6	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$L_A$	$L_B$	$L_C$
1, 4, 6	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$L_A$	$L_B$	$L_C$
2, 3, 6	$U_B$	$U_A$	$U_C$	$R_B$	$R_A$	$R_C$	$L_B$	$L_A$	$L_C$

Номера открытых ключей	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
2, 4, 5	$U_C$	$U_A$	$U_B$	$R_C$	$R_A$	$R_B$	$L_C$	$L_A$	$L_B$
1, 3, 6	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$R_A$	$R_B$	$R_C$	$L_A$	$L_B$	$L_C$
2, 3, 5	$U_B$	$U_C$	$U_A$	$R_B$	$R_C$	$R_A$	$L_B$	$L_C$	$L_A$
1, 4, 5	$U_A$	$U_C$	$U_B$	$R_A$	$R_C$	$R_B$	$L_A$	$L_C$	$L_B$

На каждом участке гладкости схема замещения АВН может быть описана системой линейных дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dX}{dt} = A_i X + B_i,$$

где  $i$  — номер участка гладкости на тактовом интервале,  $A_i$  — матрица постоянных коэффициентов (3·3) на  $i$ -м участке гладкости,  $B_i$  — вектор вынуждающих воздействий (3·1) на  $i$ -м участке гладкости,  $X = [i_A, i_B, U_{сф}]^T$  — вектор переменных состояния.

Решение системы дифференциальных уравнений на  $i$ -м участке гладкости имеет вид

$$X = e^{A_i(t-t_0)} X_0 + A_i^{-1} \left( e^{A_i(t-t_0)} - E \right) B_i - E_m \left( A_i^2 + \omega^2 E \right)^{-1} \times \\ \times \left\{ \left( A_i M_c F_{\sin}(t) + \omega M_c F_{\cos}(t) \right) - e^{A_i(t-t_0)} \left( A_i M_c F_{\sin}(t_0) + \omega M_c F_{\cos}(t_0) \right) \right\},$$

где  $t$  — текущий момент времени,  $t_0$  — момент времени, соответствующий началу  $i$ -го участка гладкости,  $X_0$  — вектор начальных условий в момент перехода на  $i$ -й участок гладкости,  $E$  — единичная матрица [3·3],  $B_i$  — вектор постоянных вынуждающих воздействий [3·1],  $M_c$  — вспомогательная матрица постоянных коэффициентов [3·3],  $\omega$  — угловая частота напряжения питающей сети,  $E_m$  — амплитуда напряжения питающей сети,  $F_{\sin}(t)$  и  $F_{\cos}(t)$  — векторы переменных вынуждающих воздействий:  $F_{\sin}(t) = [\sin(\omega t + \varphi_A), \sin(\omega t + \varphi_B), \sin(\omega t + \varphi_C)]^T$ ,  $F_{\cos}(t) = [\cos(\omega t + \varphi_A), \cos(\omega t + \varphi_B), \cos(\omega t + \varphi_C)]^T$ , где  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  — углы сдвига фазных напряжений питающей сети.

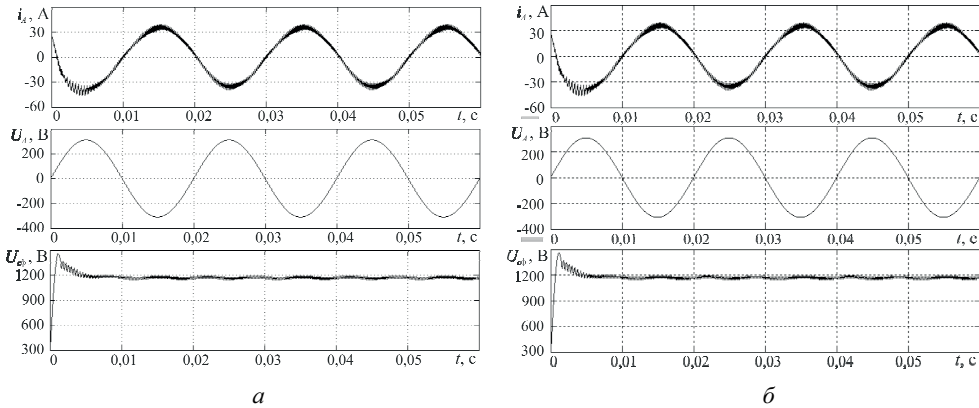
Возможные значения матриц  $A_i$  могут быть вычислены предварительно для каждого типа участка гладкости в соответствии с табл. При исследовании модели АВН были получены численные значения вектора  $B_i$  и матриц  $M_c$  и  $A_i$  на каждом участке гладкости.

Для оценки достоверности разработанной модели было выполнено сравнительное моделирование АВН в режиме рекуперации с помощью кусочно-гладкой модели и с использованием компьютерной модели MATLAB Simulink. Для моделирования работы АВН в режиме рекуперации было задано направление тока —  $I_M$ , источника тока от нагрузки в питающую сеть.

Моделирование осуществлялось при следующем наборе параметров:  $E_m = 311$  В;  $\omega = 628,32$  рад/с;  $\varphi_A = 0$  рад;  $\varphi_B = -2\pi/3$  рад;  $\varphi_C = 2\pi/3$  рад;  $R_A = R_B = R_C = 0,5$  Ом;  $L_A = L_B = L_C = 5$  мГн;  $C_{\phi} = 47$  мкФ;  $I_M = 15$  А;  $R_I = 1$  МОм;  $\beta_n = 0,01$ ;  $\beta_r = 1$ ;  $\beta = 0,003$  22;  $\alpha_n = 10$ ;  $\alpha_r = 0,5$ ;  $U_{3н} = 7$  В;  $X_0 = [30$  А,  $-60$  А,  $300$  В]; амплитуда развертывающего напряжения  $U_{pm} = 10$  В, частота коммутации ключей  $f_k = 5$  кГц. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что разработанная модель точно описывает работу АВН в режиме рекуперации. Она имеет высокую скорость расчета и устойчивость по сравнению с численными методами, применяе-

мыми в компьютерных моделях АВН. Кроме того, предложенная математическая модель представляет перспективы для изучения нелинейной динамики АВН.



**Рис. 3.** Временные диаграммы  $i_A$ ,  $U_A$ ,  $U_{сф}$ , полученные с использованием: *а* — компьютерной модели MATLAB Simulink; *б* — математической модели

#### Литература

- [1] Андриянов А.И., Малаханов А.А. Математическое моделирование динамики импульсного преобразователя напряжения повышающего типа. *Вестник Брянского государственного технического университета*, 2006, № 1 (9), с. 61–69.
- [2] Blasko V. *Power Conditions and Control of Regenerative Brake*. Rockwell Automation-Allen Bradley Standard Drives Development. 1998, с. 1504–1510.
- [3] Мелешин В.И. *Транзисторная преобразовательная техника*. Москва, Техносфера, 2005, 632 с.
- [4] Rashid M.H. *Power electronic handbook: devices, circuits, and applications handbook*. 3rd ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2011, 1389 с.

УДК 519.876.5

## Методы моделирования акустических передаточных функций для систем активного гашения шума

© Семенцов Станислав Григорьевич, Байкина Ляйля Ришатовна,  
Демин Алексей Анатольевич, Шахнов Вадим Анатольевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[siemens\\_off@mail.ru](mailto:siemens_off@mail.ru), [lбайкина@mail.ru](mailto:lбайкина@mail.ru), [fiz.alex@gmail.com](mailto:fiz.alex@gmail.com)

*Рассмотрены некоторые особенности создания систем активного гашения шума (САГ) с построением модели объекта управления. Определены параметры цифрового фильтра, используемого для процедуры идентификации передаточной функции*

при построении адекватной модели вторичного канала. Эти параметры во многом определяют вычислительную эффективность адаптивного алгоритма, и как следствие — устойчивость и эффективность всей системы в целом.

**Ключевые слова:** гашение шума, цифровой фильтр, вторичный канал, моделирование.

С точки зрения теории систем управления при создании САГ чаще всего используются управляющие структуры без модели и с моделью объекта управления [1]. Особенностью САГ с моделью является наличие соединенной в параллель с основной системой модели вторичного канала, которая аппроксимирует передаточную функцию вторичного канала (рис. 1). Такого рода системы широко используются для активного гашения шума в помещениях [2].

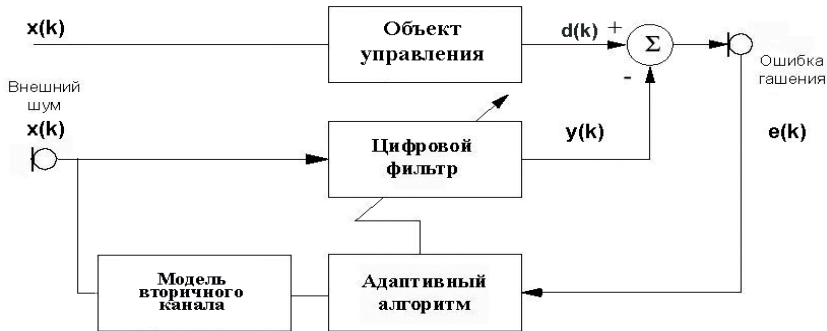


Рис. 1. Структура САГ с использованием модели вторичного канала

Передаточная функция может быть получена в процессе идентификации системы методами онлайн и офлайн моделирования [3]. Для моделирования в офлайн режиме необходимо экспериментальное определение реакции системы  $y(n)$  на входное случайное воздействие  $x(n)$  при заданном расположении пары источник/приемник.

При анализе размерности цифрового фильтра необходимо учитывать некоторые принципиальные ограничения, накладываемые характером работы САГ в целом. Например, частотный диапазон работы САГ в помещении, как правило, находится в пределах так называемой модальной зоны. В модальной зоне от первой аксиальной моды  $f_1 = \frac{340}{2l}$  до  $f_2 \approx 2160 \sqrt{\frac{RT60}{V}}$  передаточная функция вторичного канала определяется собственными модами помещения и описывается с помощью модального анализа. Частота  $f_2$ , называемая частотой Шредера, определяет максимальную частоту, которая может быть адекватно описана с помощью модального анализа.

Таким образом, модель вторичного канала должна адекватно описывать передаточную функцию в пределах частотного диапазона от  $f_1$  до  $f_2$ , что позволяет существенно сократить порядок фильтра, аппроксимирующего модель, за счет снижения его тактовой частоты до  $2f_2$ .

Для определения необходимого порядка фильтра и шага адаптации в помещении объемом  $100 \text{ м}^3$  для произвольной точки были экспериментально получены сигналы  $x(n)$  и  $y(n)$  и далее проведена процедура идентификации с использованием  $n$ LMS-,

LMS- и RLS-алгоритмов. Исходя из приведенных выше соображений, для данного помещения тактовая частота адаптивных фильтров была выбрана равной 800 Гц, порядок адаптивных фильтров варьировался в пределах от 128 до 1024 коэффициентов в диапазоне значений шага адаптации  $\mu$  от 1 до 0,05 для  $n$ LMS-алгоритма и диапазоне оценки дисперсии входного сигнала (initial input variance estimate)  $\hat{\sigma}^2$  от 0,05 до 1 для RLS-алгоритма. При использовании LMS-алгоритма без нормализации сходимость сохраняется при  $\mu < 0,2$ , поэтому моделирование проводилось для значений  $\mu = 0,05$  и  $\mu = 0,1$ .

На первом этапе оценивалась максимальная неравномерность спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала ошибки выхода адаптивного фильтра. Обобщенная зависимость неравномерности СПМ  $e(n)$  в дБ от порядка фильтра  $n$  и шага адаптации  $\mu$  для  $n$ LMS-алгоритма приведена на рис. 2.

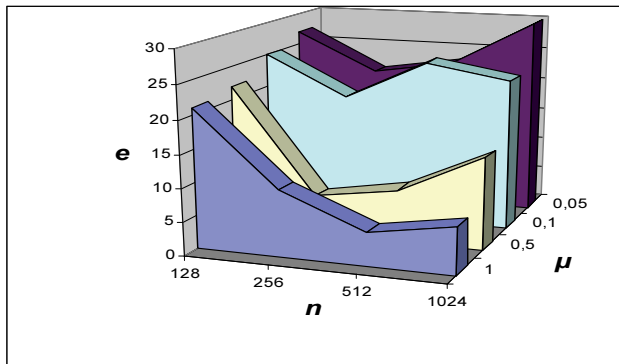


Рис. 2. Зависимость неравномерности СПМ сигнала ошибки  $e(n)$  от  $n$  и  $\mu$  для  $n$ LMS-алгоритма

В данном случае неравномерность СПМ ошибки варьируется в пределах от 5 до 25 дБ, что является неприемлемым результатом при формировании адекватной модели вторичного канала. Однако, как показали дальнейшие исследования, неравномерность СПМ сигнала ошибки  $e(n)$  не является определяющей при оценке адекватности формируемых моделей. На втором этапе была разработана модель в среде MATLAB, позволяющая непосредственно оценить ошибку между полученным экспериментально сигналом  $y(n)$  и откликом синтезированных моделей в частотной области.

Сравнение модели вторичного канала, полученной с помощью  $n$ LMS-алгоритма и описываемой цифровым фильтром длиной 128 коэффициентов, с сигналом  $y(n)$  приведено на рис. 3. Ошибка по амплитуде достигает 10 дБ, а по частоте — 10 Гц, что является недостаточной точностью для построения адекватной модели.

При увеличении порядка аппроксимирующего фильтра до 1024-ех коэффициентов получаемая модель вполне адекватна, ошибки по амплитуде не превышают 4 дБ и 1 Гц по частоте (рис. 4).

На рис. 5 приведена обобщенная зависимость усредненной амплитуды ошибки в дБ от величины  $\mu$  и порядка адаптивного  $n$ LMS-фильтра —  $n$ .

Как можно заметить, минимальная амплитуда ошибки достигается при величине  $0,7 < \mu < 0,5$  и порядках фильтра в диапазоне от 256 до 1024-ех коэффициентов.

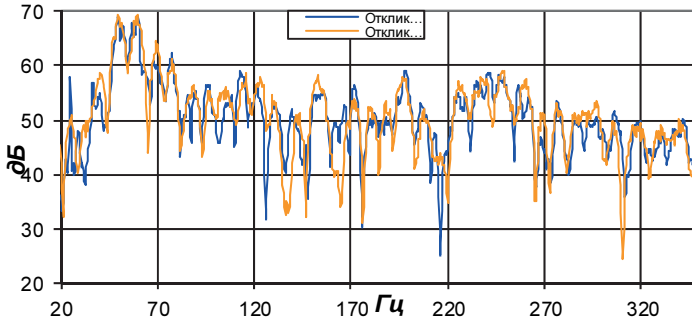


Рис. 3. Оценка адекватности модели, полученной с помощью  $n$ LMS-алгоритма при  $\mu = 1$  и  $n = 128$

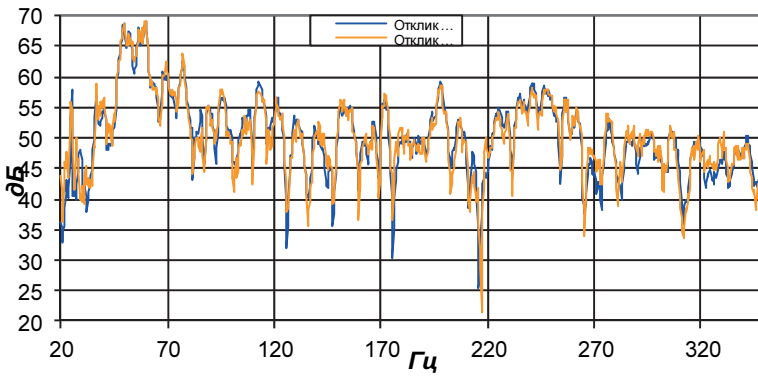


Рис. 4. Оценка адекватности модели, полученной с помощью  $n$ LMS-алгоритма при  $\mu = 1$  и  $n = 1024$

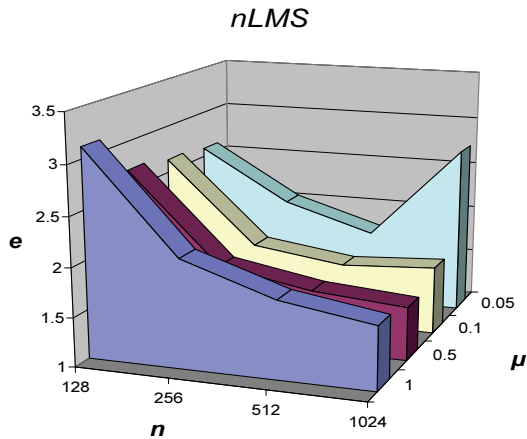
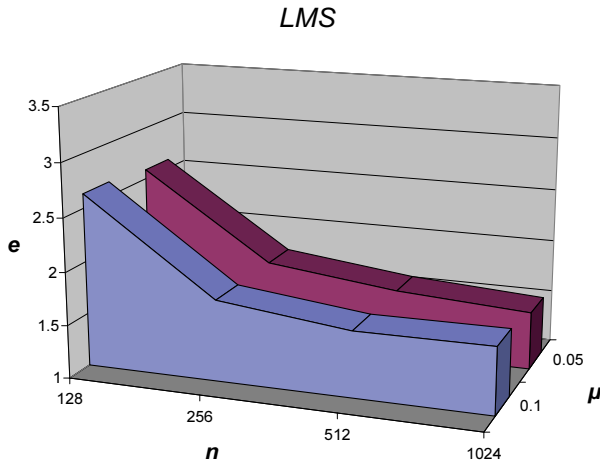


Рис. 5. Обобщенная зависимость амплитуды сигнала ошибки от величины  $\mu$  и порядка адаптивного  $n$ LMS-фильтра

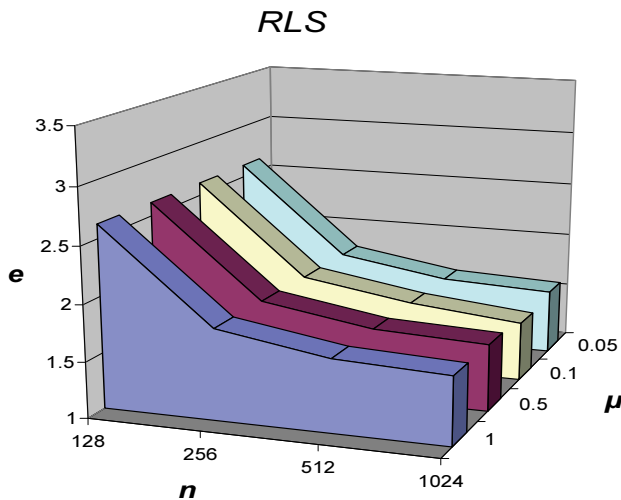
Обобщенная зависимость амплитуды сигнала ошибки от величины  $\mu$  и порядка адаптивного LMS-фильтра  $n$  приведена на рис. 6.



**Рис. 6.** Обобщенная зависимость амплитуды сигнала ошибки от величины  $\mu$  и порядка  $n$  адаптивного LMS-фильтра

Для LMS-алгоритма без нормализации полученная зависимость практически идентична  $n$ LMS-алгоритму с  $\mu = 0,5$ .

Проведенный анализ адекватности моделей, полученных с помощью RLS-алгоритма, показал, что амплитуда ошибки не зависит от величины  $\hat{\sigma}^2$  и определяется лишь длиной аппроксимирующего фильтра (рис. 7).



**Рис. 7.** Обобщенная зависимость амплитуды сигнала ошибки от величины  $\mu$  и порядка  $n$  адаптивного RLS-фильтра



Исходя из полученных данных и ограничений, возникающих при практической реализации фильтров высоких порядков в системах цифровой обработки реального времени, можно сделать следующие выводы:

- для формирования адекватной модели вторичного канала необходим адаптивный цифровой фильтр длиной 256–512 коэффициентов. Применение фильтра длиной 256 коэффициентов является более предпочтительным, поскольку при незначительном увеличении ошибки позволяет существенно снизить требования к аппаратному обеспечению системы;
- для проведения процедуры идентификации могут быть использованы LMS- и RLS-алгоритмы при одинаковой адекватности получаемых моделей. Применимость  $n$ LMS-алгоритма сильно зависит от величины  $\mu$  и требует проведения нескольких итераций.

### Литература

- [1] Kristensen S.H. *Active Noise Cancellation in Headsets*. Aalborg University. Institute of Electronic Systems. Applied Signal Processing and Implementation. Technical Report, 1998.
- [2] Tamaz P., Embrechts J.J. *Experiments in active noise control in buildings*. Local and global approaches. Department of Electrical Engineering and Computer Science (Institut Montefiore), 2005.
- [3] Design of Active Noise Control Systems with the TMS320 Family. *Application Report*. Texas Instruments, 1996.

УДК 681.142

## Экспериментальное исследование обучающей системы формирования навыков каллиграфии

© Демин Алексей Анатольевич, Семенцов Станислав Григорьевич,  
Силаев Владимир Михайлович, Власов Андрей Игоревич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[fizmail@inbox.ru](mailto:fizmail@inbox.ru)

*Исследовано аппаратное обеспечение комплекса интеллектуальной интерактивной обучающей системы для обучения младших школьников базовым навыкам письма.*

**Ключевые слова:** обработка изображения, электронная пропись, система распознавания, визуальное управление.

Так как разрабатываемая система направлена на усовершенствование письменных навыков, то наиболее важной частью аппаратного обеспечения является устройство ввода информации. Для обеспечения качественной работы системы оценки каллиграфии устройство ввода информации пользователем должно соответствовать следующим критериям:

1. Достаточная для оценки точность ввода рукописного текста пользователем при выполнении упражнений.

2. Эргономичность — соответствие физиологическим и психологическим параметрам человека, обеспечение его эффективной работы при минимальных физических затратах.

В ходе исследований различных вариантов аппаратной части было определено наиболее подходящее для построения интеллектуальной интерактивной обучающей системы оборудование — планшет чувствительный к прикосновению пера (стилуса). Чувствительная поверхность его совмещена с дисплеем, на котором отображается вводимая информация и информация, соответствующая методике обучения. В качестве устройства для обработки служит планшетный ПК. На рис. 1 приведена диаграмма структуры и состава аппаратной части системы [1].

**Обоснование выбора аппаратного обеспечения комплекса «Электронная пропись».** Эффективность работы аппаратной части зависит, прежде всего, от правильного выбора устройства ввода рукописной информации. С целью выбора оптимального устройства ввода (экрана) было проведено исследование возможных вариантов.

На основании полученных результатов в качестве аппаратного средства было выбрано два варианта оборудования: планшетный компьютер Classmate и планшет Edge 3.0 [2].

Планшетный компьютер (нетбук-трансформер в защищенном от внешних факторов корпусе) обладает всеми требуемыми функциями для обеспечения ввода графической и текстовой рукописной информации. Он был разработан корпорацией Intel для учеников средних школ и выпускается компанией iRU.

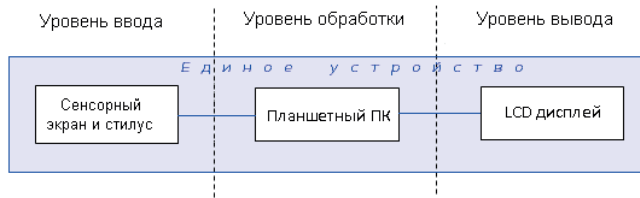


Рис. 1. Диаграмма аппаратной части экспериментального стенда

В процессе тестирования системы проводилась оценка ввода рукописной информации с точки зрения удобства работы пользователя с интерактивной обучающей системой [3] и эффективности взаимодействия системы ввода с другими системами и подсистемами программно-аппаратного комплекса (рис. 2).



Рис. 2. Система ввода рукописной информации

Опытная эксплуатация планшетного компьютера была проведена:

- при решении образовательных задач (данная модель планшетного компьютера использовалась только взрослыми для работы над упражнениями коррективы и для других обучающихся курсов);

- с целью реабилитации больных с нарушениями моторики рук.

Планшет Edge 3.0 разработан компанией Entourage. Особенность конструкции этой модели состоит в наличии сразу двух дисплеев — жидкокристаллического и основанного на технологии электронных чернил E Ink. Размер электронной бумаги составляет 9,7 дюймов, разрешение 1200×825 пикселей, а второй, резистивный сенсорный дисплей, имеет размер 10 дюймов, но при этом меньшее разрешение 1024×600 пикселей.

Планшет использовался для решения образовательных задач — обучения каллиграфически правильному письму дошкольников и младших школьников. Выбор такого варианта аппаратного обеспечения для работы дошкольников и младших школьников был обусловлен существующими требованиями Министерства образования и Министерства здравоохранения к работе детей с компьютером. Согласно СанПиН 2.4.2.2821-10 («Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях») непрерывная работа школьников 1–4-го классов с компьютером на уроке не должна превышать 15 минут [3].

Задания в программе обучения каллиграфии составлены таким образом, что работа учеников с ЖК-дисплеем продолжается не более 15 минут, остальное время ученики работают с экраном E-ink. Последний является черно-белым, т. е. нагрузка на зрительный анализатор при работе с ним меньше.

**Программное обеспечение стенда.** Используемый в составе экспериментального стенда планшетный компьютер iRU Classmate имеет операционную систему Windows Seven Starter и пакет ПО Intel® Learning Series Software Suite.

Планшет Edge 3.0 работает в среде Linux, используя разработанную Google специально для планшетов операционную систему Android Ice Cream Sandwich.

На оба варианта оборудования возможна также инсталляция дополнительного программного обеспечения по выбору пользователя, в том числе и разработанной программы для обработки каллиграфии «Электронная пропись».

Недостатком программного обеспечения для планшетного компьютера iRU Classmate и планшета Edge 3.0 является отсутствие контроля степени нажима пера. Несмотря на это, данное программное обеспечение соответствует задачам, связанным с обучением школьников каллиграфически правильному письму, и по ряду характеристик — задаче реабилитации больных с нарушением моторики рук.

Для определения такого соответствия программного обеспечения его задачам и возможности использования с определенными аппаратными средствами было проведено тестирование программного обеспечения.

В ходе тестирования программного обеспечения проверяются основные функции системы (рис. 3), которые ПО должно поддерживать для обеспечения эффективной работы с обучающей системой [3], а также определяется качество программы оценки каллиграфии.

Основные функции системы: создание и просмотр материала (текстового, графического, аудио-, видео- и т. д.); создание интерактивных заданий; назначение последовательности выполнения заданий; назначение критериев оценки правильности выполнения заданий; выбор и прохождение отдельных упражнений из курса; создание и поддержка индивидуальных профилей пользователя; работа со статистикой обучения.



Рис. 3. Методика тестирования

*Тестирование программного обеспечения* — это проверка соответствия между реальным и ожидаемым поведением программы, осуществляемая на конечном наборе тестов, выбранным определенным образом. В более широком смысле тестирование — это одна из техник контроля качества, включающая в себя активности по планированию работ, проектированию тестов, выполнению тестирования и анализу полученных результатов.

В основе алгоритмов работы обучающей системы должны лежать показатели качества, характеризующие ее устойчивость и достоверность интерпретации символов.

**Тестирование программного обеспечения «Электронная пропись».** Основные алгоритмы программы это алгоритмы предустановленных программ и алгоритмы программы по обучению каллиграфически правильному письму. В рамках исследований выполняется только тестирование программы обучения каллиграфии «Электронная пропись».

Для оценки обучающей системы были сформированы три экспертные панели. Оценка обучающей системы экспертной панелью специалистов-разработчиков (первая панель) проводилась по 5-балльной шкале, остальные две панели использовали 10-балльную систему оценки.

Методы анализа результатов экспериментальных исследований обучающей системы. Экспериментальные исследования обучающей системы складывались из двух частей:

- экспертной оценки системы методом экспертных панелей по ряду критериев;
- апробации различных функций системы (ввода рукописной информации, распознавания ее, ассоциативной навигации и др.).

Панельные исследования включали две серии замеров по каждой экспертной панели. Статистическая обработка и анализ экспертных оценок проводились *методом средних арифметических рангов* (уровень значимости  $P = 0,05$ ), т. е. рассчитывалось среднее арифметическое значение из оценок участников тестирования по 5- или 10-балльной шкале.

Следующим этапом тестирования системы была оценка распознавания текста системой и взаимосвязи распознавания с другими функциями обучающей системы. Распознавание рукописных символов обучающей системой связано с такими ее функциями, как лингвистический анализ символа, ассоциативная навигация, установление связи между введенной и распознанной информацией, анализ почерка и обработка каллиграфической информации.

Для выделения элементов рукописных данных, по которым формировалась обработка каллиграфии, были сформулированы общие признаки почерка: *общесистемные, частно-системные* и признаки, отражающие пространственную характеристику рукописного текста (*топографические*). Для системы обработки каллиграфии наиболее важны две последние группы признаков из перечисленных.

На основании проведенных экспериментальных исследований по каждому виду апробации (тестирования) были вынесены констатирующая и формирующая оценки о функциях программно-аппаратного комплекса. В дальнейших исследованиях были выявлены адекватность, эффективность, достоинства и недостатки аппаратного обеспечения для решения образовательных задач и для реабилитации больных с нарушениями моторики рук.

**Литература**

- [1] Балухто А.Н., Бурый Е.В., Власов А.И. *Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений*. Кн.7. Под ред. А.И. Галушкина, Ю.В. Гуляева. Москва, Радиотехника, 2003, 192 с.
- [2] Uvaysova S.S., Uvaysova A.S., Lvov B.G., Zhurkov A.P. Ensure maintainability direction finder positions. *Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific-practical conference*. Part 3. Ed. by S. U. Uvaysov. Moscow, HSE, 2014, pp. 164–166.
- [3] Демин А.А., Карпунин А.А., Ганев Ю.М. Методы верификации и валидации сложных программных систем. *Программные продукты и системы*, 2014, № 108, с. 229–233.

УДК 621.373.826

### Методика бесконтактной лазерной очистки стеклянных поверхностей

© Баранов Денис Андреевич, Якимова Мария Анатольевна,  
Мельников Дмитрий Михайлович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[Marya.korotaeva@yandex.ru](mailto:Marya.korotaeva@yandex.ru) [daenoor@gmail.com](mailto:daenoor@gmail.com) [baranovmt@yandex.ru](mailto:baranovmt@yandex.ru)

*Предложена методика лазерной очистки оптических поверхностей, предполагающая использование недорогих импульсных источников миллисекундного диапазона. Данная методика базируется на существенной разнице в теплофизических показателях загрязняющих примесей и материала оптических элементов. В процессе обработки тепловому влиянию подвергается только загрязнение, что исключает повреждение прозрачных оптических покрытий.*

**Ключевые слова:** лазерная очистка, жировые загрязнения, импульсная очистка, лазерная абляция.

Разработка лазерного бесконтактного метода очистки оптических элементов — актуальная техническая задача, поскольку позволяет избежать механических повреждений поверхности, увеличить скорость и качество процесса, его автоматизацию.

В основе физики процесса лазерного удаления поверхностных слоев (ржавчины, окислов, загрязнений, лаков, красок, жиров и т. д.) лежит эффект испарения, то есть перевода материала из твердой фазы в паро-газо-плазменную, при этом желательно минимизировать образование жидкой фазы.

В работе были проведены эксперименты по удалению жировых загрязнений (типа отпечатков пальцев) с поверхностей прозрачных оптических элементов без покрытия. В качестве источника излучения использовался импульсный лазер на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом. Длина волны выбиралась таким образом, чтобы коэффициент поглощения ее жиром был большой, а стеклом — пренебрежимо мал.

Процесс состоял из трех этапов:

- 1) термодиффузия. При нагревании жира лазером, повышается температура жира, происходит его плавление;
- 2) обработка ультразвуком необходима для удаления частиц с поверхности;
- 3) испарение вещества под действием лазерного излучения.

Был проведен эксперимент, заключающийся в облучении поверхности очищаемого элемента миллисекундными лазерными импульсами. Спектр пропускания детали после обработки совпал со спектром чистого материала с погрешностью 3...7 % в спектральном диапазоне 500...1100 нм.

*Статья выполнена в рамках работ по гранту от Российского научного фонда № 141901216.*

#### **Литература**

- [1] Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. *Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении*. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013, 103 с.
- [2] Palani I.A., Kumeda A., Matsumoto T., Higashihata M., Okada T. Investigation on Laser cleaning of thin films deposited on Sapphire. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2009.
- [3] Rigatti Amy L. Cleaning process versus laser damage threshold of coated optical components. *Optical Fabrication and Testing*, 2004.

УДК 621.37

## **Фотометрический экспресс-анализ содержания взвешенных частиц в полидисперсных средах**

**© Баранов Денис Андреевич, Якимова Мария Анатольевна,  
Мельников Дмитрий Михайлович, Шиганов Игорь Николаевич**

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[Marya.korotaeva@yandex.ru](mailto:Marya.korotaeva@yandex.ru), [daenoor@gmail.com](mailto:daenoor@gmail.com), [baranovmt@yandex.ru](mailto:baranovmt@yandex.ru),  
[niikmtp@mx.bmstu.ru](mailto:niikmtp@mx.bmstu.ru)

*Разработана методика фотометрического экспресс-анализа содержания взвешенных частиц в полидисперсных средах. Предлагаемая методика основывается на изучении взаимодействия лазерного излучения со средой, имеющей сложный состав в виде набора взвешенных частиц с определенными распределением и концентрацией. Количественное определение концентрации частиц базируется на анализе рассеяния лазерного излучения определенных длин волн.*

**Ключевые слова:** полидисперсная жидкость, концентрация частиц, рассеяние излучения, нефелометрия, рассеяние Ми.

В статье описана разработанная методика определения концентрации частиц, взвешенных в коллоидном растворе. Примером такого раствора может служить молоко (частицы жира взвешены в коллоидном растворе белков), нефтепродукты со взвешенными в них частицами твердых примесей и др. [1, 2].



Контроль содержания взвешенных частиц, как правило, основан на спектральном анализе и ряде методов. При этом дисперсность этих частиц является помехой при анализе, так как влияет на значение коэффициента ослабления, что снижает точность определения концентрации вещества [3]:

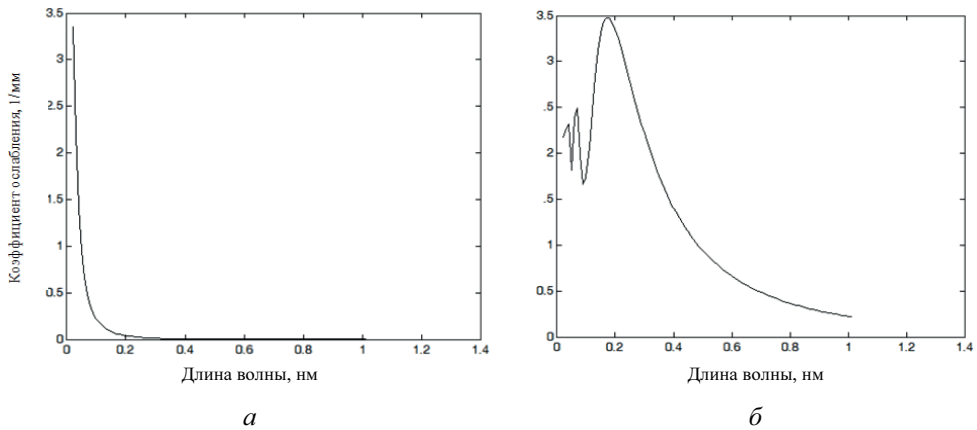
$$K_{\text{рас}} = N_0 \int_0^{\infty} k_{\text{рас}}(a)g(a)da, \quad (1)$$

где  $K_{\text{рас}}$  — коэффициент рассеяния одиночной частицы (зависящий от радиусов частиц  $a$ );  $N_0$  — концентрация частиц;  $g(a)$  — плотность распределения частиц по размерам.

Для снижения влияния дисперсности частиц на результаты необходима фильтрация или гомогенизация пробы. В то же время анализ рассеянного излучения позволяет получать более полную информацию о структуре вещества без дополнительной обработки пробы [4].

Сложностью при анализе многокомпонентных смесей является возможное перекрытие сигналов от каждого из компонентов, что также мешает обработке сигналов и оценке содержания каждого из них. В случае, когда двухкомпонентная смесь состоит из частиц, взвешенных в однородной жидкости или в коллоидном растворе, образованном частицами, имеющими существенно меньшие размеры, для анализа можно выбрать длины волн, интенсивно рассеиваемые частицами одного размера и практически не взаимодействующие с другими [5].

Зависимости коэффициентов ослабления от длины волны, приведенные на рис. 1, показывают, что частицы диаметром 300 нм, интенсивно рассеивают коротковолновое излучение, частицы диаметром 1 мкм — излучение, во всем видимом и начале ИК-диапазона.



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента ослабления излучения частицами с диаметром:  $a$  — 500 нм;  $b$  — 1 мкм

Таким образом, можно отделить сигнал от крупных частиц, используя излучение в красной и ИК-областях, которое не рассеивается малыми частицами. При анализе рассеянного излучения синего или зеленого диапазонов с использованием данных о рассеянии длинноволнового излучения можно выделить сигнал о частицах малого диаметра.

Экспериментальная установка состояла из полупроводниковых лазеров с длинами волн 480 и 780 нм. Излучение обоих лазеров поочередно коллимировалось оптической системой, проходило сквозь слой образца и собиралось на приемнике излучения. Несмотря на простоту системы, погрешность определения концентрации взвешенных частиц составила 4 %, что является хорошим результатом для экспресс-системы.

*Статья выполнена в рамках работ по гранту от Российского научного фонда № 141901216.*

#### Литература

- [1] Mel'nikov D.M., Shiganov I.N. *Opređenje nízkotemperaturnyh svojstv dízel'nyh topliv putjom jekspress-analiza zhidkih nefteproduktov. Tehnologija Mashinostroenija*, 2011, no 11, pp. 65–67.
- [2] Korotaeva M.A., Alehnovich V.I., Grigor'janc A.G. *Vzaimodejstvie lazernogo izluchenija s zhidkimi polidispersnymi sredami. Vestnik MGTU ser. Mashinostroenie, 2012, Spec. vypusk no 5 «Lazernye tehnologičeskie processy v mashinostroenii»*, pp. 141–146.
- [3] Тучин В.В. *Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике*. Москва, Физматлит, 2013, 812 с.
- [4] Шмидт В. *Оптическая спектроскопия для химиков и биологов*. Москва, Техносфера, 2007, 363 с.
- [5] Козулин Р.А. *Аналитические методы контроля многокомпонентных жидкостей. Научное приборостроение*, 2003, vol. 13, no 2, pp. 3–16.

УДК.621.373.826

## **Разработка экспериментальной установки для изготовления деталей из металлических порошков**

**© Быков Алексей Александрович, Ставертий Антон Яковлевич,  
Колчанов Дмитрий Сергеевич**

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[alex1by@yahoo.com](mailto:alex1by@yahoo.com), [mt12.anton@gmail.com](mailto:mt12.anton@gmail.com), [kolchanovdmitry@gmail.com](mailto:kolchanovdmitry@gmail.com)

*Аддитивные технологии, в частности селективное лазерное плавление, очень перспективны для развития промышленности и медицины. Обладая уникальными возможностями по выращиванию изделий сложной геометрии по компьютерной модели в сжатые сроки, данная технология представляет собой интерес по всему миру. Представлены разработанный экспериментальный стенд для реализации процесса селективного лазерного плавления, практические результаты по послойному выращиванию различных структур и изделий из металлического порошка.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, послойное выращивание, металлический порошок.

Современному машиностроению необходимы детали со сложной геометрией, например, сопла, элементы турбин и двигателей внутреннего сгорания, литейные формы со сложной, в том числе и внутренней, геометрией, протезы и искусственные

суставы. Процессы изготовления таких деталей традиционными методами достаточно трудоемки и требуют, кроме высокой точности производственного оборудования, больших временных затрат.

Селективное лазерное плавление (СЛП, англ. *Selective laser melting*) — технология послойного выращивания изделий из металлических порошков на принципах, заложенных Карлом Декардом в 1980-х годах, получила широкое развитие. С тех пор, осознав возможности этой технологии, разработкой и производством промышленных машин занимается ряд крупных зарубежных компаний.

Использование метода выборочного плавления порошков лазерным излучением предположительно сократит время создания деталей при единичном и мелкосерийном производстве, уменьшит количество производственных отходов. Для данного процесса доступен широкий диапазон материалов. При этом возможно снижение себестоимости деталей за счет уменьшения технологических этапов обработки.

В настоящий момент в России СЛП-установки не производятся. Высокая стоимость самих установок и материалов для выращивания, невозможность работы с порошками других производителей осложняет внедрение технологии в отечественную промышленность. Создаваемое экспериментальное оборудование не доводилось до стадии промышленных образцов. Однако интерес к технологии СЛП в России за последние 5 лет заметно возрос, о чем свидетельствует увеличение числа публикаций по данной тематике.

Целью данной работы является создание экспериментальной установки и подбор режимов обработки для послойного выращивания изделий из металлических порошков.

Технологические установки различных компаний для СЛП металлических изделий прошли долгий путь поиска конструктивных решений, оптимизации и модернизации с учетом возможностей быстро развивающихся лазерных технологий. При детальном изучении конструкции существующих комплексов выделяются кинематические схемы, узлы и вспомогательное оборудование, характерное для большинства комплексов. При разработке экспериментального стенда учитывался опыт ведущих производителей СЛП-установок. Был разработан и собран экспериментальный лазерный стенд для изготовления деталей из металлических порошков (рис. 1).

Рабочий объем стенда ограничен размерами 100×100×25 мм, этого достаточно для проведения экспериментов по синтезу элементарных объемов на начальном этапе, а также выращивания небольших рабочих деталей. Исходя из описанных требований, был сконструирован узел, включающий два бункера с подложкой, перемещаемой в вертикальном направлении. Первый бункер для подачи порошка, второй — для выращивания изделия. В конструкцию включен неподвижный бункер для сбора излишков порошка. Для переноса порошкового материала из бункера-питателя и его разравнивания в рабочей зоне использован нож, закрепленный винтами на специальной консоли линейной системы перемещения. Предусмотрена возможность установки различных по материалу ножей, в зависимости от свойств порошка и геометрических характеристик выращиваемого изделия. Установлен волоконный одномодовый лазер мощностью 100 Вт. Лазерный луч перемещается посредством сканатора. Рабочий объем заключен в камеру, с возможностью локальной подачи защитного газа.

Проведена серия экспериментов по подбору режимов для сплавления металлических порошков, а также опыты по выращиванию тонкостенных и сетчатых периодических структур, крыльчаток и лопаток турбин (рис. 2).

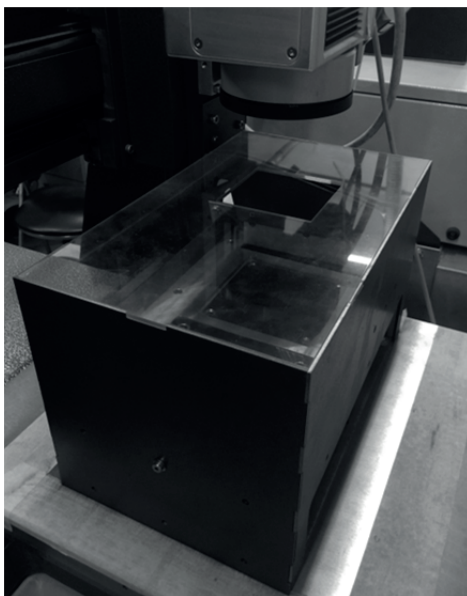
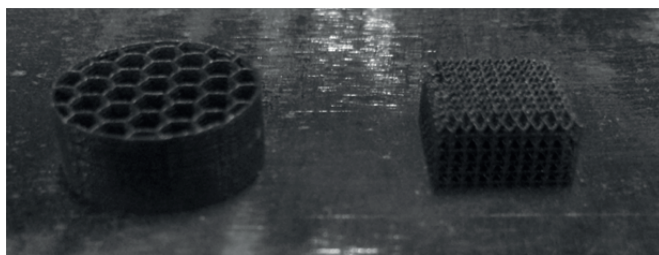
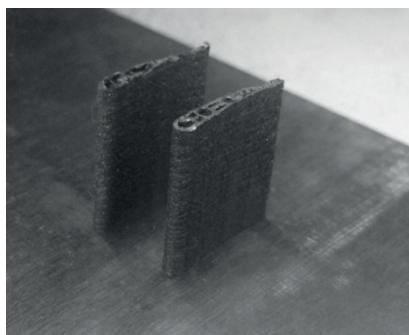


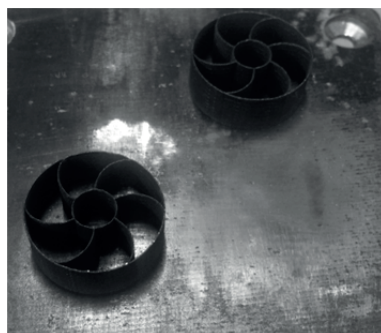
Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда



*a*



*б*



*в*

Рис. 2. Примеры выращенных изделий:

*a* — периодические тонкостенные сетчатые структуры; *б* — крыльчатки; *в* — лопатки турбин

Исследования проводились с использованием порошка низколегированной стали типа 316L с размером фракции 20...40 мкм. Данная сталь устойчива к коррозии, высоким температурам и агрессивным средам. Аналог стали 316L в России — 08X17H13M2.

Таким образом, в ходе проведенной работы была спроектирована экспериментальная установка для создания деталей из металлических порошков. Установлено, что при помощи непрерывного одномодового лазерного излучения возможно производить сплавление металлических порошков, причем даже тонкостенных образцов. Созданы предпосылки для разработки промышленного образца установки для выращивания изделий из металла.

### Литература

- [1] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
- [2] Lou A. *Selective Laser Sintering, Birth of an Industry*. University of Texas at Austin. Retrieved 2 January 2014.
- [3] Шишковский И.В. *Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий*. Москва, Физматлит, 2009, 424 с.

УДК 539.23

## Расчет тонкопленочного термоэлектрического модуля, изготавливаемого методом импульсного лазерного осаждения

© Дубровин Глеб Николаевич, Герасимова Екатерина Сергеевна,  
Шупенев Александр Евгеньевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[dubrovingleb@yandex.ru](mailto:dubrovingleb@yandex.ru), [kate\\_7@bk.ru](mailto:kate_7@bk.ru)

*Приведен расчет тонкопленочного термоэлектрического модуля, изготавливаемого методом импульсного лазерного осаждения. Модуль представляет собой полиимидную подложку размерами 54×20×0,1 мм с осажденным на нее термоэлектрическим материалом на основе  $Bi_2Te_3$ . В результате расчета определяется необходимое число термопар для генерации модулем напряжения 3,6 В при перепаде температур 16 К.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический модуль, тонкопленочные термоэлементы, импульсное лазерное осаждение.

Термоэлектрические явления в твердых телах находят применение в различных областях техники. Эффект Зеебека (термоЭДС) используется для преобразования тепловой энергии в электрическую. Перенос тепла электрическим током (эффект

Пельтье) лежит в основе действия твердотельных охлаждающих и термостатирующих устройств [1].

Термоэлектрический модуль (Элемент Пельтье) представляет собой совокупность термопар, электрически соединенных, как правило, последовательно. В стандартном элементе Пельтье термопары помещаются между двух плоских керамических пластин на основе оксида или нитрида алюминия (рис. 1) [2].

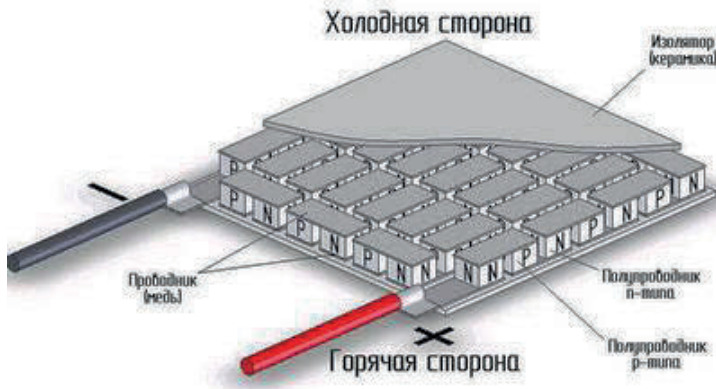


Рис. 1. Объемный термоэлектрический модуль

Многие задачи, которые стоят перед разработчиками термоэлектрических устройств, могут быть успешно решены с применением пленочных термоэлементов (ПТЭ) и пленочных термобатарей (ПТБ) (рис. 2).

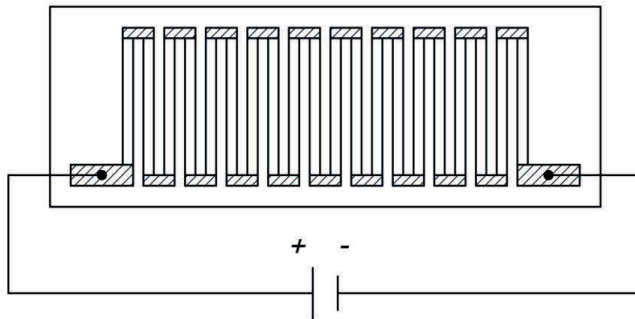


Рис. 2. Пленочный термоэлемент

Одно из главных достоинств ПТБ — возможность принципиально увеличить число элементов при сохранении объема преобразователя, а при необходимости — создавать микроминиатюрные устройства. На основе ПТБ могут быть изготовлены малагабаритные источники питания, слаботочные микрохолодильники и термостаты, высокочувствительные и достаточно малоинерционные датчики температуры и теплового потока и т. п. [1, 3]. Вакуумные технологии изготовления повышают качество ПТБ, позволяют достичь высокой точности осаждения полупроводников на полии-

мидные подложки. Одной из таких технологий является импульсное лазерное осаждение (ИЛО).

Основные научные результаты, полученные при разработке термоэлектрического модуля (ТЭМ), опубликованы во множестве журнальных статей, а также систематизированы в ряде обзоров, монографий и справочников. Эти публикации охватывают широкий круг вопросов — технологию получения и свойства полупроводниковых сплавов, конструкции термоэлементов и термоэлектрических батарей, методы измерения, схемы и параметры энергетических установок и др. Вместе с тем методы расчета теплоэнергетических характеристик ТЭМ освещены в них недостаточно полно.

Во-первых, отсутствует систематическое изложение с единых методических позиций теории термоэлектрических преобразователей — вывод основных расчетных соотношений, анализ их точности и пределов применимости. Во-вторых, рекомендуемые методики расчета обычно недостаточно учитывают особенности проектирования, изготовления и испытаний конкретных конструкций ТЭМ.

Ниже систематизированы формулы и приведен алгоритм расчета энергетических характеристик ТЭМ в оптимальном режиме работы (максимум КПД). Расчетные формулы получены решением системы уравнений теплового баланса на спаях термоэлементов и уравнений Кирхгофа для электрических цепей [4].

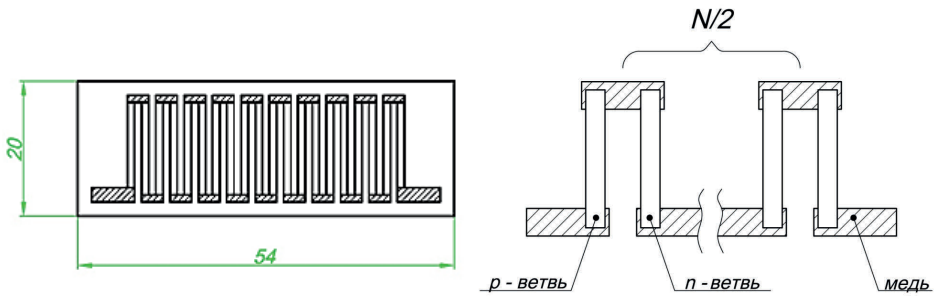


Рис. 3. Расчетная схема пленочного термоэлемента

В соответствии с рекомендациями [4], справочными данными и геометрическими особенностями ПТЭ (рис. 3) примем следующие исходные данные для расчета:

материал полупроводников: *p*-ветвь —  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sb}_{1,5}$ , *n*-ветвь —  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}_{0,3}$ ;

температура «горячего» спая:  $T_1 = 310 \text{ K}$ ;

температура «холодного» спая:  $T_0 = 294 \text{ K}$ ;

номинальное напряжение:  $U = 3,6 \text{ В}$ ;

ток:  $I = 0,1 \text{ А}$ ;

среднеинтегральные коэффициенты термоЭДС:

$$\alpha_n = 175 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}, \quad \alpha_p = 163 \cdot 10^{-6} \text{ В/К};$$

среднеинтегральные коэффициенты теплопроводности:

$$\chi_n = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт / (см} \cdot \text{К)}, \quad \chi_p = 14,3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт / (см} \cdot \text{К)};$$

среднеинтегральные коэффициенты электропроводности:

$$\sigma_n = 855 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}, \quad \sigma_p = 1200 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}.$$

Термоэлектрическая эффективность

$$z = \left[ \left[ \frac{\alpha_n + \alpha_p}{\left( \frac{\chi_n}{\sigma_n} \right)^{0,5} + \left( \frac{\chi_p}{\sigma_p} \right)^{0,5}} \right]^2 \cdot 300 \right] = 0,682.$$

Средняя температура

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_0}{2} = 302 \text{ К.}$$

Перепад температуры

$$\Delta T = T_1 - T_0 = 16 \text{ К.}$$

КПД

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{\sqrt{1 + zT_{cp}} - 1}{\sqrt{1 + zT_{cp}} - T_0/T_1} = 0,051.$$

Выходная электрическая мощность:

$$W = UI = 0,36 \text{ Вт.}$$

Число термоэлементов (пар ветвей):

$$N = \frac{U}{2\alpha\Delta T} \frac{\sqrt{1 + zT_{cp}} + 1}{\sqrt{1 + zT_{cp}}} = 711,943.$$

На основании проведенного расчета установлено, что для генерации напряжения 3,6 В при перепаде температур 16 К необходимо 712 термопар. В одном тонкопленочном термоэлементе 19 термопар, следовательно, термоэлектрическая батарея должна состоять из 38 тонкопленочных термоэлементов.

## Литература

- [1] Гольцман Б.М., Дашевский З.М., Кайданов В.И., Коломоец Н.В. *Пленочные термоэлементы: физика и применение*. Москва, Наука, 1985, 233 с.
- [2] Устройство термоэлектрического модуля (элемента Пельтье). URL: <http://kryothermtec.com/ru/technology> (дата обращения 30.08.2015).
- [3] Rettig F., Moos R. Direct thermoelectric gas sensors: Design aspects and first gas sensors. *Sensors and Actuators B.*, 2007, vol. 143, no 1, pp. 413–419.
- [4] Марченко О.В. *Методы расчета термоэлектрических генераторов*. Новосибирск, Наука, 1995, 199 с.



УДК 621.7:004.9

## Формирование поверхностей пар трения гидрообъемных передач с применением технологии лазерного термоупорочнения

© Егоров Антон Петрович, Гаврилова Вероника Сергеевна,  
Воронов Сергей Андреевич

Россия, Владимирская обл., г. Ковров,  
АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал»»

[Antonpetrovichsud@yandex.ru](mailto:Antonpetrovichsud@yandex.ru)

*Рассмотрен способ повышения ресурса аксиально-плунжерной гидромашин с помощью упрочнения поверхностей пары трения особенно сформированным источником лазерного излучения. Для грамотного подбора режимов обработки (подаваемая мощность, время импульса и скорость движения луча), а также для выбора наилучшей схемы обработки выполнен расчет распределения тепла в металле методом конечных элементов.*

**Ключевые слова:** износ, лазерное упрочнение, метод конечных элементов, моделирование, пара трения.

В настоящее время развитию гидромеханических трансмиссий (ГМТ) самоходных гусеничных машин (ГМ) придается большое значение. Это обусловлено ускоренным развитием промышленности и быстрым переходом на выпуск новых поколений самоходных машин, способных обеспечить внедрение прогрессивных технологий, повышение производительности труда, снижение материалоемкости, увеличение степени автоматизации и механизации производственных процессов. В гидромеханических трансмиссиях самодвижущихся машин, приводах стабилизированной частоты вращения генераторов применяют гидродинамические и гидрообъемные (гидростатические) передачи.

Конкурентоспособность, техническое совершенство и функциональные возможности самоходных машин с ГМТ во многом определяются техническими характеристиками используемых в них гидрообъемных передач (ГОП). Поэтому в настоящее время особенно актуальны научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, способствующие созданию высококачественных, надежных и долговечных ГОП и их элементов, обеспечивающих повышенную эффективность самоходных машин.

Анализ научной литературы показал, что отказы аксиально-поршневых гидронасосов возникают при износе распределительной пары в 34...40 % случаев, при износе поршневых пар в 16...24 % случаев, при износе и поломке башмаков в 12...20 % случаев. Авторы считают, что основными причинами отказов являются недоработка конструкции и несоблюдение технологии производства, а также эксплуатационные факторы: загрязненность рабочей жидкости, нарушение условий смазки, вибрация и гидравлические удары. Все это приводит к интенсивному расширению зазоров в соединениях, увеличению внутренней утечки жидкости и падению объемного КПД.

Повышение износостойкости башмака планируется достичь за счет применения лазерной термообработки. Башмак изготавливается из латуни или бронзы, поскольку

этот материал обладает хорошими трибологическими качествами создающейся пары трения сталь — латунь. Для еще меньшего износа латунь подвергается закалке, но башмак закалывать нельзя, поскольку становится невозможной завальцовка на поршне. Узкая вальцующая шейка от закалки трескается и отламывается.

С помощью лазерной термообработки удалось повысить твердость торцевой поверхности башмака за счет локальности применения лазерного термоупрочнения (ЛТО). С помощью лазерного импульса на рабочей поверхности пяты проведена закалка на глубину 0,3...0,5 мм, сохранив при этом твердость и вязкость остальной части детали неизменной. Это позволяет беспрепятственно завальцовывать пяту на поршне без опасения излома «шейки» и использовать преимущества закаленной латуни в увеличении ресурса. Общий вид башмака при лазерной обработке представлен на рис. 1.

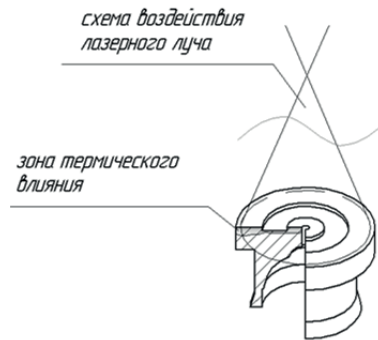


Рис. 1. Общий вид башмака при лазерной обработке

Распределитель изготавливается из стали X12Ф1-Ш с последующей закалкой в несколько циклов. От этого деталь становится твердой, но более хрупкой, что иногда приводит к трещинам. С помощью ЛТО удалось, используя более дешевую сталь 40Х вместо X12Ф1-Ш, добиться тех же значений твердости на глубину 1,1...1,3 мм. Поверхностная твердость составила 61–63 HRC.

В результате локального упрочнения торцевой поверхности распределителя, сердцевина детали осталась мягкой, а значит более стойкой к хрупкому разрушению. Схема наложения упрочняющей дорожки показана на рис. 2.

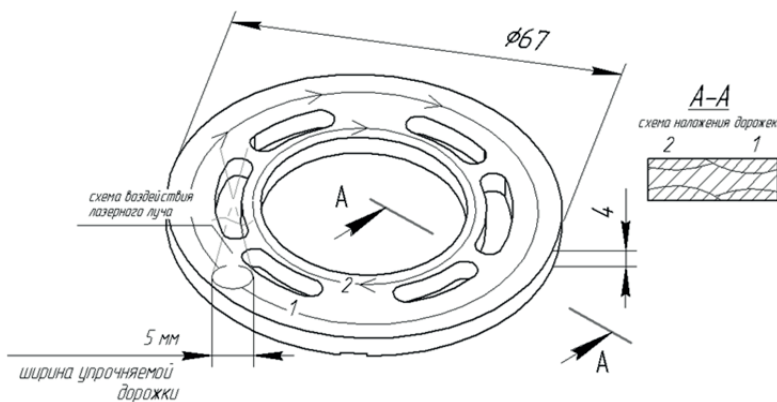


Рис. 2. Схема наложения упрочняющих дорожек

Результатом работы является выбор следующих параметров лазерного излучения:

- подаваемой мощности;
- скорости движения лазерного луча (для детали «распределитель»)
- времени импульса (для детали «пята»)

Чтобы учесть особенности обрабатываемого материала и специальное распределение мощности в поперечном сечении лазерного луча, было произведено моделирование процесса нагрева методом конечных элементов.

### Литература

- [1] Столяров А.В. *Повышение межремонтного ресурса аксиально-поршневого гидронасоса с наклонным блоком восстановлением и упрочнением изношенных поверхностей деталей*. Автореф. дис. Саранск, 2009.
- [2] Егоров В.И. *Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности*. Санкт-Петербург, СПб ГУ ИТМО, 2006, 77 с.
- [3] Григорьянц А.Г. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006, 664 с.

УДК.621.373.826

## Изучение технологических особенностей выращивания заготовок на пятикоординатном комплексе

© Кулиш Александр Михайлович, Лукьянов Михаил Валентинович,  
Третьяков Роман Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[easpn76@gmail.com](mailto: easpn76@gmail.com), [mikhaillukyanov90@gmail.com](mailto: mikhaillukyanov90@gmail.com)

*Аддитивные технологии — принципиально новые методы в производстве металлических изделий, особенно, с применением лазерного излучения. При создании деталей по этим технологиям возникают проблемы обеспечения их требуемых свойств и качества. Рассмотрены особенности выращивания заготовок на пятикоординатном комплексе. Проанализировано влияние траектории перемещения технологической головы на форму профиля заготовок и производительность выращивания. Выбраны оптимальные траектории перемещения технологической головы при выращивании цилиндрической заготовки.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, коаксиальное лазерное плавление, отклонения формы профиля, траектория перемещения.

В настоящее время для изготовления различного рода деталей перспективными являются аддитивные технологии, в частности, благодаря росту номенклатуры различных порошковых материалов. Анализ и опыты показывают, что во многих случа-

ях применение этих технологий позволяет получать изделия экономически более выгодными, с лучшими показателями качества и с приемлемыми параметрами (масса, сложность формы). Аддитивные технологии предпочтительны, когда, например, требуется восстановить поврежденную форму дорогих изделий, таких как лопатки газотурбинных двигателей. Существуют предпосылки экономической выгоды и для выращивания заготовок, например изготовление «блисков» (лопатки + диск) [1].

Несмотря на преимущества аддитивных технологий, существуют сложности их применения с технологической и с экономической точек зрения. Внедрение оборудования для выращивания тех или иных заготовок в промышленных масштабах требует очень больших затрат и подготовки квалифицированного персонала, способного осуществить ряд непростых задач. Наряду с этим, существуют проблемы непосредственного получения заготовок, в связи с чем необходимо подбирать оптимальные режимы выращивания, траектории обхода для симметричности нагрева участков выращиваемой заготовки и т. д.

Независимо от области применения, процессам лазерного выращивания требуются оптимальные параметры для того, чтобы достичь требуемого качества и механических свойств. Выбор этих параметров осуществляется, как правило, экспериментально для различных материалов, таких как коррозионно-стойкая сталь, инструментальные стали, никель и титановые «суперсплавы» и др. В настоящее время день, несмотря на многочисленные исследования, основанные на получении оптимальных параметров процесса с использованием трех или пяти осей перемещения, возрастающая сложность новых заготовок требует тщательного изучения применения пятикоординатных комплексов для выращивания. Регулировка такого вида кинематики представляет собой серьезную проблему. С одной стороны, необходимо использовать CAD/CAM-системы, чтобы иметь возможность программировать необходимые перемещения. Однако эти системы базируются на методах обработки и нет специального программного обеспечения для лазерного выращивания. С другой стороны, с использованием пятикоординатных комплексов увеличивается число параметров, которые требуется оптимизировать (подача порошка, траектория, параметры лазерного излучения и т. д.) [2].

Развитие авиационной промышленности обуславливает повышение спроса на экономически и технологически эффективное, серийное производство сложных деталей двигателей типа «блиски». Из-за их сложной геометрии и высокой стоимости традиционного изготовления, необходимы наиболее эффективные методы изготовления, такие как лазерное выращивание. Как отмечалось выше, для успешного выращивания таких заготовок требуется предварительная проработка не только режимов выращивания для конкретного материала, но и траекторий обхода.

В данной работе на примере выращивания простой цилиндрической заготовки проведен выбор оптимальной траектории перемещения лазерной головы относительно стола, а также определены параметры производительности. В качестве образца использован полый цилиндр (рис. 1) с толщиной стенки, равной ширине наплавляемого валика, а в качестве критерия оптимальности типа перемещения лазерной головы — разброс между отклонениями профиля полученных образцов. То есть наиболее оптимальной траекторией перемещения лазерной головы будет являться та, при которой получается более пологий профиль поверхности выращенного образца.

В качестве технологии выращивания выбрана DMD-технология (Direct Metal Deposition), или технология коаксиального лазерного плавления порошкового материала (рис. 2).

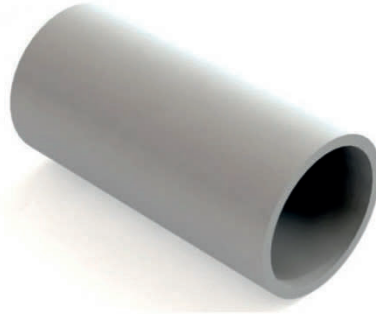


Рис. 1. Вид выращиваемой заготовки

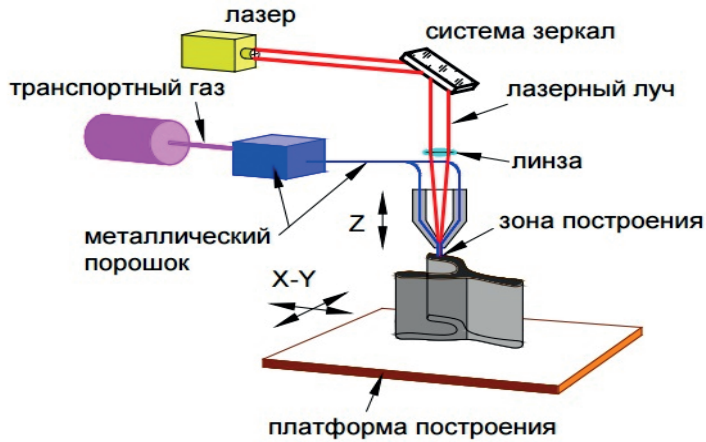


Рис. 2. Схема DMD-технологии

В процессе выращивания в качестве источника тепла для создания ванны расплава на нижней подложке/слое используется сфокусированный лазерный луч как. Порошковый материал подается коаксиально лазерному лучу вместе с газом (аргоном), который играет роль как транспортного, так и защитного газа. Поступающий порошок металлургически связывается с материалом подложки или слоя вследствие кристаллизации. Заготовка получается путем послойного наплавления порошкового материала в соответствии с сечением и траекторией обхода по CAD модели с подъемом на заданный шаг (инкремент) по оси Z для нанесения последующих слоев [3].

Достоинства/недостатки DMD-технологии:

- 1) возможность получения заготовок сложной формы, но, как правило, сплошных или полых с простой конфигурацией (в сочетании с пятикоординатным комплексом). Возможности SLM/SLS технологий в этом случае гораздо выше;
- 2) использование мощных лазеров, в отличие от SLM или SLS технологии, следовательно, производительность процесса выше;
- 3) точность получения заготовок ниже, чем у SLS/SLM-технологии и ограниченность в минимальной толщине стенок заготовки;
- 4) контролируемое тепловое воздействие;

- 5) повышенные свойства наплавленных слоев;
- 6) высокие скорости охлаждения;
- 7) возможность получать заготовки из различных порошковых материалов;
- 9) минимальные напряжения и отклонения формы в наплавленных слоях.
- 10) Достижение 100 %-ной плотности выращенного материала, в отличие от SLS-технологии.

11) применение для различных технологий (выращивание, восстановление и т. д.).

При исследовании выращивание проводилось на базе пятикоординатного комплекса, как наиболее точного по сравнению с другими вариантами, например, с выращиванием на роботизированном комплексе. В этом комплексе пять координат основаны на линейных двигателях, три из которых ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) располагаются на технологической голове, а две других ( $A$ ,  $B$ ) на столе (рис. 3).

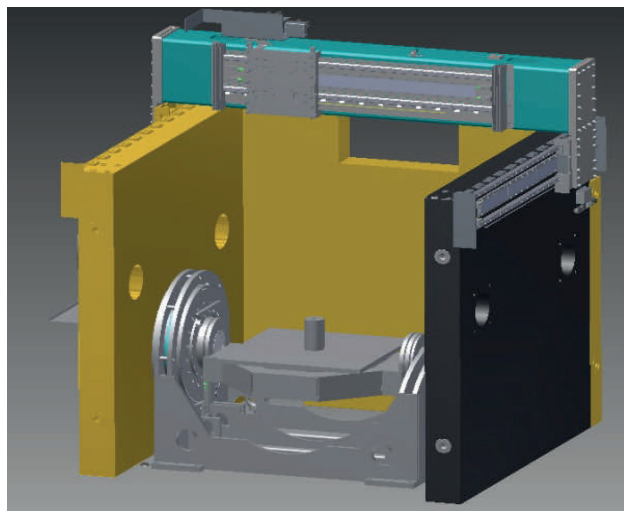


Рис. 3. Модель пятикоординатного комплекса

В качестве лазера применялся иттербиевый волоконный лазер ЛС-4, для подачи порошка — порошковый питатель PF2/2 (рис. 4). Профиль образцов измерялся с помощью цифрового индикатора S Dial S229 фирмы Syvas на специальном вращательном столе, который подключен к компьютеру с требуемым программным обеспечением. В качестве порошка для выращивания применялся состав 316L из коррозионно-стойкой стали (Cr 17 %, Fe 64 %, Mo 2 %, Ni 12 %).

Траектории обхода были выбраны следующие: перемещение технологической головы по спирали, без смещения (проход по кругу, затем подъем на величину инкремента по оси  $Z$ ), со смещением (то же самое, но начало обхода не из стартовой точки, а с поворотом на  $90^\circ$ ) и с вращением стола (при неподвижной технологической голове).

Режимы выращивания были постоянными для всех образцов:

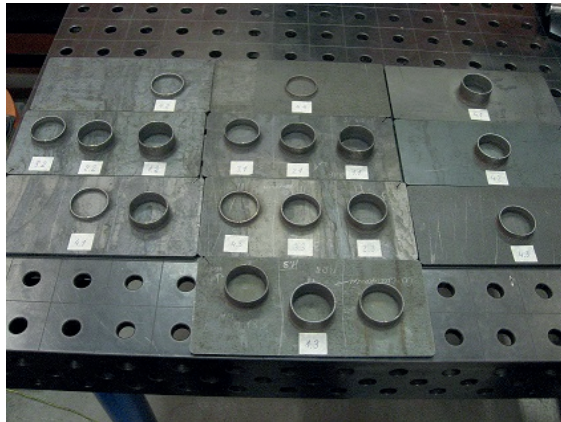
- мощность лазерного излучения 1040 Вт;
- скорость перемещения 600 мм/мин;
- расход газа (аргон) 10 л/мин;
- смещение по оси  $Z$  (инкремент) 0,39 мм;

- расход порошка 8 г/мин;
- расположение фокуса 12,5 мм от сопла.

Высота образцов для каждого вида траектории составляла 5, 10, 15 и 20 мм. Производительность для каждого вида траектории определялась как отношение массы наплавленного порошка ко времени выращивания.



**Рис. 4.** Порошковый питатель PF2/2 (а) и индикатор S229 (б)



**Рис. 5.** Выращенные заготовки

Измерение проводилось перемещением индикатора по окружности, предварительно разделенной на равные части (28 точек), с помощью программного обеспечения. Полученные данные представлены на рис. 6, 7.

Как видно на экспериментальных кривых, наиболее пологий профиль выращенных заготовок получается при их выращивании за счет вращения стола, при неподвижной технологической голове. Это обусловлено минимальными нестабильностями в системе перемещения и системе подачи порошка, в отличие от движения

технологической головы. Траектории перемещения по спирали и без смещения практически идентичны, тенденция изменений размеров профиля для них одинаковая. После самого ровного профиля следует профиль с траекторией выраживания со смещением, причем разница между различными профилями сильнее варьируется при выраживании самого высокого образца.

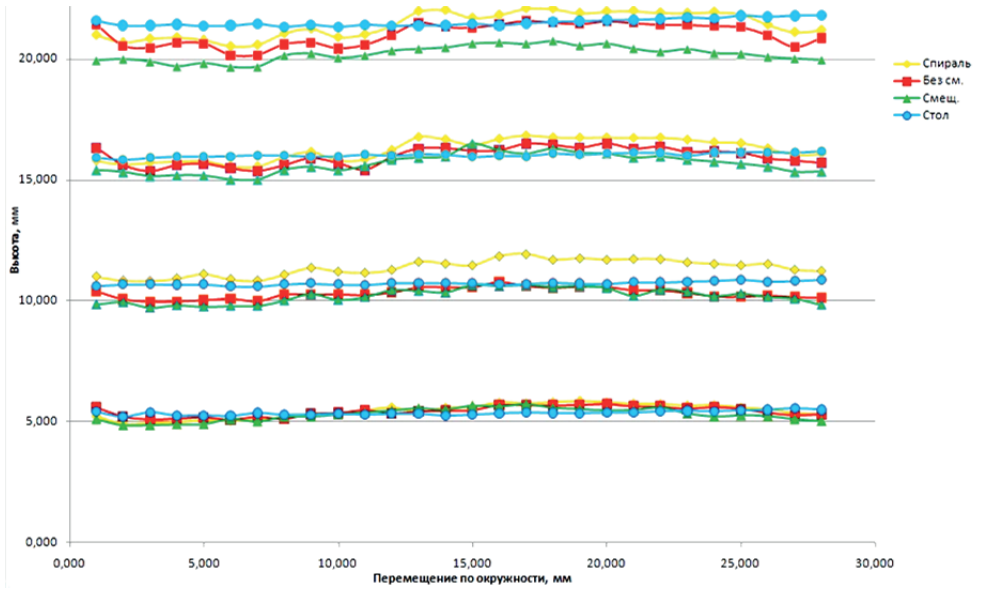


Рис. 6. Кривые измеренных профилей

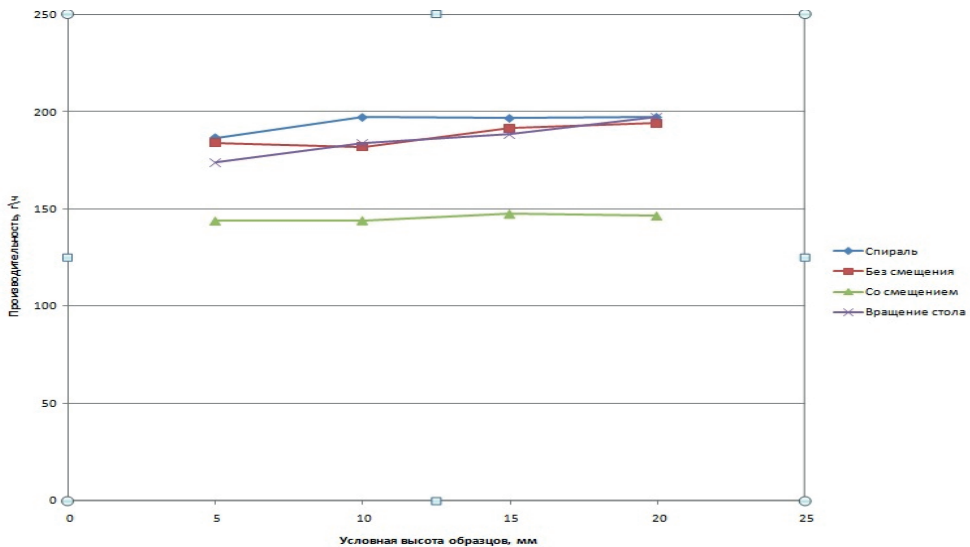


Рис. 7. Кривые производительности на каждом образце



Пониженную производительность при выращивании со смещением можно объяснить неравномерностью нагрева нижележащих слоев при выращивании, следовательно, неравномерностью нанесения порошкового материала. В остальном производительность в зависимости от высоты выращиваемой заготовки можно считать постоянной.

В заключение следует отметить важность работ по изучению и развитию аддитивных технологий, особенно в современных условиях роста потребности в высокопроизводительных технологиях. По сравнению с другими традиционными технологиями аддитивные технологии можно считать самыми новыми и неизученными, с большим потенциалом для исследований. Необходимо также переходить от изучения и изготовления простых конструкций к более сложным, применять накопленные знания для их изготовления, делать их более технологичными.

### Литература

- [1] Довбыш В.М., Забеднов П.М., Зеленко М.А. *Аддитивные технологии и изделия из металла*. URL: [http://nami.ru/upload/AT\\_metall.pdf](http://nami.ru/upload/AT_metall.pdf) (дата обращения 09.09.2015).
- [2] Amaia Calleja, Iván Taberero, Aitzol Lamikiz. Optimal Parameters for 5-axis Laser Cladding. *Elsevier, Procedia Engineering*, 2013, vol. 63, pp. 45–52.
- [3] Jianzhong Ruan, Todd E. Sparks, Zhiqiang Fan. *A Review of Layer Based Manufacturing Processes for Metals*. URL: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2006/2006-22-Ruan.pdf> (дата обращения 09.09.2015).

УДК.621.373.826

## Особенности газопорошковой лазерной наплавки покрытий лучом прямоугольного сечения

© Макаренко Константин Игоревич, Ставертий Антон Яковлевич,  
Третьяков Роман Сергеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

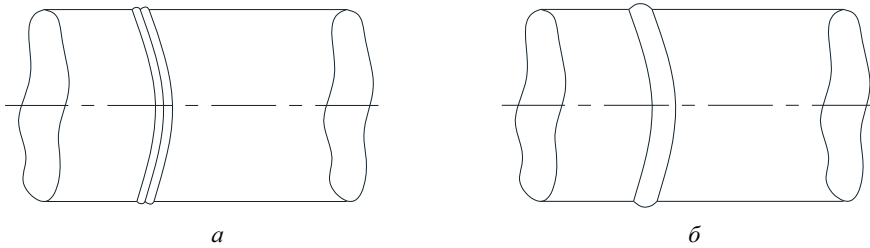
[makarenko.bmstu@gmail.com](mailto:makarenko.bmstu@gmail.com), [mt12.anton@gmail.com](mailto:mt12.anton@gmail.com)

*Рассмотрен технологический процесс газопорошковой лазерной наплавки покрытий лучом прямоугольного сечения, его преимущества, недостатки и характерные особенности. Представлены результаты разработки оптимальной конструкции порошкового сопла и примерные схемы двух измерительных стендов, предназначенных для оценки геометрии газопорошковой струи, поступающей в зону обработки, и для поиска наилучшего взаимного расположения двух порошковых сопел на лазерной головке.*

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, прямоугольный луч, газопорошковая струя, порошковое сопло, лабораторный стенд.

Газопорошковая лазерная наплавка (ГПЛН) заключается в получении поверхностных покрытий принудительной подачей порошка газовым потоком непосредственно в зону лазерного излучения. Частицы порошка начинают нагреваться в зоне лазерного излучения вплоть до попадания на обрабатываемую поверхность, на которой они достигают полного расплавления с последующей кристаллизацией и формированием валика. Газопорошковая лазерная наплавка характеризуется следующими параметрами: мощность лазерного излучения  $P$ , скорость перемещение образца под излучением, т. е. скорость наплавки  $v_{\text{нап}}$ , диаметр пятна нагрева лазерного излучения  $d_n$ , определяемый условием фокусировки излучения, массовый расход подаваемого в зону обработки порошка  $G_n$ , расстояние с которого вводится порошок  $L$ , угол ввода порошка  $\alpha$ .

Газопорошковая лазерная наплавка лучом прямоугольного сечения является более производительной технологией по сравнению с традиционной ГПЛН, при которой используется луч круглого сечения, так как в последнем случае спеченный порошок описывает на поверхности обрабатываемой детали узкую спиралеобразную кривую, тогда как при ГПЛН прямоугольным лучом эта кривая имеет в 2–3 раза большую ширину и покрытие всей поверхности происходит за значительно меньшее число проходов при приблизительно одинаковых затратах порошка (рис. 1). Таким образом, экономится время и дорогостоящая энергия лазерного источника.



**Рис. 1.** Схема формирования валиков на валу:  
 а — лучом круглого сечения; б — лучом прямоугольного сечения

В настоящее время технология ГПЛН лучом прямоугольного сечения активно применяется и развивается в научных институтах и на опытных производствах ряда стран, таких как США, Япония, Германия. В мировой промышленности используются различные типы конструкций технологической оснастки и порошковых сопел, например, в институте Fraunhofer (Германия) для ГПЛН прямоугольным лучом применяются два сопла, крепящиеся с противоположных сторон лазерной головки. Каждое из них имеет два входных и четыре выходных отверстия (рис. 2). Четыре газопорошковые струи круглого сечения на выходе из одного порошкового сопла за счет расходимости объединяются в единый поток, имеющий квазипрямоугольное сечение. Далее два таких потока (по одному от каждого сопла) пересекаются друг с другом в области фокуса лазерного излучения и начинается процесс плавления. Поскольку в отечественной науке и технике на данный момент отсутствуют какие-либо разработки и экспериментальные данные по ГПЛН лучом прямоугольного сечения, авторами данной работы были разработаны собственные уникальные конструкции порошковых сопел (рис. 3), среди которых экспериментальным путем было найдено оптимальное с точки зрения выходных параметров газопорошковой струи конструктивное решение.

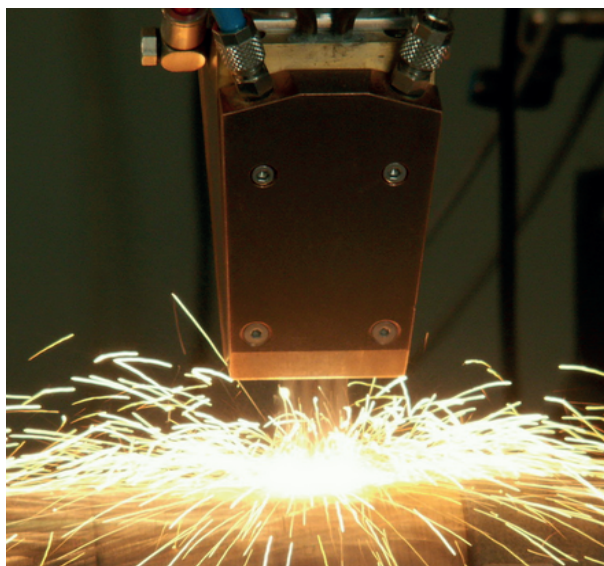


Рис. 2. Порошковое сопло (Институт Fraunhofer)

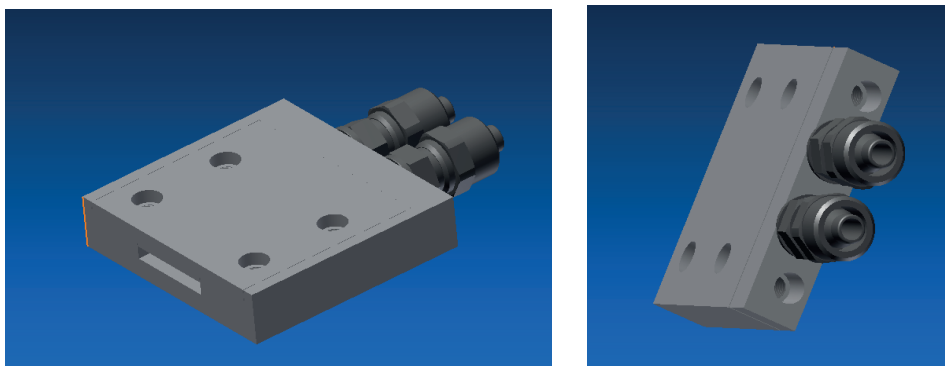


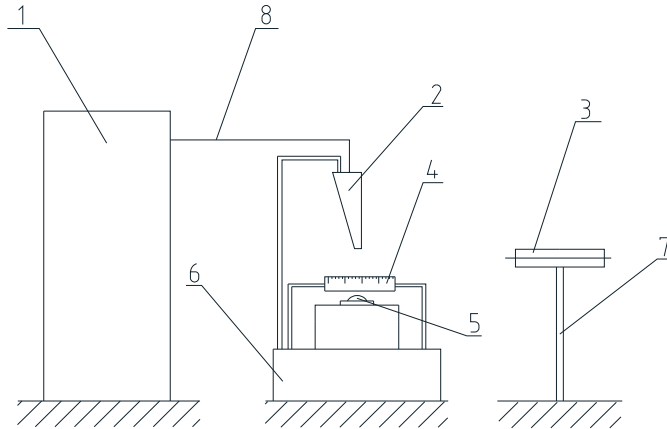
Рис. 3. 3D-модель спроектированного порошкового сопла

Было изготовлено шесть различных образцов порошковых сопел, отличающихся друг от друга числом входных отверстий, наклоном внутренних стенок и шириной выходной щели (табл. 1):

Таблица 1

№ п/п	Число входных отверстий	Ширина выходной щели, мм	Наклон внутренних стенок, град
1	1	2	0
2	2	1	0
3	2	2	0
4	2	3	0
5	2	2	0,95
6	2	2	1,91

Для выбора из этих вариантов оптимального были измерены геометрические параметры газопорошкового потока на выходе из сопла. Для проведения испытаний был собран лабораторный измерительный стенд (рис. 4). В экспериментах использовалось следующее оборудование: порошковый питатель GTV PF 2/2 с трубками для подачи порошка и соединительными фитингами, скоростная камера Fastvideo 500M, оснащенная объективом Nikon CL-45, портативный диодный фонарь DNS, измерительная линейка, штативы для камеры и порошкового сопла. Во всех опытах применялся порошок на никелевой основе с размером фракций 50...106 мкм, в качестве вспомогательного газа использовался аргон, подаваемый под давлением 5 атм.



**Рис. 4.** Схема лабораторного измерительного стенда для оценки параметров газопорошкового потока (пропорции для наглядности изменены):

1 — порошковый питатель; 2 — порошковое сопло; 3 — скоростная камера; 4 — измерительная линейка; 5 — источник света; 6 — стол; 7 — штатив; 8 — порошковый шланг

Эксперименты проводились при следующих условиях:

- 1) яркое освещение газопорошковой струи снизу;
- 2) отсутствие иных источников света в лаборатории;
- 3) наличие за соплом темного фона, хорошо поглощающего свет.

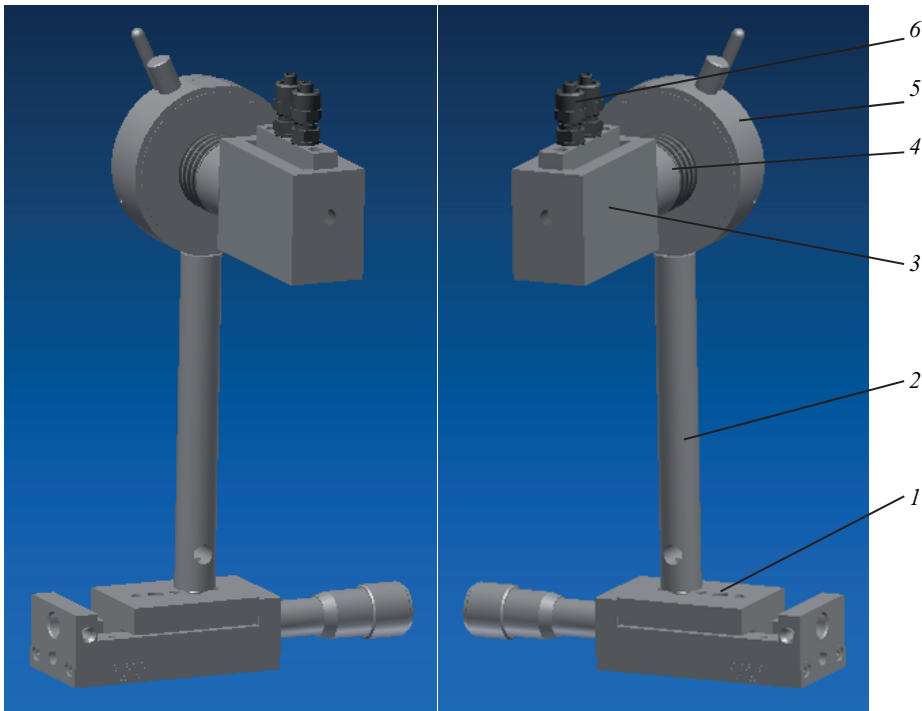
Обработка результатов измерений позволила сделать следующие выводы: оптимальное число входных отверстий в сопле — два, оптимальная ширина выходной щели — 2 мм, оптимальный угол наклона внутренних стенок друг к другу — 0°. Таким образом, наилучшим и пригодным для дальнейших исследований был признан образец сопла №3. Отбор производился по критериям, согласно которым сопло на выходе должно давать газопорошковую струю с низкой расходимостью и максимальным соответствием требуемым геометрическим параметрам, обусловленными размерами пятна нагрева лазерного излучения в плоскости обработки. Кроме этого, порошковое сопло для ГПЛН лучом прямоугольного сечения должно удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) материал сопла должен иметь высокую теплопроводность и малые коэффициенты объемного и линейного теплового расширения. Этим требованиям удовлетворяет медь и сплавы на ее основе, в том числе латунь.

2) технологичность. Практика показала, что простой в изготовлении и надежной в эксплуатации является конструкция, состоящая из трех основных деталей: задняя стенка, передняя стенка, крышка. Каждая деталь изготавливается на фрезерном станке, сборка осуществляется при помощи винтовых соединений. Подводящие порошок трубки соединяются с входными отверстиями сопла при помощи фитингов;

3) конструкция сопла должна предусматривать возможность присоединения последнего к лазерной головке при помощи системы крепления и позиционирования.

В дальнейших исследованиях необходимо найти оптимальное взаимное расположение сопел: угла наклона их к вертикали и расстояние друг относительно друга. В настоящее время завершено проектирование лабораторного стенда для решения данной задачи (рис. 5).



**Рис. 4.** Схема лабораторного измерительного стенда, предназначенного для определения оптимального взаимного расположения сопел и регулировки угла их наклона к вертикали:  
 1 — линейный транслятор; 2 — стойка; 3 — кожух; 4 — соединительный стержень; 5 — держатель поляризаторов; 6 — сопло

Измерительный стенд состоит из двух одинаковых блоков. В состав каждого блока входит линейный транслятор 1, стойка 2 и держатель поляризаторов 5, в котором с помощью соединительного стержня 4 фиксируется кожух 3. В кожух помещается порошковое сопло 6, опорой для которого служат специальные пластинки в нижней части кожуха. Зазор между стенками кожуха и соплом составляет 0,5 мм. Пара линейных трансляторов позволяет с высокой точностью регулировать расстояние между соплами; держатели поляризаторов необходимы для прецизионной регулировки угла наклона сопел к вертикали.

Таким образом, наиболее важным шагом в дальнейшем развитии технологии ГПЛН лучом прямоугольного сечения и необходимым условием внедрения ее в отечественное производство является окончательное создание оптимальной конструкции технологической оснастки (сопел и системы их позиционирования относительно лазерной головки) и расчет требуемых режимов обработки для различных типов порошковых материалов и материалов основы. Сопло должно создавать газопорошковую струю, имеющую заданные геометрические параметры и низкую расходимость; система позиционирования должна обеспечивать прецизионное и согласованное изменение взаимного расположения сопел; режимы обработки — обеспечивать высокую прочность и износостойкость нанесенных покрытий. Технология ГПЛН лучом прямоугольного сечения имеет большие перспективы для применения как в серийном, так и в массовом производстве. Высокая производительность процесса позволяет заменить плазменную и электродуговую наплавку лазерной с обеспечением более высокого качества наплавленного слоя и меньшими тепловыми воздействиями на деталь. Высоки перспективы применения данной технологии для обработки крупногабаритных деталей, что обусловлено высокой производительностью процесса. Кроме того, можно утверждать, что ГПЛН лучом прямоугольного сечения развивается именно для обработки крупногабаритных деталей, таких как валы автомобиле- и судостроения и буровое оборудование.

#### Литература

- [1] Григорьянц А.Г. *Основы лазерной обработки материалов*. Москва, Машиностроение, 1989, 301 с.
- [2] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 363 с.
- [3] Асютин Р.Д., Ставертий А.Я. *Экспериментальное исследование газопорошкового потока при лазерной наплавке с использованием различных технологических насадок*. URL: <http://studvesna.ru?go=articles&id=1043> (дата обращения 06.04.2015).

УДК 621.37

### **Методика контроля механических примесей в маслах при помощи лазерного излучения**

**© Мельникова Мария Александровна, Якимова Мария Анатольевна, Мельников Дмитрий Михайлович**

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[daenoor@gmail.com](mailto:daenoor@gmail.com)

*Разработана методика для экспресс-контроля концентрации механических примесей в нефтяных маслах в процессе их эксплуатации в тяжелых условиях, например в строительной технике. Методика основана на методе лазерного фазового анализа,*

*который предполагает исследование ослабления лазерного излучения, проходящего через замерзающий образец масла. Оценка сравнения взаимодействия лазерного излучения чистого образца и загрязненного позволяет определить значения показателя концентрации примесей.*

**Ключевые слова:** *лазер, экспресс анализ, нефтяные масла, концентрация примеси.*

Эффективность работы различной техники — от станков до транспортных машин — обусловлена эффективностью работы смазочных систем. Для корректного функционирования механизмов специалисты разрабатывают специальные смазочные материалы, однако при постепенной отработке масел может снижаться и эффективность работы механизмов. Для решения задачи контроля отработки масел ранее был разработан метод лазерного фазового анализа (ЛФА) [1, 2]

Отработка масла вызывает изменение целого ряда его параметров, приводящих как правило к сбою режима смазки. Ярким примером может служить эксплуатация гидроприводов строительных машин, в которых загрязнение абразивными примесями может стать даже причиной отказа системы, что приводит к очень дорогому ремонту. Причины деградации масла могут быть разные, они не всегда связаны с начальным качеством материала, это может быть естественный процесс, происходящий при работе смазки. Например, моторные масла часто обладают моющим эффектом для удаления нагара с элементов двигателя. Попадание воды может происходить разными путями [3] и ведет к целому ряду негативных последствий, в частности: повышению коррозионной активности, снижению противоизносных свойств, образованию кристаллов льда при низких температурах [4]. Выявление загрязнения масел механическими примесями очень важно при их эксплуатации [5]. Своевременный контроль состояния смазочных материалов снижает общую стоимость эксплуатации механизмов [6].

Методом ЛФА благодаря его информативности и универсальности за время одного анализа можно определить сразу несколько свойств материала, что может быть очень удобно. Однако результаты исследований, описанные в [1, 2], указывают на необходимость дальнейшего развития этого метода и улучшения точности и повторяемости получаемых данных. В предлагаемой работе было проведено теоретическое и экспериментальное исследование особенностей распространения лазерного излучения в модельной среде. Эта проблема является ключевой для метода, так как именно по данным регистрируемого после взаимодействия с образцом лазерного излучения собирается информация о состоянии вещества. Основным фактором, влияющим на изменение условий распространения лазерного излучения в парафинистых нефтепродуктах, выбрано распределение размеров, взвешенных в модельной среде частиц (кристаллов парафинов) в процессе ее охлаждения.

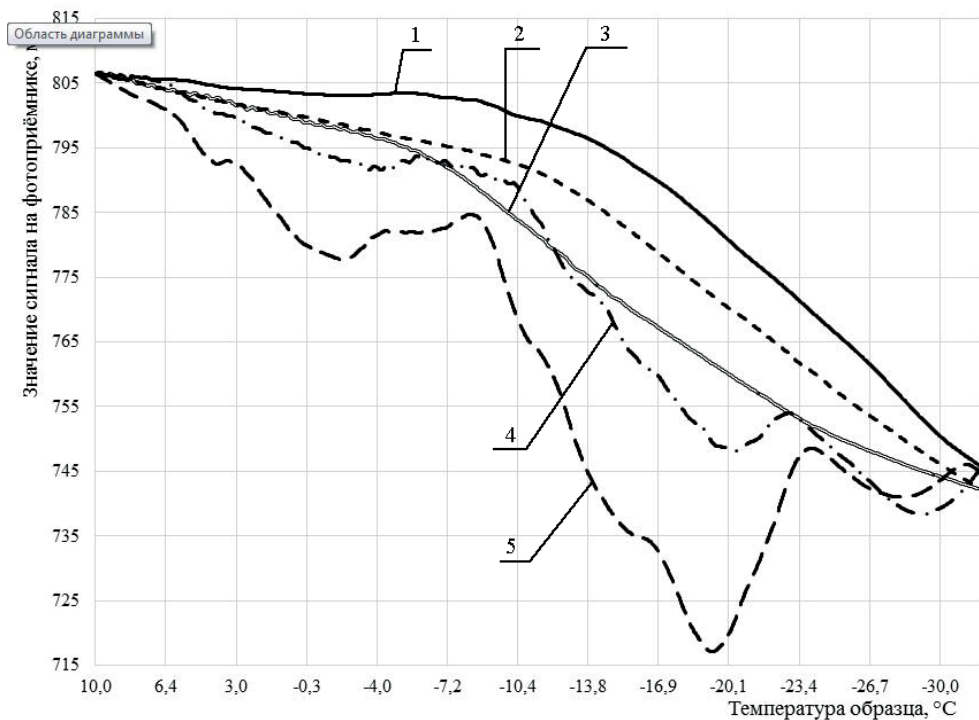
Задачей настоящего исследования поставлена разработка интегральной методики анализа образцов масла заключающейся в калибровке измерительного оборудования по стандартным образцам. Для решения данной задачи был подготовлен чистый образец и набор загрязненных механическими частицами с размерами одного порядка — 1...10 мкм в определенных концентрациях взвешенных частиц.

В качестве материала для исследований было выбрано достаточно широко распространенное в системах авиационной техники, наземного и морского транспорта, эксплуатируемых в широком диапазоне рабочих температур (–60...+55 °С) масло марки АМГ-10. Калибровочные и тестовые измерения проводились при помощи прибора «АСС-экспресс», подробно описанного в работе [1]. Особенность данного

прибора — возможность проводить экспресс-анализ. Охлаждение образцов реализовано при помощи термоэлемента Пельтье, что делает прибор компактным. Скорость охлаждения образцов для исследований на данном приборе оптимизирована ранее [2] и составила  $7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . При таком режиме достигается сравнительно равномерный по объему механизм застывания масла. Остаточные фазы в образце предварительно растворялись путем подогрева до температуры  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

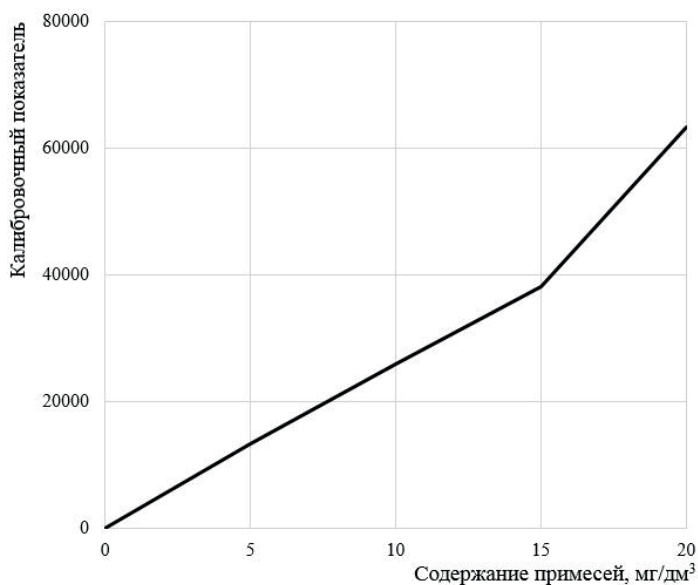
Для построения калибровочных зависимостей экспериментально исследовались образцы с содержанием механических примесей  $5, 10, 15$  и  $20\text{ мг}/\text{дм}^3$  (рис. 1). Для того чтобы оценить только изменения во взаимодействии лазерного излучения с образцами при охлаждении, зависимости, представленные на рис. 1, приведены к одному уровню на начальном и конечном положениях и усреднены по данным серии измерений. Следует отметить, что поле допуска для данных образцов с концентрациями  $15$  и  $20\text{ мг}/\text{дм}^3$  выше, чем для остальных, т. е. процесс охлаждения идет нестабильно.

Для построения калибровочной зависимости были подсчитаны отклонения измерений каждого типа образцов от чистого масла. Эти отклонения были приняты в качестве показателя содержания механических примесей. Полученная калибровочная зависимость показана на рис. 2. Она достаточно близка к линейной, что хорошо согласуется с линейным изменением состава образцов.



**Рис. 1.** Зависимости изменения сигнала на фотоприемнике от температуры образцов:  
 1 — чистый образец; 2 — образец с содержанием механических примесей  $5\text{ мг}/\text{дм}^3$ ; 3 — образец с содержанием механических примесей  $10\text{ мг}/\text{дм}^3$ ; 4 — образец с содержанием механических примесей  $15\text{ мг}/\text{дм}^3$ ; 5 — образец с содержанием механических примесей  $20\text{ мг}/\text{дм}^3$





**Рис. 2.** Калибровочная зависимость для определения концентрации механических примесей в масле АМГ-10

Для тестирования полученной зависимости были проведены контрольные измерения образцов с содержанием механических примесей. Для контрольных образцов повторялись аналогичные измерения. По данным калибровочной кривой значение содержания механических примесей в первом образце составило  $5,08 \text{ мг/дм}^3$ , а во втором —  $7,78 \text{ мг/дм}^3$ . Таким образом, погрешности измерений по предложенной методике на приборе «АСС-экспресс» составили приблизительно 2 и 4 % соответственно. Для второго образца погрешность выше, что было ожидаемо, так как методика подразумевает калибровку в условиях типового загрязнения масла.

Таким образом, разработана методика определения механических примесей в нефтяных маслах при помощи метода ЛФА и прибора «АСС-экспресс», реализующего данный метод. Предложенная методика успешно опробована на примере гидравлического масла АМГ-10, в дальнейшем она может быть опробована и на моторных маслах. При этом на использованных в данной работе контрольных образцах получена достаточно высокая для экспресс методов точность измерений — 2-3 %. Рекомендуется проводить калибровку в условиях типового загрязнения масла, так как при анализе образца с другим механизмом загрязнения точность существенно ниже — около 4...5 %, что в целом не исключает использование разработанной методики при экспресс-анализе.

Методика позволяет своевременно решать проблему оперативного контроля степени загрязнения масел механическими частицами. Прибор «АСС-экспресс» может найти применение непосредственно на местах хранения и эксплуатации объектов контроля. К преимуществам его использования можно также отнести отсутствие требований к специальному обучению оператора и малое время анализа (в среднем 20 мин).

*Статья выполнена в рамках работ по гранту от Российского научного фонда № 141901216.*

## Литература

- [1] Шиганов И.Н., Мельников Д.М. Оборудование и методики лазерного фазового анализа для определения эксплуатационных характеристик дизельного топлива. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. Машиностроение*, 2012, спец. выпуск № 5 «Лазерные технологические процессы в машиностроении», с. 51–62.
- [2] Мельников Д.М. Шиганов И.Н. Влияние скорости охлаждения образцов на показатели метода лазерного фазового. *Научно-технические технологии в машиностроении*, 2014, № 3, с. 25–27.
- [3] Пучков Н.Г. *Товарные нефтепродукты, их свойства и применение: справочник*. Москва, Химия, 1971, 414 с.
- [4] Романцова С.В., Павлов С.С. Предупреждение обводнения топлив при хранении. *Вестник ТГУ*, 2013, т. 18, № 1, с. 253–254.
- [5] Рахманов А.А. Регенерация моторных масел и рабочих жидкостей автотракторного транспорта методом адсорбции. *Современные материалы, техника и технология: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 2013*, с. 291–295.
- [6] Martin Reik, Jung Frank. Condition Monitoring / Theo Mang. *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014, vol. 1, pp. 279–291.

УДК.621.373.826

## Исследование структуры и механических свойств тонкостенных объектов, полученных многослойной лазерной наплавкой

© Нигай Анастасия Руслановна, Ощепков Дмитрий Станиславович,  
Ставертий Антон Яковлевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[demansan@mail.ru](mailto:demansan@mail.ru), [mt12.anton@gmail.com](mailto:mt12.anton@gmail.com), [virtuoz544@mail.ru](mailto:virtuoz544@mail.ru)

*Исследованы структура и свойства объектов, выращенных коаксиальным лазерным плавлением порошковых материалов. Проанализированы микротвердость и микроструктура элементарных объектов типа «цилиндрическая стенка», выращенных различными стратегиями обхода по контуру. Установлено, что стратегия выращивания влияет не только на геометрические размеры и форму выращенных стенок, но и на прочностные свойства материала за счет различных условий охлаждения в процессе наплавки.*

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, аддитивные технологии, структура материала, стратегия выращивания, коаксиальное лазерное плавление.

В работе исследованы структуры и свойства элементарных объектов, выращенных технологией коаксиального лазерного плавления, полученных различными стратегиями обхода по контуру.

Широкое развитие компьютерных систем при проектировании сложных изделий обусловило развитие аддитивных технологий [1–3], использующих современные источники энергии для обработки, в том числе и лазерные источники, и сложные системы перемещения. Наиболее универсальной считается пятикоординатная система перемещения для выращивания объектов сложной формы. Однако при таком выращивании сложно прогнозировать структуру и свойства металла. В связи с этим дробно необходимо исследовать свойства сложных объектов, таких, как, например, объекты типа «цилиндрическая стенка». В данной работе этот объект исследован в качестве элементарного трехмерного объекта, выращиваемого без заливки слоя одинокими дорожками.

В работе исследованы цилиндрические объекты, полученные следующими стратегиями выращивания объектов:

1) оси  $OX$  и  $OY$  + ось  $Z$ , непрерывно (рис. 1). Способ обработки, при котором голова перемещается по спирали вверх: оси  $OX$  и  $OY$  системы перемещения обрабатывают перемещение по окружности, а ось  $Z$  приподнимается вверх плавно, согласованно со скоростью перемещения головы в плоскости;

2) оси  $OX$  и  $OY$  + ось  $Z$ , ступенчато (рис. 2). Выращивание осуществляется по окружности, с помощью перемещения коаксиального сопла в плоскости по осям  $OX$  и  $OY$ . После создания слоя, процесс останавливается, голова приподнимается на толщину слоя (на один дискретный шаг) по оси  $Z$ , затем процесс возобновляется с тех же координат  $X$  и  $Y$ ;

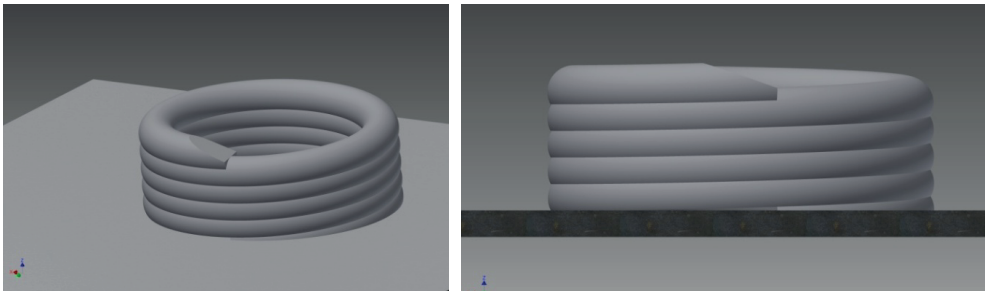


Рис. 1. Цилиндрическая стенка, выращенная непрерывно

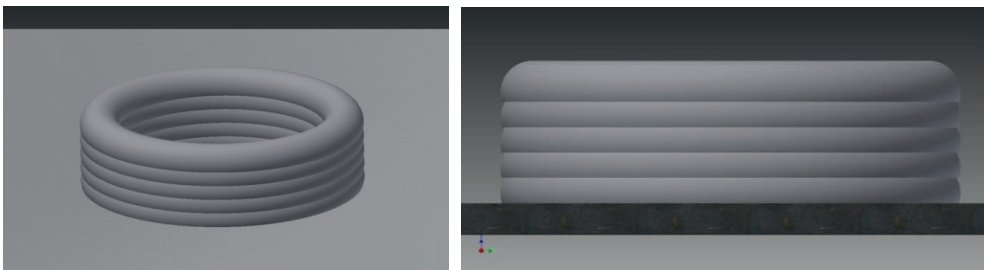


Рис. 2. Цилиндрическая стенка, выращенная дискретно

3) оси  $OX$  и  $OY$  + ось  $Z$ , ступенчато (см. рис. 2). Выращивание осуществляется по окружности, с помощью перемещения коаксиального сопла в плоскости по осям  $OX$

и  $OY$ . После создания слоя, процесс останавливается, голова приподнимается на толщину слоя (на один дискретный шаг) по оси  $Z$ , после этого процесс возобновляется. При этом для исключения дефектов стыка стартовая точка обработки перемещается на угол  $90^\circ$  по часовой стрелке по контуру выращивания после каждого выращенного слоя;

4) поворотный стол + ось  $Z$  (см. рис. 1). Технологическая голова приподнимается над столом непрерывно, с шагом, согласованным со скоростью вращения стола.

Высота образцов (рис. 3) изменялась и составляла 5, 10, 15 и 20 мм для каждого вида траектории. Производительность рассчитывалась как отношение массы наплавленного порошка ко времени выращивания и определялась также для каждого вида траектории.

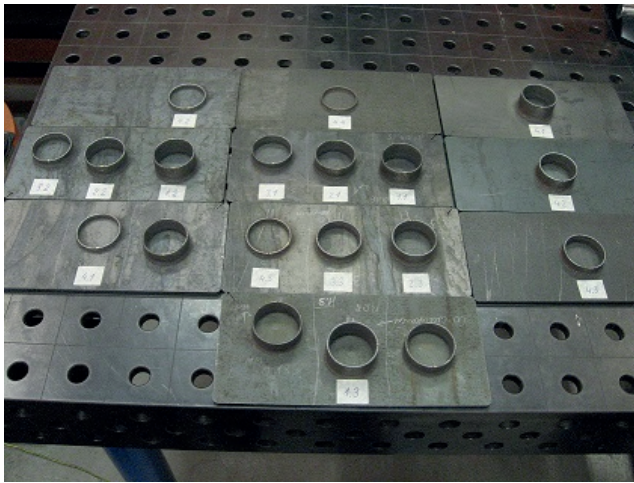


Рис. 5. Выращенные заготовки

В данной работе использован порошок коррозионно-стойкой стали аустенитного класса марки 316L. Сталь обладает высокой коррозионной стойкостью и применима в широком ряде ненагруженных деталей конструкций, в том числе для судостроения и автомобилестроения.

Эксперименты по выращиванию объектов проводились на пятиосевом лазерном комплексе. В качестве лазера применялся иттербиевый волоконный лазер ЛС-4, для подачи порошка — порошок питатель PF2/2. Профиль образцов измерялся с помощью цифрового индикатора S Dial S229 фирмы Sylvac на специальном вращательном столе, который подключен к компьютеру с требуемым программным обеспечением. В качестве порошка для выращивания использован состав 316L из коррозионно-стойкой стали (Cr 17 %, Fe 64 %, Mo 2 %, Ni 12 %).

Режимы выращивания были постоянными для всех образцов:

- мощность лазерного излучения 1040 Вт;
- скорость перемещения 600 мм/мин;
- расход газа (аргон) 10 л/мин;
- смещение по оси  $Z$  (инкремент) 0,39 мм;
- расход порошка 8 г/мин;
- расположение фокуса 12,5 мм от сопла.

Образцы к исследованиям изготавливались на металлографическом оборудовании фирмы Struers. На отрезном станке Discotom-6 образцы были отрезаны, запрессованы в термоактивную смолу в автоматическом прессе Citopress-20 и отполированы на шлифовально-полировальном станке Tegramin-20. Микротвердость измерена на твердомере DuraScan 20. Снимки сделаны с помощью инвертированного металлографического микроскопа OLYMPUS GX-51.5.

В результате исследований получены распределения твердостей по высоте выращенных объектов. Установлено, что твердость образца зависит от расстояния от подложки и изменяется для каждой стратегии определенным образом. Средняя микротвердость материала образцов, выращенных по технологии КЛП, не уступает твердости металлов, полученных традиционными технологиями: литьем, обработкой резанием, штамповкой.

Получены стенки толщиной до 2 мм. Высота стенок, задаваемая с программы, составляла 5...20 мм. Проведены измерения толщины слоя в зависимости от стратегии выращивания объектов.

Исследована микроструктура выращенных стенок. В ходе работы установлено, что наиболее стабильная твердость материала получена на образцах, выращенных по спирали. Определено, что существует взаимосвязь между стратегией обхода и структурой металла выращенных объектов.

#### Литература

- [1] Довбыш В.М., Забеднов П.М., Зеленко М.А. *Аддитивные технологии и изделия из металла*. URL: [http://nami.ru/upload/AT\\_metall.pdf](http://nami.ru/upload/AT_metall.pdf) (дата обращения 09.09.2015)
- [2] Amaia Calleja, Iván Tabernero, Aitzol Lamikiz. Optimal Parameters for 5-axis Laser Cladding. *Elsevier, Procedia Engineering*, 2013, vol. 63, pp. 45–52.
- [3] Jianzhong Ruan, Todd E. Sparks, Zhiqiang Fan. *A Review of Layer Based Manufacturing Processes for Metals*. URL: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2006/2006-22-Ruan.pdf> (дата обращения 09.09.2015).

УДК 621.375.826

## Импульсная лазерная абляция в жидкости фемто- и нано-секундными источниками. Особенности процесса

© Савкин Александр Николаевич, Сидоровнина Татьяна Юрьевна,  
Тимошенко Валерия Анатольевна, Голубенко Юрий Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[valera251@bk.ru](mailto:valera251@bk.ru)

*Представлены результаты измерения параметров золотых и серебряных наночастиц, полученных методом импульсной лазерной селекции (ИЛС) в жидкости. Измерение проведено с помощью различных оптико-спектральных методов и методом*

электронной микроскопии. Для синтеза наночастиц использована вторая гармоника Nd:YAG-лазера с длиной волны 532 нм, а также излучение фемтосекундного лазера S-PulseHR с длиной волны 1030 нм. Представлены качественные результаты в виде спектров поглощения наночастиц и снимков наночастиц.

**Ключевые слова:** лазерная абляция, наночастицы, синтез наночастиц, спектры поглощения.

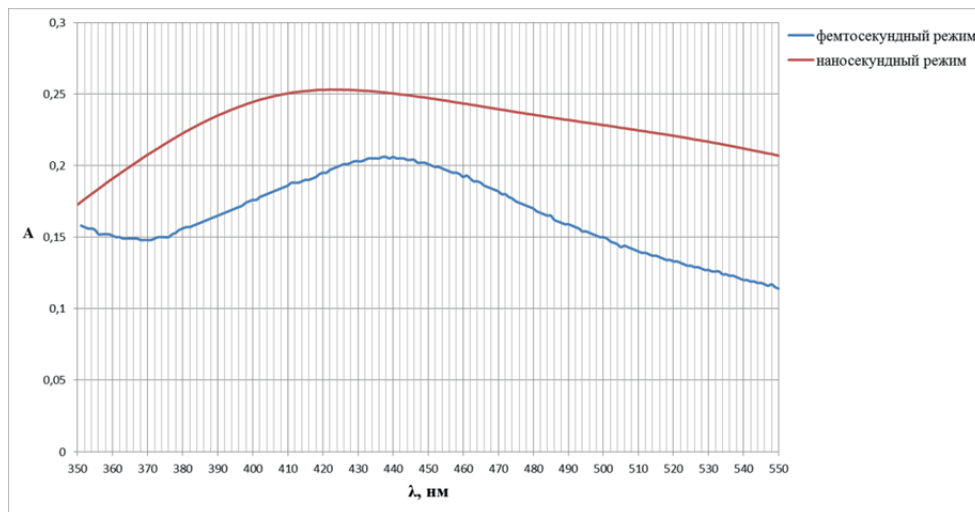
Лазерная абляция является одним из перспективных инструментов управления свойствами синтезируемых наночастиц и наноструктур. Один из наиболее распространенных способов получения наночастиц с помощью лазерного излучения — импульсная лазерная абляция (ИЛА) твердых мишеней в жидкости, газе или вакууме [1, 2].

Преимущество метода ИЛА в воде — материальный состав мишени полностью отражается в составе получаемых наночастиц, что позволяет получить чистый коллоидный раствор без примесей, который может использоваться в дальнейшем [3].

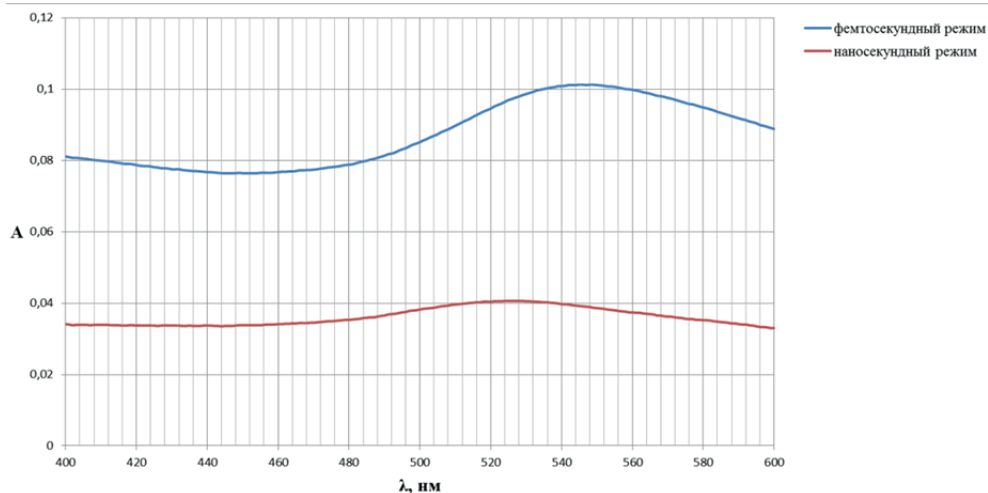
Наночастицы получены в виде коллоидных растворов. В качестве растворителя применялись дистиллированная вода и раствор 30 %-ного глицерина в дистиллированной воде. Рабочий объем жидкости составил 25 мл на всех режимах обработки.

Первым выбранным источником для ИЛА в жидкости является импульсный Nd:YAG-лазер LQ829 фирмы SOLARLS с длиной волны 532 нм (вторая гармоника), длительностью импульса 10 нс, частотой повторения импульсов 10 Гц и энергией в импульсе 500 мДж. В качестве второго источника лазерного излучения использован импульсный фемтосекундный лазер с диодной накачкой S-PulseHR фирмы AmplitudeSystemes. Длина волны излучения составляет 1030 нм, длительность импульса до 500 фс, частота следования импульсов 300 кГц и энергией в импульсе 40 мкДж.

Измерены спектры поглощения серебряных наночастиц в растворе 30 % глицерина (рис. 1) и золотых наночастиц в дистиллированной воде (рис. 2), полученных на фемто- и наносекундных режимах.



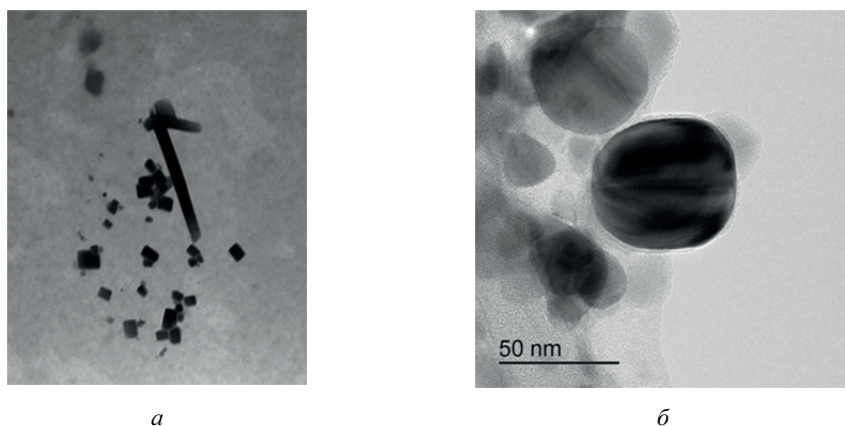
**Рис. 1.** Спектры поглощения серебряных наночастиц, полученных в растворе 30 %-ного глицерина при фемто- и наносекундных режимах.



**Рис. 2.** Спектры поглощения золотых наночастиц, полученных в дистиллированной воде при фемто- и наносекундных режимах

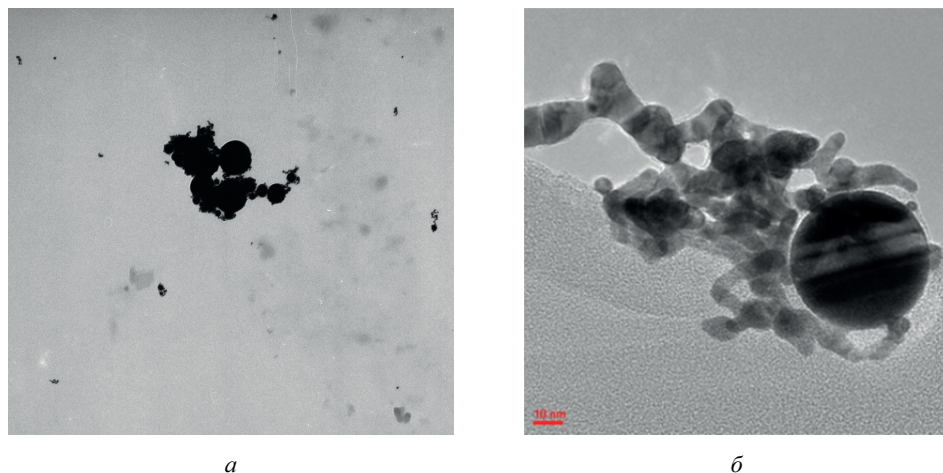
Как для серебряных, так и для золотых наночастиц наблюдается сдвиг плазмонного резонанса в длинноволновую область. Пик поглощения для серебряных частиц расположен на длинах волн 422...425 нм (наносекундный режим) и 437...440 нм (фемтосекундный режим). Явный пик поглощения для золотых наночастиц соответствует длинам волн 524...529 нм (наносекундный режим) и 546...549 нм (фемтосекундный режим). Наблюдаемое различие оптических плотностей  $A$ , указанных по вертикальной оси на рис. 1 и 2, можно объяснить различной концентрацией наночастиц в объеме коллоидного раствора. Концентрация наночастиц зависит от режима обработки, времени обработки, состояния поверхности мишени, а также производительности лазера.

На втором этапе измерений проведен анализ размеров серебряных (рис. 3) и золотых (рис. 4) наночастиц методом просвечивающей электронной микроскопии.



**Рис. 3.** Снимки серебряных наночастиц, полученных в 30 %-ном растворе глицерина на фемтосекундном —  $\times 20$  (*а*) и наносекундном (*б*) режимах. Фото получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа Hitachi H-500

Средний диаметр наночастиц, полученных на наносекундном режиме составил не более 80 нм. Форма частиц приближена к сферической. Некоторые частицы имеют сложную слоистую структуру при сохранении сферической формы. Частицы, полученные в фемтосекундном режиме, имеют форму пластин. Первоначально частицы обладают высоким значением аспектного отношения. Однако при повторном попадании в лазерный луч наночастицы подвергаются частичной локальной фрагментации. В результате процесса фрагментации образуются наночастицы в виде пластин с меньшим аспектным отношением. Форма таких частиц в одном из сечений приближена к квадратной. Стороны «квадрата» в среднем имеют размер 20...40 нм.



**Рис. 3.** Снимки золотых наночастиц, полученных в дистиллированной воде на фемтосекундном —  $\times 20$  (а) и наносекундном (б) режимах. Фото получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа Hitachi H-500

Форма полученных золотых наночастиц (см. рис. 4) приближена к гантелеобразной (эллипсоид вращения). С течением времени частицы образуют гибкую связь, в результате чего в растворе возникают агрегаты частиц размером в несколько микрометров. Появление сферических частиц авторы данной статьи связывают с наличием примесей в составе мишени (низкая проба золотой мишени обуславливает наличие значительного количества примесей, в основном, серебра). Более мелкие частицы золота коагулируют вокруг крупных сферических частиц. Средний диаметр сферических частиц составляет 100 нм. Частицы гантелеобразной формы имеют небольшое аспектное отношение 1:5. В поперечном сечении средний размер золотых наночастиц составил 10...12 нм. В нано- и фемтосекундном режиме параметры частиц мало различимы. Однако для золотых наночастиц, синтезированных в наносекундном режиме, наблюдается более высокая степень коагуляции наночастиц по сравнению с золотыми наночастицами, полученными на фемтосекундном режиме.

Таким образом, в работе определено влияние режима обработки на положение пика поглощения для различных материалов. Выявлены размеры синтезированных наночастиц, наличие процесса фрагментации частиц при повторном попадании в лазерный луч.



**Литература**

- [1] Солдатов А.Н., Васильева А.В. Эффект лазерной резонансной абляции в микро- и нанотехнологиях. *Известия Томского политехнического университета*, 2007, № 2, с. 81–85.
- [2] Антипов А.А. *Формирование протяженных массивов наноструктур при лазерном воздействии на коллоидные системы*. Автореф. дис. ... канд. физ.-экон. наук. Москва, ИОФ РАН, 2013. 38 с.
- [3] Симакин А.В., Воронов В.В., Шафеев Г.А. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях. *Тр. института общей физики им. А.М. Прохорова*. ИОФ РАН, 2004, т. 60. URL: [http://www.gpi.ru/trudiof/Vol\\_60.php](http://www.gpi.ru/trudiof/Vol_60.php) (дата обращения 28.03.14).

УДК 621.9

### Модернизация системы охлаждения зоны резания токарного станка с ЧПУ 16К20Ф3

© **Валяйчиков Артем Валерьевич, Есов Валерий Балахметович**

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[valyaychikov@yandex.ru](mailto:valyaychikov@yandex.ru)

*Рассмотрена модернизация системы охлаждения зоны резания токарного станка с ЧПУ 16К20Ф3, оснащенного системой охлаждения ионизированным воздухом с возможностью варьирования со смазочно-охлаждающей жидкостью. Разработана новая конструкция устройства охлаждения ионизированным воздухом. Исследована возможность подачи охлажденного ионизированного воздуха через каналы револьверной головки станка непосредственно в тело режущего инструмента.*

**Ключевые слова:** модернизация, устройство охлаждения ионизированным воздухом, повышение производительности.

Одним из важнейших факторов повышения эффективности производства является научно-технический прогресс. Чтобы оставаться конкурентоспособными, предприятиям необходимо внедрять новую технику и технологии. Модернизация морально и/или физически устаревшего оборудования требует значительно меньше затрат времени и примерно на 30...40 % дешевле, чем замена старых станков на новые.

В России и странах СНГ широко распространены токарные станки модели 16К20Ф3 с ЧПУ. Большинство мелких и средних предприятий оснащены данными моделями, и их модернизация должна найти широкое применение.

Охлаждение зоны резания металлорежущего станка оказывает существенное влияние на процесс формообразования. В зависимости от обрабатываемого материала и режимов резания множество смазочно-охлаждающих материалов (СОТС) обладают рядом преимуществ и недостатков [1]. Варьирование этих сред позволит увеличить диапазон режимов, при которых наблюдается пониженный износ инструмента, максимальный выигрыш времени и качества обработки различных материалов, что значительно повысит эффективность работы металлорежущего оборудования и про-

изводительность обработки. Поэтому необходима система, позволяющая использовать различные способы охлаждения зоны резания или композицию из них.

Опыты показали, что применение охлаждения ионизированным воздухом (ОИВ) в качестве СОТС при обработке высоколегированных сталей и других трудно обрабатываемых материалов позволяет повысить стойкость режущего инструмента, точность и производительность обработки [2, 3]. При этом внедрение и эксплуатация данной системы не требуют повышенных затрат. И в отличие от СОЖ ионизированный воздух не теряет своих свойств.

При выборе СОТС необходимо руководствоваться не только ее свойствами, но также и способом подвода в зону резания. Подача СОЖ на станке модели 16K20Ф3 осуществляется по каналам револьверной головки непосредственно в зону резания через сопловую насадку резцедержателя напорной струей или через каналы режущего инструмента.

В отличие от СОЖ, ОИВ подается с помощью устройства охлаждения ионизированным воздухом по суставчатому каналу непосредственно на переднюю поверхность инструмента. Недостатком являются большие габариты устройства, что затрудняет его установку на различные модели станков, а невозможность подачи охлажденного ионизированного воздуха через тело режущего инструмента на переднюю и заднюю поверхность режущей пластины снижает эффективность данной системы охлаждения. Для решения поставленных задач необходимо разработать новую конструкцию УОИВ, а также провести исследования возможности подачи ОИВ через каналы станка.

При проектировании СОИВ зоны резания необходимо выявить ряд закономерностей [4]:

- 1) потери количества ионов в воздушной смеси;
- 2) потеря давления;
- 3) нагрев охлажденного ионизированного воздуха.

### Литература

- [1] Татаринов А.С., Петрова В.Д. Возможности и перспективы применения газообразного охлаждения при обработке резанием. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1995, № 4, с. 1–8.
- [2] Есов В.Б., Климовичкин К.О. Модернизация системы охлаждения металлорежущих станков с применением устройства охлаждения ионизированным воздухом (УОИВ). *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2011, № 1, с. 10–13.
- [3] Климовичкин К.О., Есов В.Б., Мурадов К.Р., Хурматуллин О.Г. Применение охлажденного ионизированного воздуха при высокоскоростном фрезеровании, *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2011, т. 13, № 4 (4), с. 957–959.
- [4] Шпак В.В., Технические аспекты установки системы подачи ионизированного воздуха в зону резания. *Всерос. науч.-техн. конф. «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»*, 7–10 апреля, 2013, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, ООО «КванторФорм», 2015. № гос. регистрации 0321501427. URL: <http://studvesna.ru/?go=articles&id=819> (дата обращения 10.02.2015).

УДК 621.91.01

## **Анализ современных СОТС и присадок, используемых при резании труднообрабатываемых материалов**

© Кирейнов Алексей Валерьевич, Есов Валерий Балахметович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[alexkireinov@gmail.com](mailto:alexkireinov@gmail.com)

*Приведен обзор отечественной и зарубежной литературы за последние 15 лет в области смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), применяемых при обработке резанием. На основе анализа существующих решений выбраны СОТС и тип присадок для дальнейших исследований с целью повышения эффективности обработки коррозионно-стойких сталей.*

**Ключевые слова:** *резание металлов, коррозионно-стойкие стали, смазочно-охлаждающие технологические средства, самоорганизация присадок.*

Коррозионно-стойкие стали аустенитного класса нашли широкое применение почти во всех отраслях промышленности для изготовления деталей сварной аппаратуры, компрессоров, деталей химического оборудования, приборов, работающих в агрессивной среде и при повышенных температурах.

При обработке резанием коррозионно-стойких материалов подавляющая часть затрачиваемой на резание механической энергии превращается в зоне резания в тепло, возникают большие силы резания, адгезионные, диффузионные и абразивные явления. Поэтому необходимо снижать скорость резания для достижения экономически выгодной стойкости режущего инструмента.

Технологическая среда, введенная в зону резания, способна существенно влиять на интенсивность изнашивания режущего инструмента, характер стружкообразования и свойства вновь образованной поверхности. При обработке коррозионно-стойких сталей в большинстве случаев основным видом износа является адгезионно-усталостный. Для подавления этого вида износа необходимо применять смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) с противозадирными и противоизносными присадками [1].

В качестве противоизносных присадок к СОТС используются фосфаты и диалкилфосфаты, а также диалкилдитиокарбаматы металлов, осерненные жиры, жирные кислоты и их эфиры. Противозадирные присадки представлены в основном соединениями, содержащими серу и хлор [1, 2].

Анализ публикаций последних лет показал, что в мировой практике наблюдается стремление к уменьшению неблагоприятного воздействия применяемых СОТС на окружающую среду и организм человека преимущественно в следующих направлениях:

- исключение из состава СОТС экологически вредных веществ, таких как соединения серы, хлора, фосфора [3–5];
- использование растительных масел [3, 4];
- минимизация количества СОТС, подаваемого в зону резания [6, 7];

- применение газообразных и активированных воздушных сред [8–10];
- использование сухого резания [6, 11].

Смазочно-охлаждающие жидкости на основе минеральных масел традиционно используются на производстве благодаря своей химической стабильности и возможности повторного применения. Тем не менее, наблюдается тенденция в сторону новых типов СОТС на основе растительных масел, использование которых оправдано высокой биоразлагаемостью и экологичностью [3, 4]. Однако в процессе эксплуатации растительных масел в качестве СОТС выявляются такие недостатки, как низкая окислительная стойкость, ухудшение трибологических характеристик при повышенных температурах.

В публикациях [6, 8, 9, 11] наряду с проблемами минимизации подаваемого СОТС рассматривается вопрос обработки резанием без применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). В них отмечается, что точение и фрезерование без применения СОТС обеспечивает существенное сокращение затрат на процессы обработки и минимизирует загрязнение окружающей среды. Однако у данного метода есть следующие недостатки: нагрев в процессе сухого резания; сход и накопление стружки; образование наростов на режущих кромках инструмента; образование металлической пыли.

При замене жидкостных СОТС на обдув воздухом улучшается экологическая обстановка вокруг станка, сокращаются моечные и сушильные операции, уменьшаются затраты на обслуживание системы подачи СОТС. Однако не всегда воздушное охлаждение является достаточно эффективным. Основным недостатком воздуха в роли СОТС является плохая смазывающая способность. Одним из эффективных методов воздушного охлаждения зоны резания является применение охлажденного ионизированного воздуха. Ионизация воздуха обеспечивает смазывающую функцию газообразных СОТС за счет образования защитных оксидных пленок на поверхностях инструмента [8]. Вызывает интерес возможность совместного применения СОЖ и охлажденного ионизированного воздуха при обработке резанием. Эффективность подобной комбинации показана в работе [9].

В работах [5, 12–14] авторы исследовали влияние микрокапсулированных СОТС, СОТС с йодсодержащими присадками, а также СОТС с фуллеренсодержащими присадками на эффективность обработки резанием. Применение последних ограничивается относительно высокой стоимостью.

В последние годы в нашей стране и за рубежом активно изучают «эффект безызносности». На основе этого эффекта разрабатываются металлолакирующие смазочные материалы и присадки. При их использовании в процессе трения образуется металлическая защитная пленка, благодаря которой нагрузка на контактирующих поверхностях распределяется равномерно, что способствует продлению ресурса узла трения. Образование таких пленок относят к классу явлений самоорганизации [15].

Например, авторами работы [16] предложен подход к совершенствованию СОТС путем использования мицелл оксида меди в качестве многофункциональных противоизносных добавок. Показано, что во время процесса резания при трибохимической реакции происходит формирование медных пленок. В работе [17] рассматривается использование присадок гетероциклических соединений, таких как производные фталоцианина меди. Установлено, что при сверлении и нарезании резьбы происходит снижение сил резания и повышение стойкости режущего инструмента [16, 17].

Несмотря на проведенные в последнее время исследования, как в России, так и за рубежом информация о степени эффективности присадок на основе пластичных металлов при различных условиях резания недостаточна, нет единой точки зрения на характер влияния СОТС с данными присадками на процессы в зоне резания.

Таким образом, исследование явлений самоорганизации присадок в условиях резания является актуальной задачей. На основе проведенного анализа для исследований выбрана масляная СОЖ с металлоорганическими присадками, не содержащая хлор. Цель будущей работы заключается в установлении области применения СОТС, основных положений, условий и зависимостей, обеспечивающих повышение эффективности обработки коррозионно-стойких сталей.

## Литература

- [1] Энтелис С.Г. *Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием*. Москва, Машиностроение, 1986, 351 с.
- [2] Худобин Л.В., Бердичевский Е.Г. *Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке*. Москва, Машиностроение, 1977, 189 с.
- [3] Belluco W., De Chiffre L. Performance evaluation of vegetable-based oils in drilling austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 148, iss. 2, pp. 171–176.
- [4] Abdalla H.S., Baines W., McIntyre G., Slade C. Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. Part 1. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007. Vol. 34, iss. 1–2, pp. 21–33.
- [5] Бушев А.Е. *Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента при использовании экологически безопасных кислородсодержащих микрокапсулированных смазочно-охлаждающих технологических средств*. Дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2000, 148 с.
- [6] Masato Okada, Akira Hosokawa, Naoki Asakawa, Takashi Ueda. End milling of stainless steel and titanium alloy in an oil mist environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, iss. 9–12, pp. 1255–1266.
- [7] Attanasio A., Gelfi M., Giardini C., Remino C. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. *Wear*, 2006, vol. 260, iss. 3, pp. 333–338.
- [8] Есов В.Б., Климочкин К.О., Муратов К.Р., Хурматуллин О.Г. Применение охлажденного ионизированного воздуха при высокоскоростном фрезеровании. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2011, т. 13, № 4-4, с. 957–959.
- [9] Бодарева А.В., Есов В.Б., Климочкин К.О., Мельников Э.Л. Способы снижения интенсивности изнашивания алюминиевых сплавов при прокатке. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2011, № 12, с. 19–23.
- [10] Латышев В.Н., Наумов А.Г. *Трибология и проблемы СОТС. Инструмент и технологии*, 2004, № 18, с. 117–129. URL: <http://www.toolsru.com/docs/17-18/17-40.pdf> (дата обращения 08.07.2015).
- [11] Muñoz-Escalona P., Shokrani A., Newman S.T. Influence of cutting environments on surface integrity and power consumption of austenitic stainless steel. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, vol. 36, pp. 60–69.
- [12] Аснос Т.М. *Повышение работоспособности быстрорежущего инструмента путем применения микрокапсулированных СОТС в активированной воздушной среде*. Автореф. ... дис. канд. техн. наук. Иваново, 2004, 20 с.
- [13] Тимаков А.С. *Исследование влияния йодсодержащих СОТС на процессы резания металлов быстрорежущим инструментом*. Дис. канд. техн. наук. Москва, 2009, 128 с.
- [14] Федосов А.В. *Повышение работоспособности металлорежущего оборудования за счет введения фуллероидных наномодификаторов в смазочные материалы*. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2006, 179 с.
- [15] Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. *Триботехника*. Москва, Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008, 344 с.

- [16] Zenon Pawlak, Barney E. Klamecki, Teresa Rauckyte, George P. Shpenkov, Andrzej Kopkowski. *The tribochemical and micellar aspects of cutting fluids*. *Tribology International*, 2005, vol. 38, iss. 1, pp. 1–4.
- [17] Березина Е.В. *Самоорганизация присадок в граничном смазочном слое трибосопряжений машин*. Дис. д-ра техн. наук. Иваново, 2007, 461 с.

УДК 621.787.4:620.186.4

**Формирование очагов деформации  
при комбинированной обработке в условиях применения  
металлоплакирующих смазок, реализующих  
фундаментальное научное открытие  
«эффект безызносности при трении  
Гаркунова — Крагельского»**

© Смолкина Татьяна Владимировна, Косарев Илья Вячеславович,  
Сергеев Евгений Сергеевич, Щедрин Алексей Владиславович

Россия, Московская обл., г. Орехово-Зуево,  
ОАО «Научно-производственное предприятие “Респиратор”»

[ts76@list.ru](mailto:ts76@list.ru), [kos2607@gmail.com](mailto:kos2607@gmail.com), [sergeev@respiro-oz.ru](mailto:sergeev@respiro-oz.ru)

*Сформирована информационная база очагов деформации при охватывающей комбинированной обработке сплошных цилиндрических заготовок и комбинированном прошивании отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях применения инновационных металлоплакирующих смазок и инструментов с регулярным микрорельефом, реализующих фундаментальное научное открытие «эффект безызносности при трении Гаркунова — Крагельского».*

**Ключевые слова:** *очаг деформации, регулярный микрорельеф, металлоплакирующая смазка.*

Как показывает системный анализ технологических объектов [1, 2] параметры очага деформации являются существенной характеристикой способа воздействия на обрабатываемый материал, являющегося в свою очередь структурным элементом метода обработки.

Используя результаты выполненных исследований [3–6] составлена информационная база геометрических параметров очагов деформации при охватывающей комбинированной обработке сплошных цилиндрических заготовок и комбинированном прошивании отверстий в условиях применения инновационных металлоплакирующих смазок и инструментов с регулярным микрорельефом, реализующих фундаментальное научное открытие «эффект безызносности при трении Гаркунова — Крагельского».

Полученные результаты позволяют повысить точность и комплексность теоретических моделей соответствующих характеристик данных методов обработки [1, 7].

## Литература

- [1] Щедрин А.В. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2009, № 4, с. 15–20.
- [2] Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Косарев И.В., Смолкина Т.В., Зинин М.А., Сергеев Е.С. Формирование очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании. *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2014, № 10, с. 3–6.
- [3] Щедрин А.В. Повышение качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлолакирующих смазок. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2011, № 8, с. 21–25.
- [4] Гаврилов С.А. Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлолакирующих смазочных материалов. *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2013, № 4, с. 33–39.
- [5] Гаврилов С.А., Зинин М.А. Применение эффекта безызносности при синтезе металлолакирующих смазок для экстремальных условий трения. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2013, № 2, с. 29–33.
- [6] Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А. Оптимизация рецептуры металлолакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов. *Вестник машиностроения*, 2012, № 9, с. 76–79.
- [7] Щедрин А.В. Теоретические и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлолакирующих смазочных материалов. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 2, с. 11–17.

УДК 621.9

## Оценка перспектив модернизации токарного станка с ЧПУ 16K20Ф3

© Никифоров Иван Андреевич, Есов Валерий Балахметович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[Nikiforovivan13@yandex.ru](mailto:Nikiforovivan13@yandex.ru)

Рассмотрены вопросы модернизации токарного станка с ЧПУ 16K20Ф3 и повышения его точностных характеристик. Проведено измерение его геометрической точности — прямолинейности продольного перемещения суппорта. Исследованы возможности системы ЧПУ FlexNC в диагностике станка.

**Ключевые слова:** модернизация станка, геометрическая точность, система ЧПУ

В настоящее время модернизация устаревших станков является актуальной проблемой. Сегодня в России существует множество фирм и предприятий, предлагающих услуги по ремонту и модернизации различного технологического оборудования. Самая распространенная технология модернизации металлорежущих станков заклю-



чается в замене электрических приводов, систем управления, элементов электропроводки, коммутаций и установки современной системы ЧПУ [1].

Важным вопросом является первичная диагностика станка, при которой определяется целесообразность его дальнейшей модернизации. У многих станков, проходящих модернизацию, на момент ее начала, отсутствуют или находятся в неработоспособном состоянии электродвигатели, система ЧПУ и прочие узлы. Диагностика такого оборудования часто не позволяет определить скрытые дефекты, которые проявляются только при работе станка. Полную картину об оборудовании можно получить только после его запуска. В связи с этим, актуальными являются возможности отечественной системы ЧПУ FlexNC при диагностике станка в процессе модернизации. ЧПУ позволяет контролировать крутящий момент на приводах подачи и шпинделе в режиме реального времени, что дает станку качественно новые возможности: диагностика и контроль механики станков (ШВП, шпиндель, подшипники); диагностика инструмента (износ, поломка, контроль правильной смены инструмента, брак инструмента); диагностика технологии: (уменьшение количества проходов, оптимизация по точности, оптимизация по производительности).

На кафедре «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана была проведена модернизация токарного станка с ЧПУ 16К20Ф3: на станке были заменены электродвигатели постоянного тока на асинхронные электродвигатели переменного тока, демонтирована старая система ЧПУ и установлена новая FlexNC (рис. 1).



**Рис. 1.** Модернизированный токарный станок с ЧПУ 16К20Ф3

Станок долгое время не эксплуатировался и не было возможности проверить все его узлы в движении до модернизации.

После модернизации было проведено измерение геометрической точности станка 16К20Ф3 — прямолинейности продольного перемещения суппорта (рис. 2). Измерение проводилось по методу 2а, описанному в ГОСТ 22267-76. Измерение по этому методу производится с помощью центральной контрольной оправки и прибора для измерения длин. Измеряется отклонение от прямолинейности хода рабочего органа, несущего обрабатывающий инструмент [2].

Проверка прямолинейности продольного перемещения суппорта показала, что станок соответствует повышенному классу точности. Также было установлено, что при продольном перемещении суппорт разворачивается. Причина была выявлена и устранена.

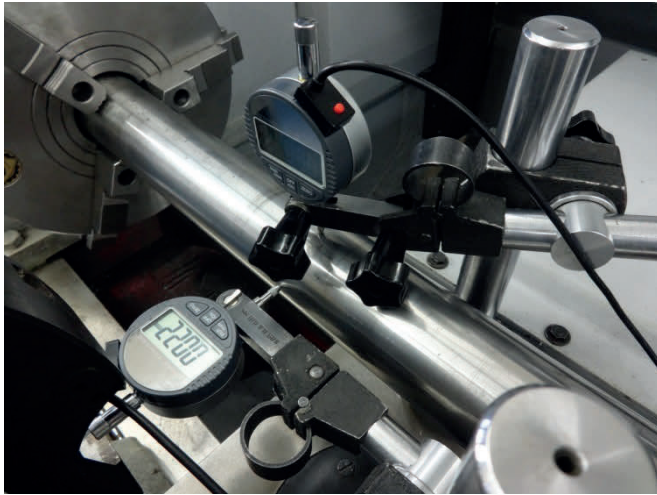


Рис. 2. Фото установки для проверки токарного станка 16К20Ф3 на точность

Одной из возможностей системы ЧПУ FlexNC является контроль моментов и сил резания в режиме реального времени. Это позволяет проводить диагностику ШВП, шпинделя, подшипников без использования дополнительных датчиков и определять техническое состояние технологического оборудования (люфты в ШВП, состояние подшипников и шестерен) [3].

С помощью данной функции была проведена диагностика механизма привода продольной подачи (рис. 3, 4). Разработана методика по выявлению дефектного звена данной цепи.

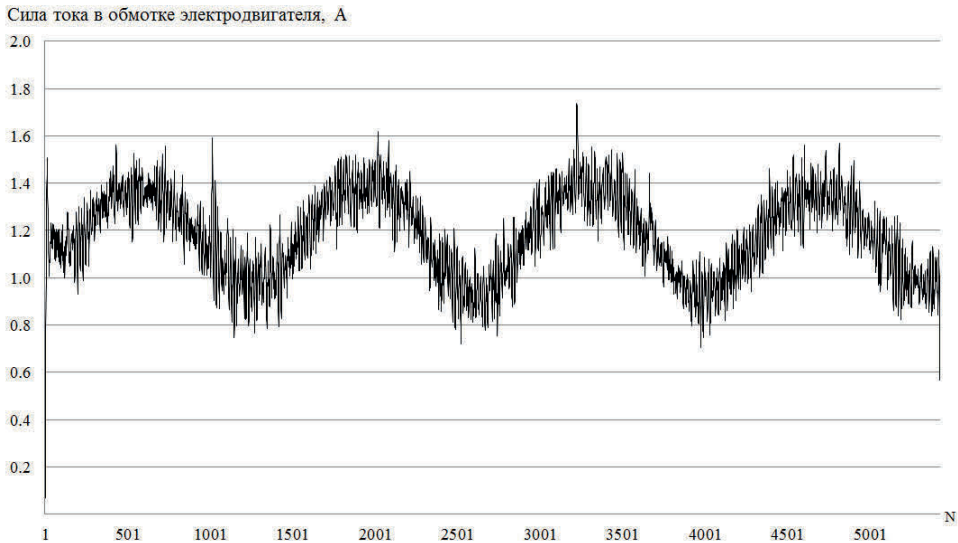


Рис. 3. Сила тока в обмотке электродвигателя, записанная при работе привода продольной подачи

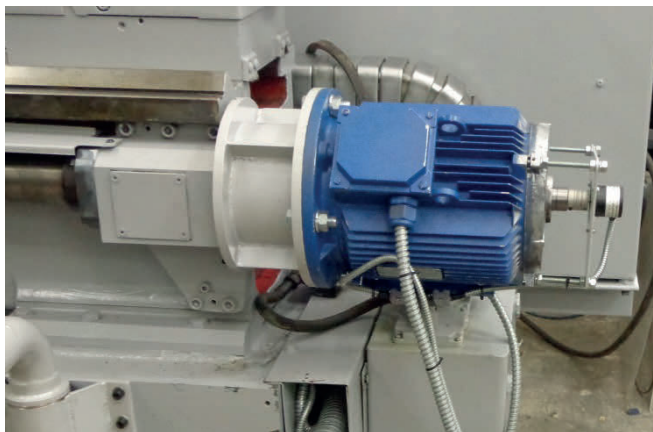


Рис. 4. Привод продольной подачи станка 16К20Ф3

Обзор фирм по модернизации станков показал, что в настоящее время эта тема является востребованной и перспективной. Были разработаны методики проведения исследования точности продольного движения суппорта, а также методика выявления дефектного звена механизма привода продольной подачи средствами установленной на станке системы ЧПУ FlexNC. Разработан технологический процесс модернизации токарного станка с ЧПУ 16К20Ф3. Оценен экономический эффект от проведенной модернизации.

#### Литература

- [1] Никифоров И.А., Модернизация токарно-винторезного станка с ЧПУ 16К20Ф3. *Будущее машиностроения России. Сб. тр. Седьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов.* Москва, 24–27 сентября 2014 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 472 с.
- [2] Никифоров И.А. Возможности ЧПУ FlexNC в диагностике токарного станка 16К20Ф3. *Всерос. науч.-техн. конф. «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии».* Материалы конференции, Москва, 7–10 апреля 2015 г., МГТУ им. Н.Э.Баумана. — Москва, ООО «КванторФорм», 2015. URL: <http://studvesna.ru?go=articles&id=1148> (дата обращения 10.06.2015).
- [3] Есов В.Б., Климоскин К.О., Рыбалко А.П., Никифоров И.А. Эффективная модернизация крупногабаритных металлорежущих станков с применением отечественной системы ЧПУ FlexNC и системы подачи в зону резания охлажденного ионизированного воздуха. *Международ. науч.-техн. конф. «75 лет на рубеже передовых технологий».* Сб. тр. Санкт-Петербург, ОАО «ЦТСС», 2014, 429 с.

УДК 621.7.079

## **Влияние финишного антифрикционного безабразивного покрытия на усилие формоизменения при вытяжке деталей из сплава АМГ6БМ**

© Серёжкин Михаил Александрович, Мельников Эдуард Леонидович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[pehobator@gmail.com](mailto:pehobator@gmail.com)

*Рассмотрено влияние финишного антифрикционного безабразивного покрытия на усилие формоизменения при вытяжке деталей из сплава АМГ6БМ холодной листовой штамповкой. В качестве типовой детали выбрана сферическая заглушка трубопровода. Приведены данные экспериментальных исследований, показывающие эффективность применения предлагаемого покрытия.*

**Ключевые слова:** вытяжка, матрица, покрытие, усилие вытяжки, холодная листовая штамповка.

При изготовлении сферической заглушки трубопровода технологический процесс изготовления включает в себя две технологические операции: вытяжка стаканчика диаметром 76 мм, высотой 81 мм за 2 перехода, с последующим формированием сферического днища обжимом. Материал детали АМГ6БМ, толщина заготовки 2 мм.

Для снижения усилия при вытяжке было решено применить финишную антифрикционную безабразивную обработку (ФАБО) на вытяжном ребре матрицы штампа и проверить влияние металлоплакирующих смазочных материалов (на примере композиции «Валена») на изменение усилия штамповки.

ФАБО — процесс нанесения защитной металлической пленки на чистовую обработанную поверхность детали латунным, бронзовым или медным карандашом с использованием специальной технологической среды. При этом образуется металлическое покрытие, химический состав которого сходен с химическим составом металла карандаша — избирательного переноса меди из сплава на поверхность обрабатываемой детали не происходит. Получившее покрытие заполняет микронеровности штампа, тем самым повышая площадь контактируемых поверхностей, что обеспечивает снижение удельного давления на контакте штампуемый материал — матрица. Покрытие предотвращает контакт штампуемого материала с материалом матрицы и играет роль смазочного материала в паре трения деталь — матрица.

Для эксперимента на кафедре «Технологии обработки материалов» была изготовлена оснастка для вытяжки детали из заготовки (рис. 1).

Затем проводилась штамповка серии деталей, сначала на необработанной матрице. Наносилось покрытие ФАБО и проводилась серия штамповки деталей на обработанной матрице. Штамповка производилась на гидравлическом прессе ИП-1000 с записью графика нагрузки от перемещения. По серии экспериментов рассчитывалось среднее арифметическое значение нагрузки при одном и том же перемещении. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

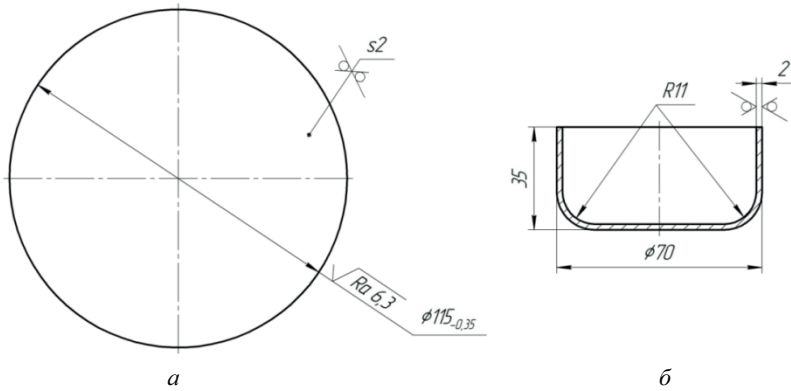


Рис. 1. Чертеж заготовки (а) и готовой детали (б)

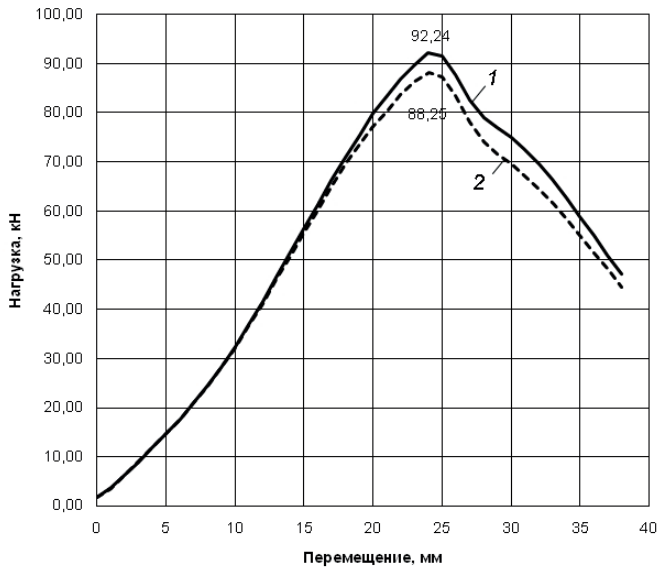


Рис. 2. Сравнение усилия вытяжки при штамповке без покрытия (1) и с покрытием (2)

Применение покрытия обеспечило уменьшение меридиональных и тангенциальных напряжений в штампуемой детали, что способствовало уменьшению усилия вытяжки примерно на 5 %.

Таким образом, в результате исследования установлено:

1) применение ФАБО позволяет снизить максимальное усилие при штамповке примерно на 5 %. Данные получены при штамповке деталей;

2) использование металлоплакирующей присадки «Валена» на величину усилия при штамповке практически не повлияло. При штамповке на матрице с покрытием и без покрытия усилие менялось не более чем на 0,5 %. Возможно, это связано с тем, что при штамповке каждый раз меняется обрабатываемая деталь и сервоитная пленка не успевает образоваться. Этот вопрос требует дальнейшего изучения.

## Литература

- [1] Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Бабель В.Г. *Трибология на основе самоорганизации*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 245 с.
- [2] Ковалёв В.Г., Ковалёв С.В. *Технология листовой штамповки. Технологическое обеспечение точности и стойкости*. Москва, КНОРУС, 2010, 224 с.
- [3] Мельников Э.Л. *Холодная штамповка днищ*. Москва, Машиностроение, 1986, 193 с.
- [4] Серёжкин М.А., Мельников Э.Л. Повышение стойкости вытяжных штампов при изготовлении крупногабаритных днищ. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2014, № 12, с. 7–11.

УДК 621.9

## Оценка влияния ионизированного воздуха на водорастворимые смазочно-охлаждающие технологические средства

© Смаль Евгений Геннадьевич, Есов Валерий Балахметович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[smal.evgenyi@gmail.com](mailto:smal.evgenyi@gmail.com)

*Рассмотрен метод насыщения ионизированным воздухом смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Основная задача заключается в модернизации системы подачи СОТС, насыщающей жидкость ионизированным воздухом, тем самым значительно повышая степень ее чистоты. Проведен эксперимент, суть которого заключается в выдерживании двух образцов водорастворимой СОТС, один из которых продувался ионизированным воздухом, в условиях наиболее оптимальных для роста бактерий и микроорганизмов (+30 °С). Продувка проводилась периодически каждый день в течение 5...6 ч. На основании проведенного эксперимента установлено, что стойкость СОТС с использованием разработанной установки повысилась примерно в 2,7 раза.*

**Ключевые слова:** *смазочно-охлаждающие технологические средства, ионизированный воздух, процесс резания, износ инструмента, уровень кислотности*

В настоящее время существует множество различных типов смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), предназначенных для обработки различных материалов и сплавов. Многочисленными экспериментами в данной области установлено, что в процессе резания в зоне контакта резца со стружкой, СОТС, под действием большого давления и высокой температуры, активируется, взаимодействуя с ювенильными поверхностями резца и детали [1], тем самым снижая износ инструмента и поддерживая стабильность процесса. Эффективность действия СОТС зависит от их химического состава, путем изменения которого можно регулировать взаимодействие СОТС с инструментальным и обрабатываемым материалами [2]. К настоящему времени используется множество составов СОТС, эффективно действу-

ющих при резании различных групп металлов и материалов. Другим путем повышения эффективности действия подаваемых поливом СОТС является их активация внешними энергетическими воздействиями.

В данной работе рассматривается метод насыщения ионизированным воздухом (ИВ) СОТС. Основная задача заключается в модернизации системы подачи СОТС, насыщающей жидкость ИВ, тем самым значительно повышая степень чистоты СОТС. Очистка от загрязнений должна осуществляться путем барботирования жидкости ИВ, что приводит к резкому сокращению в СОТС грибков и бактерий, загрязняющих и уменьшающих срок службы жидкости, так же за счет активации СОТС происходит повышение ее эффективности.

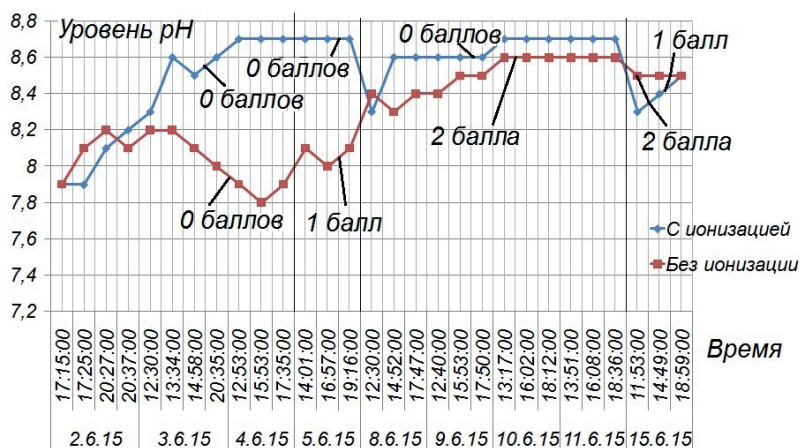


Рис. 1. Оценка состояния стойкости СОТС

Для оценки эффективности действия установки подачи ИВ проведен эксперимент на основе ГОСТ 9.085—78 «Испытания на биостойкость», сущность которого заключается в выдерживании двух образцов водорастворимой СОТС, один из которых продувался ИВ, в условиях наиболее оптимальных для роста бактерий и микроорганизмов (+30 °С). Продувка ИВ проводилась периодически каждый день в течение 5...6 ч. На основании проведенного эксперимента выявлено, что стойкость СОТС с использованием разработанной установки повысилась примерно в 2,7 раза. Оценка состояния проводилась согласно рекомендациям ГОСТ 9.085—78 (рис. 1):

0 баллов — при осмотре невооруженным глазом наблюдаются большие четко выраженные зоны отсутствия роста микроорганизмов. Зона бактериостойкости;

1 балл — при осмотре невооруженным глазом заметны зоны отсутствия роста микроорганизмов. Зона поражения СОТС бактериями;

2 балла — при осмотре невооруженным глазом не наблюдается зон отсутствия роста микроорганизмов.

Другим важным параметром состояния СОТС является ее уровень кислотности (рН-уровень). Наиболее важно сохранение уровня кислотности постоянным, что свидетельствует о неизменности свойств испытуемых жидкостей. Изменение уровня во времени говорит об изменении свойств СОТС. Как видно на рис. 1, свойства водорастворимой СОТС, продуваемой ИВ, сохраняются постоянными (изменение показателя на 0,1 ед. является погрешностью измерительного прибо-

ра), за исключением простоя в течение нескольких дней, что связано с выделением из СОТС ИВ.

Данный результат является удовлетворительным, так как стойкость СОТС при покупке станции очистки повышается в среднем в 2 раза, но ее стоимость и габариты значительно превышают стоимость и габариты разработанного метода.

На основании [3] и ряда аналогичных экспериментов можно сделать вывод, что стойкость инструмента при использовании ИВ в качестве СОТС или смеси водорастворимой СОТС с ИВ повышается на 10...20 % при обработке труднообрабатываемых материалов.

Экономический расчет показал эффект от внедрения разработанной установки и срок окупаемости, подтвердивший целесообразность внедрения установки на производстве.

### Литература

- [1] Есов В.Б., Климоскин К.О., Рыбалко А.П., Никифоров И.А. Эффективная модернизация крупногабаритных металлорежущих станков с применением отечественной системы ЧПУ FlexNC и системы подачи в зону резания охлажденного ионизированного воздуха. *Международ. науч.-техн. конф. «75 лет на рубеже передовых технологий»*. Сб. тр. Санкт-Петербург, ОАО «ЦТСС», 2014, 429 с.
- [2] Латышев В.Н. *Повышение эффективности СОЖ*. Москва, Машиностроение, 1984, 65 с.
- [3] *Способ подачи кислородосодержащих СОТС в зону контакта металлических поверхностей*. Пат. 2177866 Российская Федерация.

УДК 621.787.2

## **Теоретико-экспериментальное исследование охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях противодействия металлоплакирующих смазок**

© Козлов Алексей Юрьевич<sup>1</sup>, Смолкина Татьяна Владимировна<sup>2</sup>,  
Щедрин Алексей Владиславович<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Россия, Московская обл., г. Орехово-Зуево,  
ООО «Машиностроительный завод «ТОНАР»»

<sup>2</sup> Россия, Московская обл., г. Орехово-Зуево,  
ОАО «Научно-производственное предприятие «Респиратор»»

<sup>3</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный  
машиностроительный университет (МАМИ)

[t-5511@yandex.ru](mailto:t-5511@yandex.ru), [ts76@list.ru](mailto:ts76@list.ru)

*Проведены теоретические сравнительные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях самовозбуждаемого противодействия*

---



инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие «эффект безызносности при трении Гаркунова — Крагельского»; с учетом параметров очага деформации и эффекта избирательного переноса при трении уточнена и адаптирована формула А.Л. Воронцова для прогнозирования удельного усилия ОППД. Проведено моделирование ОППД в программном комплексе QForm 3D.

**Ключевые слова:** охватывающее поверхностное пластическое деформирование, металлоплакирующая смазка, очаг деформации.

Охватывающее поверхностное пластическое деформирование (ОППД) — эффективный технологический метод отделочно-упрочняющей обработки сплошных и полых профилей различной формы поперечного сечения и длины.

В настоящее время методы ОППД системно совершенствуются [1] за счет совместного использования инструментов с регулярной микрогеометрией поверхности [2, 3] и перспективных технологий применения инновационных металлоплакирующих смазочных материалов [4], реализующих фундаментальное научное открытие «эффект безызносности при трении Гаркунова — Крагельского» [5, 6].

Проведены теоретические сравнительные исследования ОППД инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях самовозбуждаемого противодавления инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие «эффект безызносности при трении Гаркунова — Крагельского». С учетом параметров очага деформации и эффекта избирательного переноса при трении уточнена и адаптирована формула А.Л. Воронцова [7] для прогнозирования удельного усилия ОППД, проведено моделирование ОППД в программном комплексе QForm3D [8].

## Литература

- [1] Щедрин А.В., Ульянов В.В., Чихачева Н.Ю. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2009, № 4, с. 15–20.
- [2] Щедрин А.В., Ульянов В.В., Скоромнов В.М. Повышение эффективности методов комбинированного волочения за счет регуляризации микрогеометрии рабочей поверхности инструмента. *Вестник машиностроения*, 2006, № 11, с. 58–60.
- [3] Щедрин А.В., Ульянов В.В., Скоромнов В.М. и др. Совершенствование комбинированных методов редуцирования и прошивания. *Металлург*, 2005, № 10, с. 66–69.
- [4] Щедрин А.В., Козлов А.Ю. Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 3, с. 8–12.
- [5] Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Ерохин В.В. Повышение качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2011, № 8, с. 21–25.
- [6] Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Косарев И.В., Смолкина Т.В. Формирование очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании. *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2014, № 10, с. 3–7.
- [7] Воронцов А.Л. *Технологические задачи теории пластичности*. Т. 2. Москва, Машиностроение, 2006, 397 с.

- [8] Щедрин А.В. Теоретические и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлолакирующих смазочных материалов. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 2, с. 11–17.

УДК 621.787.2

## **Комплексное решение проблем повышения эффективности и импортозамещения в волоочильном производстве на основе реализации фундаментального научного открытия «эффект безызносности при трении»**

© Смолкина Татьяна Владимировна<sup>1</sup>, Медвинская Надежда Сергеевна<sup>2</sup>,  
Щедрин Алексей Владиславович<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный  
машиностроительный университет (МАМИ)

<sup>2</sup> Россия, Московская обл., г. Орехово-Зуево,  
ОАО «Научно-производственное предприятие “Респиратор”»

[ts76@list.ru](mailto:ts76@list.ru), [Nadya\\_tambov@mail.ru](mailto:Nadya_tambov@mail.ru)

*На основании многочисленных экспериментальных исследований выявлена возможность комплексного решения проблем волоочильного производства путем совместного применения инструментов с регулярной микрогеометрией поверхности и современных металлолакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие «Эффект безызносности при трении Гаркунова — Крагельского».*

**Ключевые слова:** *волоочильное производство, инструмент с регулярной микрогеометрией, металлолакирующие смазки.*

Как свидетельствует современная научная и промышленная статистика, традиционно актуальной проблемой волоочильного производства является эффективное управление контактными процессами, важнейшие из которых трение и износ соответствующих инструментов. Инновационные инструментальные материалы, применяемые для изготовления волоочильного инструмента, полностью исчерпали резервы кардинального повышения своей износостойкости. Используя достижения инновационного фундаментального направления «трибология на основе самоорганизации» [1], с помощью алгоритмических процедур систем искусственного технологического интеллекта [2] синтезированы методы охватывающей обработки (волочение, калибрование, редуцирование), инструментальное обеспечение которых функционирует на принципах безызносного трения (дипломы на научные открытия № 41, 378 Гос. реестра СССР; заявки на патенты РФ № 2013156526, 2013156527, 2015108691).

Анализ выполненные исследования [3–8] показал: усилие обработки стабильно снижается на 25...34 % (максимум на 59 %) путем интенсивной реализации «эффекта Ребиндера»; производительность обработки может быть повышена до двух раз за счет соответствующего увеличения степени деформации заготовки при равном уси-

лии обработки; на инструменте формируется сервовитная защитная пленка, полностью исключаящая прямой контакт с заготовкой и снижающая коэффициент граничного трения до значений жидкостного трения; геометрическое качество получаемой поверхности повышается до 2 раз.

Дополнительно установлено новое фундаментальное явление — существенное увеличение энергосилового эффекта с ростом степени деформации обрабатываемой заготовки [3–12].

### Литература

- [1] Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Щедрин А.В. Трибология на основе самоорганизации. *Lambert Academic Publishing*, 2015, 245 с.
- [2] Щедрин А.В., Ульянов В.В., Чихачева Н.Ю. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2009, № 4, с. 15–20.
- [3] Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Ерохин В.В. Повышение качества и производительности комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2011, № 8, с. 21–25.
- [4] Гаврилов С.А. Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлоплакирующих смазочных материалов. *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2013, № 4, с. 33–39.
- [5] Гаврилов С.А., Зинин М.А. Применение эффекта безызносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2013, № 2, с. 29–33.
- [6] Щедрин А.В., Кузнецов В.А., Гаврилов С.А. и др. Теоретические и экспериментальные исследования поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 2, с. 11–17.
- [7] Щедрин А.В., Козлов А.Ю. Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2014, № 3, с. 8–12.
- [8] Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Косарев И.В., Смолкина Т.В. Формирование очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании. *Трение и смазка в машинах и механизмах*, 2014, № 10, с. 3–7.
- [9] Щедрин А.В., Зинин М.А., Гаврилов С.А. Влияние металлоплакирующей присадки Валена на показатели комбинированной обработки. *Вестник машиностроения*, 2011, № 9, с. 77–81.
- [10] Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А. Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий из нешлифуемых цветных сплавов. *Вестник машиностроения*, 2012, № 9, с. 76–79.
- [11] Сергеев Е.С., Зинин М.А., Гаврилов, С.А. Щедрин и др. Влияние угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики методов комбинированного прошивания (протягивания) отверстий. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2015, № 3, с. 20–24.
- [12] Щедрин А.В., Поляков А.О. Влияние металлоплакирующих смазочных материалов на процесс комбинированного прошивания отверстий. *Вестник машиностроения*, 2015, № 4, с. 71–75.

## Исследование технологического процесса обжима в сферическую матрицу и вытяжки сферическим пуансоном при изготовлении донной части баллонов высокого давления

© Ступников Вадим Владимирович, Евсюков Сергей Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[prius@mail.ru](mailto:prius@mail.ru)

*Рассмотрено исследование технологического процесса обжима в сферическую матрицу и вытяжки сферическим пуансоном при изготовлении донной части баллонов высокого давления. Построены эпюры деформаций в различных частях детали при обжиме и вытяжке сферическим пуансоном. Установлено значение разнотолщинности для двух технологических способов изготовления. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических исследований и данными, полученными в программном комплексе Ansys LS-Dyna.*

**Ключевые слова:** вытяжка, обжим, эпюра деформаций, разнотолщинность.

Экспериментальные исследования технологического процесса обжима в сферическую матрицу и вытяжки сферическим пуансоном при изготовлении донной части баллонов высокого давления проводились на спроектированной и изготовленной штамповой оснастке в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Чертеж изготавливаемой детали представлен на рис. 1, материал АМГ6БМ, толщина заготовки 1,85 мм.

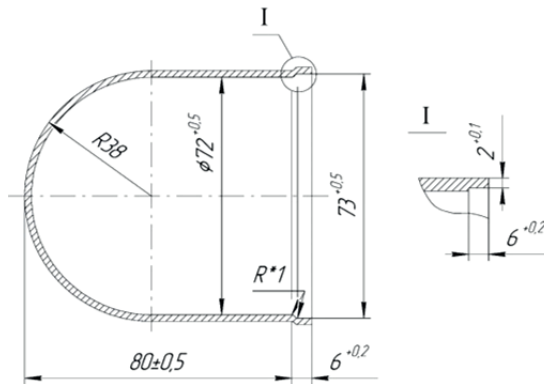


Рис. 1. Сферическая заглушка трубопровода

Целью исследования являлось установление различия разнотолщинности деталей, изготовленных обжимом и вытяжкой сферическим пуансоном. Для этого построены экспериментальные эпюры деформаций для двух технологических

процессов. Экспериментальные данные сравнивались с данными полученными при моделировании процессов в программных комплексах Ansys LS-Dyna и AutoForm. Также исследовалось влияние металлоплакирующих смазочных материалов на технологические процессы обжима и вытяжки. Работа была проведена на кафедре «Технология обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Результаты исследований — эпюры деформаций в различных частях детали при обжиме и вытяжке сферическим пуансоном показаны на рис. 2 и 3.

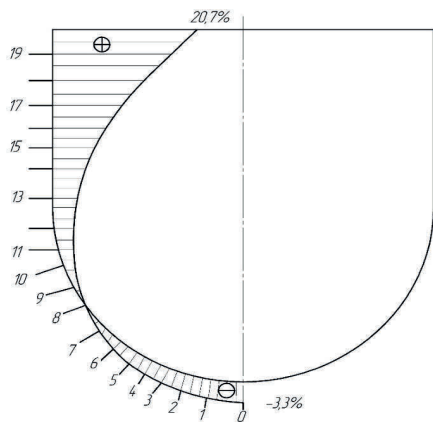


Рис. 2. Эпюра деформаций после обжима донной части заготовки

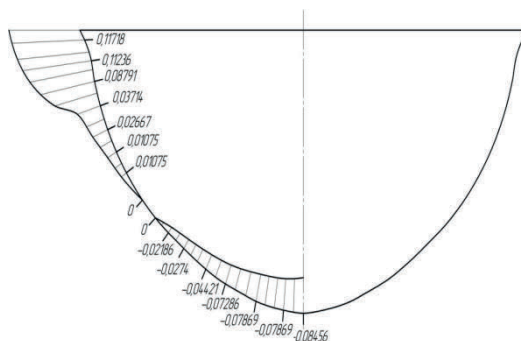


Рис. 3. Эпюра истинных деформаций по толщине, вытяжка сферическим пуансоном натурный эксперимент

Таким образом, установлено, что разнотолщинность в донной части днища при обжиме на 12 % ниже, чем при вытяжке сферическим пуансоном. При толщине исходной заготовки 1,85 мм, днище, сформированное вытяжкой сферическим пуансоном, имеет толщину 1,7 мм, а днище, сформированное обжимом в сферическую матрицу, — 1,79 мм. Это позволяет экономить более 10 % металла при изготовлении баллонов высокого давления.

Сравнение экспериментальных данных с данными полученными в программном комплексе Ansys LS-Dyna подтверждают правильность выбранных моделей исследования толщины стенки.

Наблюдается удовлетворительная сходимость экспериментальных данных с результатами теоретических исследований.

## Литература

- [1] Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. *Технология и автоматизация листовой штамповки*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 480 с.
- [2] Мельников Э.Л. *Холодная штамповка днищ*. Москва, Машиностроение, 1986, 193 с.
- [3] Попов И.П. Пластическое течение при обжиме полых цилиндрических заготовок с дном. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1980, № 5, с. 99–103.

УДК 621.432.263.5

### Тепловая защита вдувом воздуха через перфорированный экран

© Гильфанов Ришат Наилевич, Каримова Ала Григорьевна,  
Дезидерьев Сергей Георгиевич

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный  
исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[ritngrishy@yandex.ru](mailto:ritngrishy@yandex.ru)

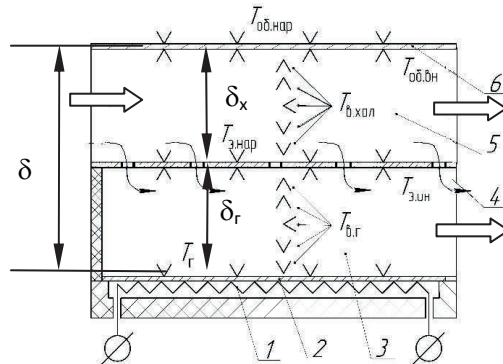
*Проведены опыты на экспериментальной установке по моделированию тепловой защиты от горячего корпуса газотурбинного двигателя к его оболочке с использованием перфорированного экрана. Приведена схема экспериментального стенда с рабочим участком. Представлены результаты обработки опытов по эффективности тепловой защиты экрана и оболочки.*

**Ключевые слова:** *тепловая защита, температура, газотурбинный двигатель, экспериментальный стенд, перфорированный экран, вдув воздуха.*

Применение авиационных газотурбинных двигателей, адаптированных для работы в наземных условиях в качестве источников энергии для привода различных агрегатов, получило в последние 10-летия широкое распространение, чем подтверждается актуальность проблем, решаемых в рамках этого технического направления. Проблемы, возникающие в практике эксплуатации таких газотурбинных установок, описаны и проанализированы в [1–3]. В частности, в работах [1, 4] рассмотрены процессы теплопередачи и эффективность тепловой защиты при использовании вдува через пористый экран, а также при свободной конвекции. Реальные условия происходящих процессов моделировались на экспериментальном стенде, описанном в [2]. Этот же стенд (см. схему рабочего участка, рис. 1) использовался и в данной работе, посвященной изучению процессов теплопередачи и эффективности тепловой защиты при использовании перфорированных экранов.

Следует отметить, что принципиальным отличием картины течения охладителя через перфорированный экран от исследованных ранее пористых экранов является то, что при пористом вдуве воздух, выходя на защищаемую поверхность из поровых

каналов, образует сплошную пленку, которая при сверхкритических вдувах полностью оттесняет поверхность экрана от горячей зоны. В отличие от этого, выход охладителя из перфорированного экрана представляет собой систему дискретных струй, которые при определенных условиях (расход охладителя, количество отверстий на единицу площади) могут обеспечить пленочный эффект защиты поверхности в целом. С практической точки зрения перфорированные экраны привлекательны тем, что система расположения отверстий перфораций может быть запрограммирована как по величине их диаметров, так и по их количеству, приходящемуся на единицу площади.



**Рис. 1.** Схемы замеров на модельной установке при вдуве воздуха через перфорированный экран:  
 1 — нагреватель; 2 — горячая стенка; 3 — горячая прослойка;  
 4 — экран; 5 — холодная прослойка; 6 — наружная оболочка;  
 Л, V — места установки термопар

Экспериментальный стенд оборудован системой замеров, обеспечивающих информацией о температурном состоянии всех поверхностей, участвующих в процессе теплопередачи, воздушных прослоек, а также режимных параметрах охлаждающего воздуха и электрических параметрах нагревателя (см. рис. 1).

Схема течения воздуха, при которой охладитель, входящий в холодную полость, имеет свободный выход из нее, а также при некотором перепаде давления реализуется течение через отверстия перфорации в горячую полость и в окружающую среду приведена на рис. 1.

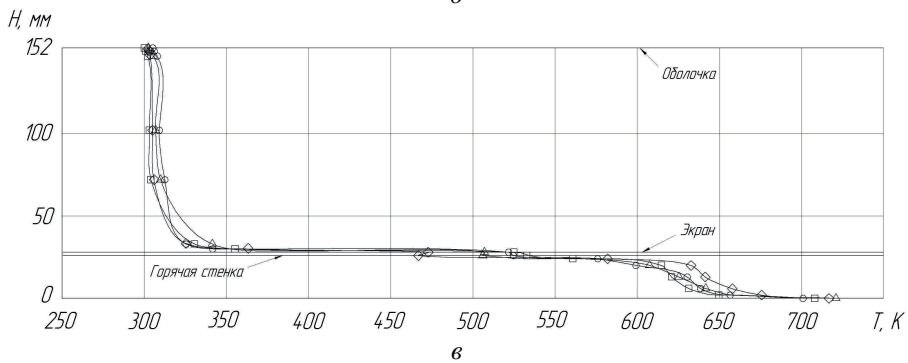
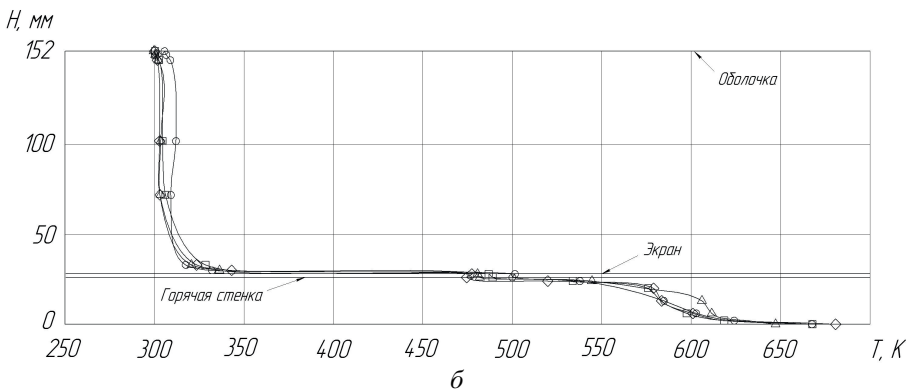
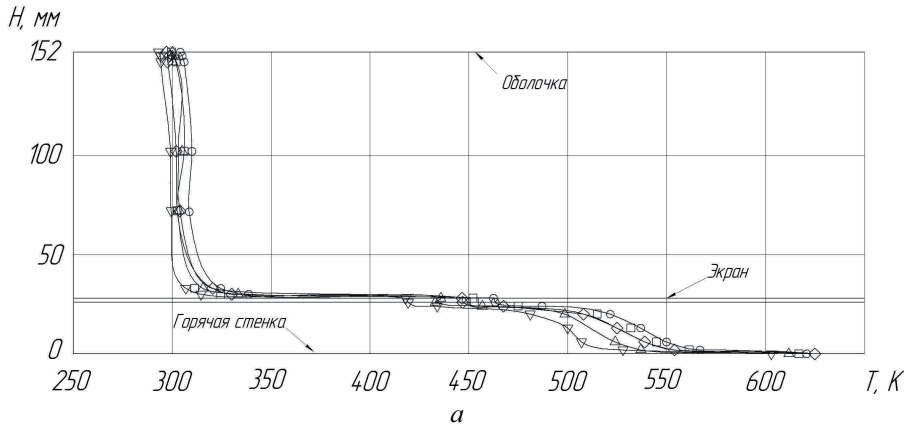
Задачей настоящей работы является исследование эффективности тепловой защиты и температурного состояния перфорированного экрана и наружной оболочки и всех элементов рабочего участка стенда для одной из схем тепловой защиты [2]. В опытах варьировались расход охладителя — воздуха и температурный фактор — температура горячей стенки.

Первичная информация, получаемая из эксперимента: распределение температур воздуха в горячей и холодной зонах по их высоте и длине, а также местные и средние значения температуры стенок каналов — нагревателя, экрана с обеих сторон и наружного корпуса с обеих сторон. Эти поля температур строились при следующих условиях опыта:

1) переменная температура нагревателя при постоянном расходе воздуха и толщинах горячих и холодных зон;

2) переменный расход воздуха при постоянной температуре горячей стенки и толщинах обеих зон;

Результаты термометрирования всех поверхностей, участвующих в процессе теплопередачи, и воздушных прослоек по их высоте и длине представлены на рис. 2 в виде номограмм, где по оси ординат отложены высоты горячей и холодной зон, а по оси абсцисс — осредненные температуры в соответствующих сечениях.



**Рис. 2.** Распределение температур по высоте установки:

*a* —  $T_r = 600$  К; *б* —  $T_r = 673$  К; *в* —  $T_r = 713$  К;  $\nabla$  —  $G_b = 25$  г/с;  $\diamond$  —  $G_b = 12,6$  г/с;  $\Delta$  —  $G_b = 9,6$  г/с;  $\square$  —  $G_b = 7,35$  г/с;  $\circ$  —  $G_b = 5,3$  г/с;  $\delta_r = 0,026$  м



На рис. 2 видно, что влияние температурного фактора (температуры горячей пластины) выражается в смещении точек замеряемых температур по оси абсцисс в сторону увеличения с ростом  $T_g$ , а повышение расхода воздуха, наоборот, сдвигает поля температур влево, что соответствует естественным физическим представлениям.

Результаты опытов рассчитывались для следующих параметров:

- число Рейнольдса для сечения на выходе из холодной зоны подсчитывается:

$$Re_{cp} = \frac{(\rho w)_x}{\mu} \cdot \frac{4F_x}{\Pi_x}. \quad (1)$$

Здесь  $(\rho w)_x$  — плотность тока воздуха, определяемая по замеренному расходу воздуха  $G_b$  с учетом соотношения площадей поперечного сечения канала и суммарной площади отверстий перфорации:

$$(\rho w)_x = (\rho w)_b \frac{F_x}{F_{\Sigma отв}}, \quad (2)$$

где  $(\rho w)_b = \frac{G_b}{F_x + F_g}$ ,  $F_x, F_g$  — площадь поперечного сечения канала холодной и горячей зоны, соответственно;  $F_{\Sigma отв}$  — суммарная площадь отверстий перфорации;  $\Pi_x$  — периметр сечения канала;

- число Рейнольдса для сечения на выходе из горячей зоны:

$$Re = \frac{(\rho w)_g}{\mu} \cdot \frac{4F_g}{\Pi_g}. \quad (3)$$

Здесь все обозначения параметров аналогичны использованным в формуле (1) и относятся к горячей зоне. Плотность тока в этом сечении:

$$(\rho w)_g = (\rho w)_b \frac{F_{\Sigma отв}}{F_g}; \quad (4)$$

- эффективность тепловой защиты для экрана

$$\theta_э = \frac{T_g - T_{э,вн}}{T_g - T_{в,вх}}, \quad (5)$$

для оболочки

$$\theta_{об} = \frac{T_g - T_{об,нар}}{T_g - T_{окр}}, \quad (6)$$

где  $T_g$  — температура горячей стенки;  $T_{э,вн}, T_{э,нар}$  — температура экрана со стороны горячей, холодной зоны, соответственно;  $T_{в,вх}$  — температура воздуха на входе в установку;  $T_{окр}$  — температура окружающей среды.

Результаты обработки опытов по эффективности тепловой защиты экрана представлены на рис. 3. Видно, что при увеличении расхода воздуха (числа  $Re$ ) эффективность заметно повышается. Увеличение температуры горячей стенки снижает эффективность защиты экрана  $\theta_э$ .

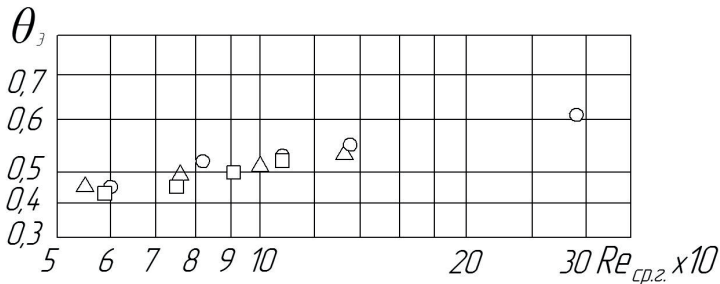


Рис. 3. Результаты опытов по эффективности тепловой защиты экрана: о —  $T_r = 600$  К; Δ —  $T_r = 673$  К; □ —  $T_r = 723$  К

Зависимость эффективности тепловой защиты наружной оболочки от влияющих факторов иллюстрирует рис. 4. Следует отметить, что в данном случае эффективности  $\theta_{\text{об}}$  настолько высока, что влияние температурного фактора и числа Рейнольдса практически не прослеживается.

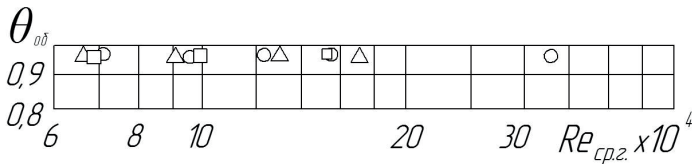


Рис. 4. Результаты опытов по эффективности тепловой защиты оболочки: о —  $T_r = 600$  К; Δ —  $T_r = 673$  К; □ —  $T_r = 723$  К

В дальнейшей работе предполагается определить влияние толщин прослоек горячей и холодной зон на процессы теплопередачи от источника теплоты через перфорированные экраны к наружной оболочке.

### Литература

- [1] Каримова А.Г., Дезидерьев С.Г., Зубарев В.М., Хабибуллин М.Г. Результаты экспериментального исследования процессов теплообмена и эффективности тепловой завесы при пористом вдуве. *Изв. вузов. Сер. Авиационная техника*, 2006, № 1, с. 37–39.
- [2] Гимбицкий А.В., Дезидерьев С.Г., Каримова А.Г. Теплопередача при различных способах тепловой защиты в системах приводных ГТД. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2011, № 3, с. 63–66.
- [3] Гимбицкий А.В., Гильфанов Р.Н., Дезидерьев С.Г., Каримова А.Г. Защита поверхности экранированием от горячего источника при свободной конвекции. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2014, № 2, с. 3–7.
- [4] Каримова А.Г., Дезидерьев С.Г., Гимбицкий А.В., Гильфанов Р.Н. Теплопередача и эффективность тепловой защиты при создании завесы вдувом воздуха через пористый экран. *Всерос. науч.-техн. конф., посвященная 70-летию основания кафедры ракетных двигателей Казанского авиационного института (КАИ)*. Казань, 21–22 мая 2015 г. Казань, 2015.

УДК 621.432.263.5

## Результаты исследования тепловой защиты при свободной конвекции и вдуве воздуха через пористый экран

© Гимбицкий Артур Вячеславович, Каримова Алла Григорьевна,  
Дезидерьев Сергей Георгиевич

Россия, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[garthur@yandex.ru](mailto:garthur@yandex.ru)

*Работа конвертированных газотурбинных двигателей, применяемых в качестве газогенераторов в стационарных энергоустановках, характеризуется выделением больших тепловых потоков в окружающее пространство отсеков и необходимостью в защите от них. Следовательно, возникает необходимость в организации тепловой защиты окружающего пространства отсека. Одним из способов снижения тепловых потоков, генерируемых горячим корпусом двигателя, является экранирование, в том числе со вдувом воздуха через пористые поверхности. Приведены результаты экспериментального исследования тепловой защиты экранированием при свободной конвекции и при создании воздушной завесы. Полученные результаты позволили выявить влияния основных факторов ( $G_v$ ,  $\delta_r$ ,  $\delta_x$ ,  $T_r$ ) на интенсивность процесса теплопередачи и эффективность защиты, а также прогнозировать температуру наружной оболочки и экрана.*

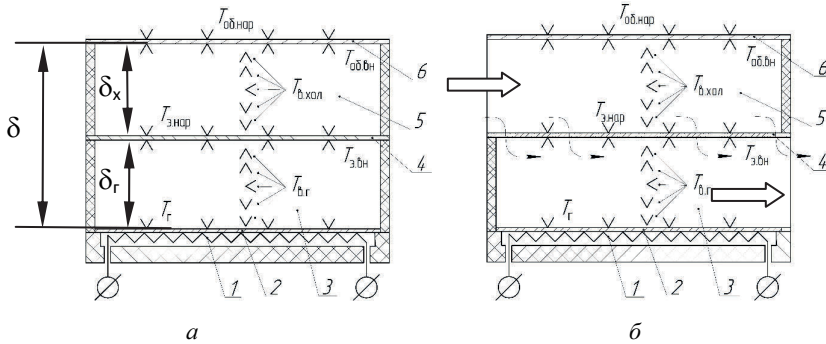
**Ключевые слова:** *тепловая защита, экранирование, пористый экран, воздушная завеса, свободная конвекция, вдув, теплопередача.*

Работа конвертированных газотурбинных двигателей, применяемых в качестве газогенераторов в стационарных энергоустановках, характеризуется выделением больших тепловых потоков в окружающее пространство отсеков и необходимостью в защите от них [1–3]. Имеющиеся в настоящее время решения требуют дополнительных энергозатрат на привод вентиляторов и других способов защиты от горячего двигателя. Вентиляция отсека обуславливает неравномерное охлаждение отдельных областей корпуса двигателя, что сказывается на неравномерности радиальных зазоров по окружности.

Авторами данной статьи предложен способ тепловой защиты с использованием экранов, установленных коаксиально между корпусом двигателя и наружной оболочкой, с различными вариантами обдува экрана воздухом, в том числе с применением проницаемых экранов и при свободной конвекции. Приведены результаты исследований процессов теплопередачи и эффективности тепловой защиты экрана и наружной оболочки при свободной конвекции в горячей и холодной зонах и при наличии вдува охлаждающего воздуха через пористый экран.

Для изучения процессов теплопередачи для описанных выше способов тепловой защиты была создана универсальная модельная установка, позволяющая проводить исследования на различных схемах экранирования при свободной и вынужденной конвекции.

**Схема рабочих участков.** Схемы рабочих участков экспериментального стенда, позволяющего моделировать процессы теплопередачи от горячего корпуса двигателя к его наружной оболочке при установке между ними экрана при свободной конвекции и создании воздушной завесы при вдуве воздуха через пористый экран в воздушных прослойках представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Схемы замеров на модельной установке: *а* — при свободной конвекции; *б* — при вдуве воздуха через пористый экран; 1 — нагреватель; 2 — горячая стенка; 3 — горячая прослойка; 4 — экран; 5 — холодная прослойка; 6 — наружная оболочка;  $\Delta$ ,  $\nabla$  — места установки термопар

В процессе экспериментов после выхода установки на стационарный режим проводились замеры следующих температур:  $T_{гр}$  — горячей стенки;  $T_{в.гр}$  — воздуха в прослойке с горячей стороны;  $T_{э.вн}$ ,  $T_{э.нар}$  — поверхности экрана с внутренней (горячей) и наружной (холодной) сторон;  $T_{об.вн}$ ,  $T_{об.нар}$  — поверхности наружной оболочки с внутренней и наружной сторон, соответственно;  $\delta_{г}$ ,  $\delta_{х}$  — толщина прослойки с горячей и холодной сторон соответственно;  $\delta$  — расстояние от горячей стенки до оболочки.

**Исследование теплоотдачи и эффективности тепловой защиты экранированием при свободной конвекции (рис. 1, а).** Программой опытов при исследовании тепловых процессов при естественной конвекции в горячих и холодных зонах установки предусматривалось варьирование величиной температурного фактора  $T_{гр}/T_{окр}$  и геометрическими характеристиками рабочего участка, т. е. размерами зазоров между нагревателем и экраном, экраном и наружной оболочкой.

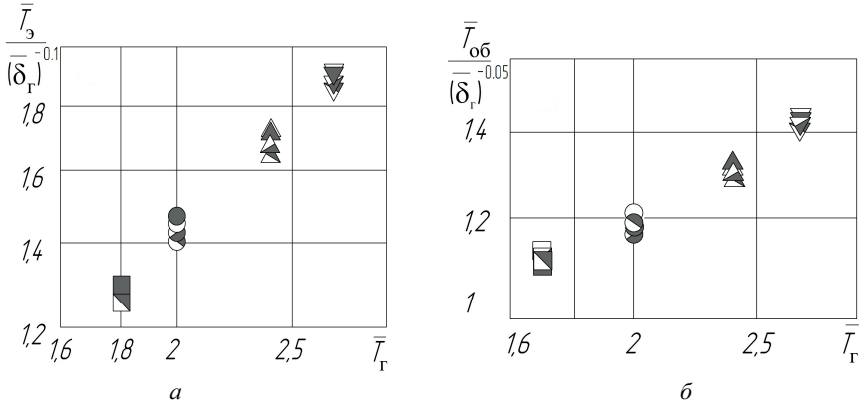
Результаты опытов по замерам температур экрана и оболочки в зависимости от температуры горячей стенки представлены на рис. 2.

Получены зависимости для оценки температуры экрана и оболочки в диапазоне изменения  $T_{гр} = 500 \dots 800$  К и  $\bar{\delta}_{г} = \delta_{г}/\delta = 0,25 \dots 0,75$ , что позволяет прогнозировать температурное состояние системы экранирования при свободной конвекции в прослойках:

$$\bar{T}_{э.вн} = 0,84(\bar{T}_{гр})^{0,8}(\bar{\delta}_{г})^{-0,1}; \tag{1}$$

$$\bar{T}_{об.нар} = 0,85(\bar{T}_{гр})^{0,53}(\bar{\delta}_{г})^{-0,05}. \tag{2}$$

Как видно на рис. 2, экспериментальные точки с удовлетворительной точностью располагаются вблизи зависимостей (1) и (2).



**Рис. 2.** Зависимость температуры экрана (а) и оболочки (б) от температур горячей стенки:

$\bar{T}_s = T_s/T_{окр}$ ;  $\bar{T}_{об} = T_{об}/T_{окр}$ ;  $\bar{T}_r = T_r/T_{окр}$ ;  $T_{окр} = 293$  К; ● —  $\delta_r = 0,095$  м; ○ —  $\delta_r = 0,072$  м; ◐ —  $\delta_r = 0,052$  м; ◑ —  $\delta_r = 0,025$  м (∇ —  $T_r = 800$  К; △ —  $T_r = 700$  К; ○ —  $T_r = 600$  К; □ —  $T_r = 500$  К)

Полученные результаты опытов при свободной конвекции подтверждают возможность уменьшения мощности теплового потока, достигающего наружной оболочки и, как следствие, снижения ее температуры.

**Исследование теплоотдачи и эффективности тепловой завесы при вдуве воздуха через пористый экран (рис 1, б).** При организации тепловой защиты созданием воздушной завесы через пористый экран, воздух подводился в верхнюю прослойку (ресивер) от компрессора, как показано стрелками (рис. 1, б), и, проходя по поровым каналам экрана, попадал в горячую прослойку, откуда отводился в окружающее пространство. Расход воздуха замерялся ротаметром. Система замера температур была та же, что и в опытах при изучении свободной конвекции. Температура горячей стенки  $T_r$  (нагревателя) изменялась в пределах 600...800 К. Результаты термометрирования всех поверхностей, участвующих в процессе теплопередачи и методики обработки опытных данных, представлены в [2].

Числа Нуссельта и Рейнольдса рассчитывались по формулам:

$$\text{Nu}_{ср} = \frac{\alpha_{г,э} l}{\lambda}; \quad \text{Re}_{ср,г} = \frac{(\rho w)_{ср,г} l}{\mu}. \quad (3)$$

Здесь  $l$  — длина рабочего участка. Теплопроводность воздуха  $\lambda$  и динамическая вязкость  $\mu$  принимались по среднеинтегральной температуре,  $(\rho w)_{ср,г} = G_B/2F_{к,г}$ ;  $F_{к,г}$  — площадь поперечного сечения канала с горячей стороны.

Результаты проведенных опытов при варьировании расходом воздуха  $G_B$ , температурой горячей стенки  $T_r$  и толщиной прослойки  $\delta_r$  представлены на рис. 3 и 4 (□ —  $T_r = 600$  К; ○ —  $T_r = 673$  К; △ —  $T_r = 713$  К; ∇ —  $T_r = 800$  К).

Экспериментальные точки с удовлетворительной точностью обобщаются зависимостью

$$\text{Nu}_{ср} = 1,8 \cdot 10^4 \text{Re}_{ср,г}^{-0,9} \bar{T}_r^{1,3} \bar{\delta}_r^{-1,9}. \quad (4)$$

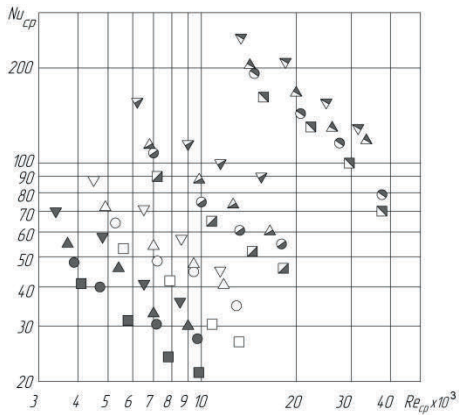


Рис. 3. Зависимость средних чисел Нуссельта от средних чисел Рейнольдса

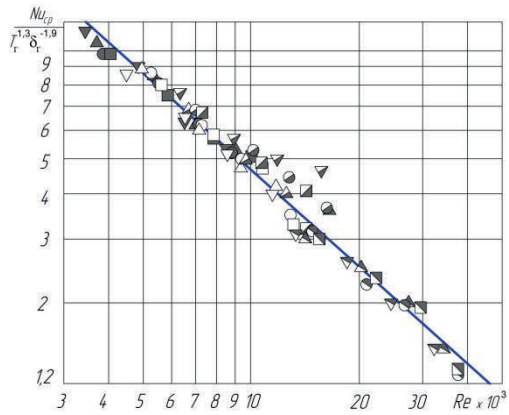


Рис. 4. Обобщенные результаты опытов по теплоотдаче к пористому экрану

Эффективность тепловой защиты экрана и оболочки при использовании пористого вдува определялась по формулам:

$$\theta_3 = \frac{T_\Gamma - T_{\text{э.вн}}}{T_\Gamma - T_{\text{в.вх}}}; \quad (5)$$

$$\theta_{\text{об}} = \frac{T_\Gamma - T_{\text{об.нар}}}{T_\Gamma - T_{\text{окр}}}. \quad (6)$$

Эффективность тепловой защиты экрана представлена на рис. 5, а в обобщенном виде на рис. 6. Видно, что с ростом расхода воздуха эффективность приближается к 1. Дальнейшее увеличение расхода для снижения температуры экрана нецелесообразно.

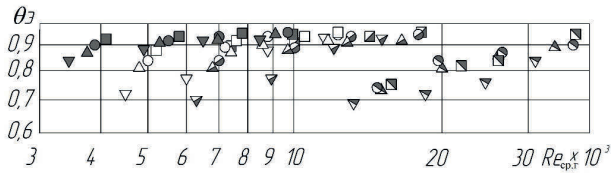


Рис. 5. Результаты опытов по эффективности тепловой защиты пористого экрана

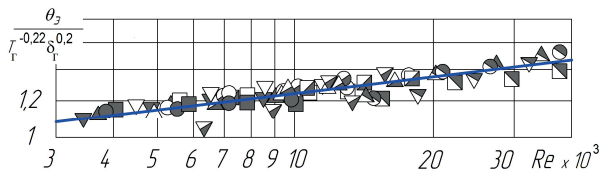


Рис. 6. Обобщенные результаты опытов по эффективности тепловой защиты пористого экрана

В результате обобщения получены зависимости для расчета эффективности и температуры экрана (из (5)):

$$\theta_3 = 0,51 \text{Re}_{\text{ср.г}}^{0,1} \left( \frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{в.вх}}} \right)^{-0,22} \left( \frac{\delta_{\text{г}}}{\delta} \right)^{0,2}; \quad (7)$$

$$T_3 = T_{\text{г}} - 0,51 \text{Re}_{\text{ср.г}}^{0,1} \left( \frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{в.вх}}} \right)^{-0,22} \left( \frac{\delta_{\text{г}}}{\delta} \right)^{0,2} (T_{\text{г}} - T_{\text{в.вх}}). \quad (8)$$

Эффективность тепловой защиты наружной оболочки представлена на рис. 7. Видно, что как температура  $T_{\text{г}}$ , так и толщина прослойки в холодной зоне практически не влияют на эффективность тепловой защиты оболочки, изменение расхода воздуха в данном диапазоне оказывает незначительное влияние.



Рис. 7. Результаты опытов по эффективности тепловой защиты наружной оболочки

Результаты, представленные на рис. 7, обобщаются следующей зависимостью:

$$\theta_{\text{об}} = 0,87 \cdot \text{Re}_{\text{ср.х}}^{0,01}. \quad (9)$$

Температура наружной оболочки из (6) с учетом (9) определяются по формуле

$$T_{\text{об}} = T_{\text{г}} - 0,87 \cdot \text{Re}_{\text{ср.х}}^{0,01} (T_{\text{г}} - T_{\text{окр}}). \quad (10)$$

Проведенные исследования по эффективности тепловой защиты экранированием наружной оболочки при свободной конвекции и при вдуве воздуха через пористый экран позволяют прогнозировать температуры наружной оболочки и экрана в исследуемом диапазоне величин ( $G_{\text{в}}$ ,  $\delta_{\text{г}}$ ,  $\delta_{\text{х}}$ ,  $T_{\text{г}}$ ). Изучение других способов позволит сделать выбор оптимальной схемы защиты для конкретного двигателя.

### Литература

- [1] Каримова А.Г., Дезидерьев С.Г., Зубарев В.М., Хабибуллин М.Г. Результаты экспериментального исследования процессов теплообмена и эффективности тепловой завесы при пористом вдуве. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2006, № 1, с. 37–39.
- [2] Гимбицкий А.В., Дезидерьев С.Г., Каримова А.Г. Теплопередача при различных способах тепловой защиты в системах приводных ГТД. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2001, № 3, с. 63–66.
- [3] Андронов А.В., Никишин В.А., Николаев В.В., Рыжинский И.Н. Способ охлаждения горячих узлов газотурбинных установок. Пат. 2252326 Российская Федерация. МПК F 02 C 7/12; заявитель и патентообладатель ООО «Самара-Авиагаз». № 2004119019 / 06; заявл. 24.06.2004; опубл. 20.05.2005, 1 с.
- [4] Гимбицкий А.В., Гильфанов Р.Н., Дезидерьев С.Г., Каримова А.Г. Защита поверхности экранированием от горячего источника при свободной конвекции. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2014, № 2, с. 3–7.

УДК 536.24

## Исследование эффективности тепловой изоляции кожухотрубного теплообменного аппарата

© Кулаков Валентин Васильевич, Каськов Сергей Иосифович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[sunnyday88@bk.ru](mailto:sunnyday88@bk.ru), [kaskov@power.bmstu.ru](mailto:kaskov@power.bmstu.ru)

*Исследована эффективность тепловой изоляции кожухотрубного теплообменного аппарата с использованием пенополиуретана ППУ-250. В программе CFX выполнен тепловой расчет корпуса с нанесенным на него слоем ППУ-250. Результаты исследования показали, что применение ППУ-250 обеспечивает допустимую с точки зрения требований безопасную температуру поверхности*

**Ключевые слова:** *тепловая изоляция, кожухотрубный теплообменный аппарат, теплофизика, пенополиуретан.*

В настоящее время более половины всех используемых теплообменных аппаратов составляет кожухотрубный тип [1]. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала и устранения тепловых потерь корпус теплообменников необходимо покрывать слоем тепловой изоляции. Для этих целей широко применяются жесткие пенополиуретаны (ППУ), которые отличаются хорошими теплоизоляционными свойствами, широким интервалом рабочих температур, высокой удельной прочностью, малой водо- и паропроницаемостью, доступными технологическими возможностями получения, стойкостью к коррозии и воздействию атмосферных факторов, химических сред, радиации.

Пенополиуретаны, нанесенные на металлическую поверхность, защищают ее от коррозии как слоем пенопласта, так и пленками, образующимися в процессе вспенивания на поверхностях пенопласта со стороны металла и со стороны внешней среды. Исследование свойств тепловой изоляции проводилось на примере пенополиуретана ППУ-250. Применяемый пенополиуретан в процессе эксплуатации экологически безопасен. Имеются соответствующие разрешения на применение пенополиуретана санитарно-эпидемиологическими органами. Для ППУ-250 коэффициент теплопроводности составляет 0,022 Вт/(м·К).

ППУ-250 можно длительно использовать в качестве теплостойкого диэлектрика и огнезащитного материала при температурах  $-60...+200$  °С, а кратковременно — при более высоких температурах. Он трудно сгораем: при его контакте с открытым пламенем образуется поверхностный слой кокса, защищающий изолированную поверхность от воздействия высоких температур и способствующий погашению пламени. Так, температура поверхности, изолированная слоем ППУ-250 толщиной 35 мм, не превышает 50 °С при воздействии температуры 340 °С в течение 10 мин [2].

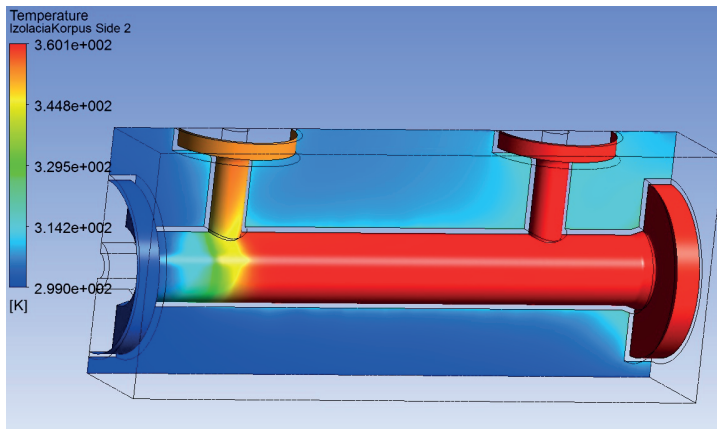
Теплообменный аппарат, для которого рассматривается тепловая изоляция, по назначению является охладителем высокотемпературного органического теплоносителя. В качестве охлаждающей жидкости используется вода, которая при этом нагре-



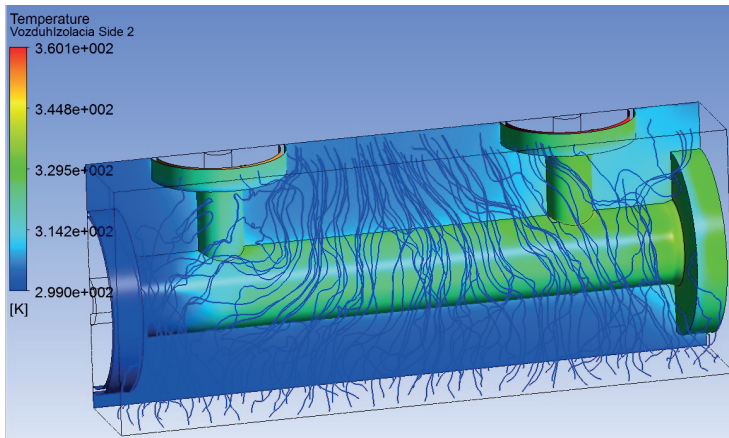
вается от 87 до 90,53 °С. По правилам техники безопасности требуется, чтобы температура наружной поверхности теплоизоляции не превышала 45 °С [3]. Исходя из этого, по стандартной инженерной методике [4] аналитическим методом была получена толщина теплоизоляции, выполненной из ППУ-250, которая составила 8,5 мм.

Для проверки полученного результата и определения наиболее теплонапряженных участков корпуса был проведен численный тепловой расчет корпуса теплообменного аппарата с нанесенным на него слоем теплоизоляционного материала ППУ-250 толщиной 8,5 мм в программе CFX, входящей в пакет Ansys. Расчетная модель состоит из четырех элементов: жидкий теплоноситель, корпус теплообменника, наружная изоляция, окружающая среда — воздух, поднимающийся со скоростью 0,01 м/с и имеющий температуру 25 °С.

В результате решения были получены картины распределения температуры по поверхности корпуса теплообменного аппарата (рис. 1, а) и по поверхности изоляции с нанесенными на него восходящими линиями потоков воздуха (рис. 1, б).



а



б

**Рис. 1.** Вид распределения температуры по поверхности:

а — корпуса теплообменного аппарата; б — по поверхности тепловой изоляции

Результаты решения показали, что температура наружной поверхности корпуса доходит до 87 °С (360 К), что недопустимо с точки зрения безопасности. Установлено, что температура наружной поверхности теплоизоляции не превышает 45 °С (318 К). Таким образом, слой теплоизоляции толщиной 8,5 мм, выполненный из пенополиуретана ППУ-250, позволяет обеспечить допустимую с точки зрения требований безопасности температуру поверхности.

### Литература

- [1] Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И. *Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена*. Казань, Центр инновационных технологий, 2009, 531 с.
- [2] Евсеев Л.Д. Характеристики пенополиуретанов, применяемых в строительстве. *Полиуретановые технологии*, 2006, № 4 (7), с. 8–10.
- [3] Белов С.В., ред. *Безопасность жизнедеятельности*. Москва, Высшая школа, 2007, 616 с.
- [4] Хижняков С.В. *Практические расчеты тепловой изоляции (для промышленного оборудования и трубопроводов)*. Москва, Энергия, 1976, 200 с.

УДК 536.6

## Исследование тепловых способов защиты от образования барьерного льда на воздухозаборниках летательных аппаратов

© Любимова Маргарита Александровна, Кузенов Виктор Витальевич,  
Рыжков Сергей Витальевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[Margarita\\_lybim@list.ru](mailto:Margarita_lybim@list.ru)

*Рассмотрено решение актуальной задачи сведения к минимуму влияния метеорологических условий на летательные аппараты. Предлагается тепловой способ защиты от образования барьерного льда на воздухозаборниках. Проведено математическое моделирование потока, состоящего из переохлажденных капель.*

**Ключевые слова:** *тепловая защита, летательный аппарат, математическое моделирование, аэродинамические характеристики*

Для современного авиационного транспорта задача сведения к минимуму влияния метеорологических условий на регулярность полетов является актуальной. В ее решении одно из основных мест занимает защита самолетов от обледенения [1, 2]. Во время полета в облаках происходит налипание льда на воздухозаборник (рис. 1), что обуславливает ухудшение аэродинамических характеристик летательного аппарата.

При этом налипший лед отрывается от поверхности и попадает в двигатель, повреждая лопадки.

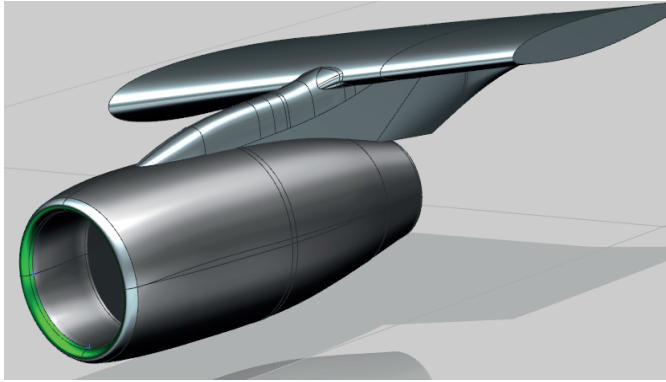


Рис. 1. 3-D модель воздухозаборника двигателя ПС-90А

Обледенение самолетов связано с наличием в атмосфере воды в капельно-жидком состоянии при отрицательной температуре и в большинстве случаев происходит при полетах в облаках.

В работе проведено математическое моделирование потока, состоящего из переохлажденных капель [2–4], а также выполнен ряд расчетов: по воздушному обтеканию воздухозаборника, по количеству налипающей массы льда в условиях отключенной системы обогрева, по необходимой мощности воздушного обогрева кромки воздухозаборника летательного аппарата.

Расчет проводился в пакете FloEFD для режима ожидания (высота 7000 м, время полета 45 мин). Далее, по полученным аналитическим путем данным рассчитывалось количество тепла, которое необходимо подвести к кромке воздухозаборника.

Распределение льда, образующегося на кромке воздухозаборника, представлено на рис. 2. Данное исследование позволит в дальнейшем, спроектировать эффективную противообледенительную систему обогрева.

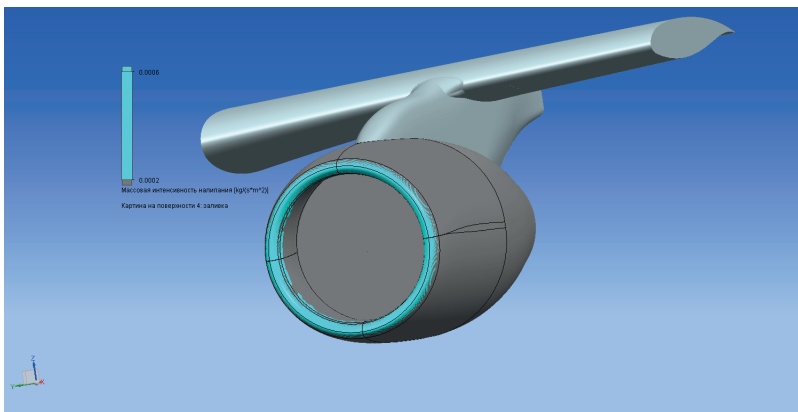


Рис. 2. Распределение льда по передней поверхности воздухозаборника

## Литература

- [1] Горский В.В., ред. *Математическое моделирование тепловых и газодинамических процессов при проектировании летательных аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 212 с.
- [2] Скиданов С.Н., Сергеев В.А., Филиппов В.А. *Расчет эффективности противообледенительной системы воздухозаборников двигателей ПС-90А и ПС-90А2*. Москва, ОАО «Туполев», 2009, 75 с.
- [3] Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.Л., Осипов М.И. *Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 592 с.
- [4] Кузенов В.В., Котов М.А. Анализ газодинамических процессов и разработка модели течений в ударной гиперзвуковой аэродинамической трубе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение*, 2014, № 1 (94), с. 3–25.

УДК 533.9; 621.039; 537.525.99

## Перспективные космические двигатели на основе геликонного разряда

© Полозова Татьяна Николаевна,  
Рыжков Сергей Витальевич, Кузенов Виктор Витальевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[poltane@mail.ru](mailto:poltane@mail.ru)

*Рассмотрены электроракетные двигатели и их преимущества перед традиционными двигателями, работающими на химическом топливе. Показано, почему геликонные двигатели наиболее перспективны среди электроракетных двигателей другого типа. Приведена схема геликонного двигателя, наглядно показывающая их устройство и принцип работы. Проведен краткий сравнительный обзор по установкам, используемым в России и за рубежом.*

**Ключевые слова:** геликонный двигатель, электроракетный двигатель, источник плазмы, геликонные волны, циклотронный нагрев, удельный импульс.

В настоящее время при освоении космоса в основном используются космические аппараты с традиционными двигателями на химическом топливе. Однако они двигатели имеют значительный недостаток — низкий удельный импульс (отношение импульса к массовому расходу топлива), следовательно, их ресурс сильно ограничен. Именно поэтому ученые по всему миру работают над созданием и улучшением уже существующих моделей электроракетных двигателей (ЭРД), которые уже работают в составе спутников связи.

Главная задача создания новых схем ионных двигателей и улучшения параметров уже существующих — повышение ресурса ЭРД. Основным фактором, снижающим ресурс ионных двигателей, работающих на разряде постоянного тока, является

малое время жизни катода. По этой причине ведется разработка двигателей без катода (безэлектродный разряд), т. е. высокочастотных и сверхвысокочастотных ЭРД. Перспективным из подобных двигателей считается безэлектродный ЭРД с высокочастотной (ВЧ) ионизацией — геликонный двигатель [1–5].

Безэлектродные магнитоплазменные (геликонные) двигатели имеют еще одно значительное преимущество перед двигателями другого типа — возможность использования множества рабочих тел (например, аргон, ксенон, азот) [6, 7].

Одни из первых модель геликонного двигателя предложили К. Чарльз и Р.В. Босвелл из Австралийского национального университета. Изначально двигатель такого типа назывался Helicon double layer thruster (HDLT) [8, 9] (геликонный двигатель с двойным слоем). Двойные слои образуются на границе между областями плазмы с различными свойствами при наличии внешнего магнитного поля. Формирование и ускорение ионного пучка осуществляется при падении потенциала в двойном слое [10].

К настоящему времени разработано несколько моделей геликонных двигателей, основные из них приведены в табл. 1 с указанием экспериментальных параметров. Рассматриваемые ЭРД бывают одно- [1], двух- [7, 11] и трехступенчатыми [6]. Первая ступень — геликонный источник, состоящий из разрядной камеры (например, кварцевая трубка) с газом, которая помещена во внешнее магнитное поле, создаваемое обмотками или сильными магнитами (рис. 1). Магнитное поле создается для радиального удержания плазмы и изоляции от стенок камеры, а также направляет поток электронов. С помощью специальной антенны особой формы генерируются геликонные волны [12].

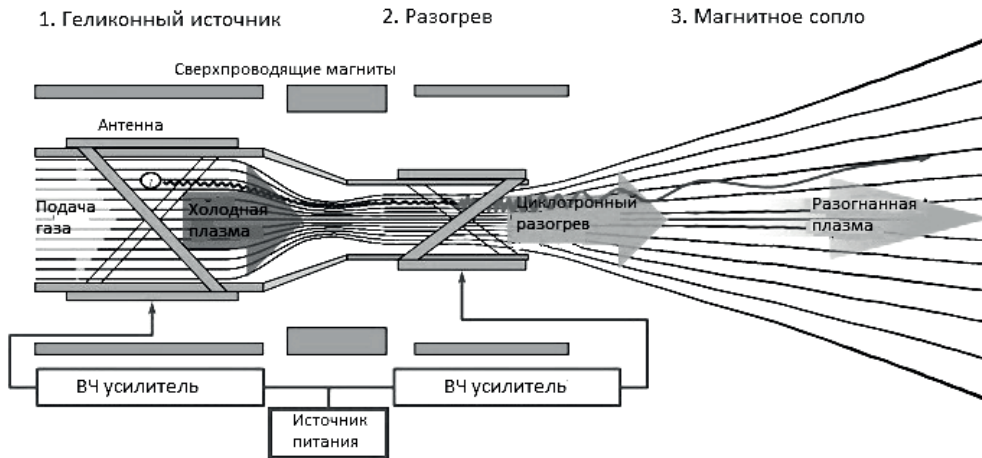


Рис. 1. Схема VASIMR VX-100 (3 ступени) [6]

Остальная часть конструкции геликонного двигателя зависит от ступенчатости двигателя. В одноступенчатом ЭРД за счет высокого давления электронов образуется амбиполярное электрическое поле, с помощью которого ионы ускоряются, проходя через двойной электрический слой [13, 14]. На выходе из разрядной камеры создается магнитное сопло (для двухступенчатых двигателей), преобразующее поперечное движение частиц в продольное [11]. В трехступенчатых ЭРД присутствует еще про-

межучточная ступень, в которой происходит ускорение ионов резонансным ВЧ полем («циклотронный разогрев») [6].

В отличие от двигателей, работающих на химическом топливе, (ЭРД) на сегодняшний день имеют меньшую эффективность и очень малую тягу (см. табл. 1), поэтому их применяют для систем навигации и коррекции орбит (мини-двигатели) и разгона космических кораблей для межзвездных полетов (маршевые двигатели) [10].

Таблица 1

Основные параметры существующих геликонных двигателей

Название ЭРД	Разработчик	Массовый расход, мг/с	Тяга, мН	Удельный импульс, с	ВЧ мощность, Вт	КПД, %
Mini helicon thruster mHTX (1 ступень) [1, 13, 14]	MIT Space Propulsion Laboratory, США	37	100	—	$10^3$	20
The helicon Hall thruster ННТ (2 ступени) [7]	The University of Michigan's Plasmadynamics, США	6	21	—	300	29
Геликонный двигатель (2 ступени) [11]	МНТЦ космической энергетики и двигателей, Украина	0,12	1,5	1250	50	19
VASIMR VX-100 (3 ступени) [6]	Ad Astra Rocket Company, США	—	350	5000	$10^4$	72

Благодаря своей экономичности и большому удельному импульсу геликонные двигатели очень перспективны. Более того, они не требуют наличие электрода, что увеличивает их время жизни, и в качестве рабочего тела могут использовать различное дешевое топливо, что делает их универсальными.

Однако существует ряд проблем, которые не позволяют полностью отказаться от химических двигателей и перейти на ЭРД. Основной из этих проблем является наличие мощного электрического источника, необходимого для работы двигателя такого типа. Поэтому ведутся исследования о возможности использования ядерной энергетической установки в качестве источника электричества для ионных ЭРД.

### Литература

- [1] Chen F.F. Ion ejection from a permanent-magnet mini-helicon thruster. *Physics of Plasmas*, 2014, vol. 21, pp. 093511.
- [2] Кузенов В.В., Рыжков С.В. Отдельные элементы физико-математической модели геликонного разряда. *Прикладная физика*, 2015, № 2, с. 37–44.
- [3] Shinohara S., Tanikawa T., Hada T. et al. High-density helicon plasma sources: basics and application to electrodeless electric propulsion. *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63 (1T), pp. 164–167.
- [4] Кузенов В.В., Рыжков С.В., Фролко П.А., Шумаев В.В. Математическая модель импульсного плазменного двигателя с преионизацией геликонным разрядом. *Труды МАИ*, 2015.

- № 74. URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/12f/12f6f6b359a00847f5c7ed6607514bed.pdf> (дата обращения 02.02.2015).
- [5] Kuzenov V.V., Polozova T.N., Ryzhkov S.V. Numerical Simulation of pulsed plasma thruster with a preionization helicon discharge. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015.
- [6] Longmier B.W., Bering E.A., Squire J.P., Glover T.W., Chang-Diaz F.R., Brukardt M. Hall thruster and VASIMR VX-100 force measurements using a plasma momentum flux sensor. *AIAA Paper* 2009-246. 47<sup>th</sup> AIAA, Florida, 2009, 13 p.
- [7] Shabshelowitz A., Gallimore A., Peterson P. Performance of a helicon Hall thruster operating with xenon, argon, and nitrogen. *AIAA Paper* 2012-4336, 48<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Atlanta, Georgia, 2012, 11 p.
- [8] Charles C., Boswell R. Current-free double-layer formation in a high-density helicon discharge. *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 82, pp. 1356–1358.
- [9] Charles C. Plasmas for spacecraft propulsion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, vol. 42, pp. 163001.
- [10] Петров А.К. Характеристики модели высокочастотного ионного двигателя с ускорением ионов скачком потенциала двойного слоя. Труды МАИ. № 74. URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/12f/12f6f6b359a00847f5c7ed6607514bed.pdf> (дата обращения 02.02.2015).
- [11] Цаглов А.И., Лоян А.В., Кошелев Н.Н., Рыбалов О.П. Результаты испытаний безэлектродного электрореактивного двигателя малой мощности с ВЧ ионизацией РТ. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2012, № 8, с. 212–217.
- [12] Полозова Т.Н. Исследование разряда геликонного типа для применения в машиностроении, медицине и материаловедении. *Молодежный научно-технический вестник*, 2015.
- [13] Batishchev O. Experimental study of the mini-helicon thruster. *AFRL. Special report* 62203F, 2009, 81 p.
- [14] Celik M., Batishchev O., Martinez-Sanchez M. Application of spectroscopic measurements to electrical propulsion. *48<sup>th</sup> Annual Meeting of the Division of Plasma Physics*. Philadelphia, PA. 2006, vol. 51 (7), pp. 328–335.

УДК 536.526.4

## **Исследование воздействия ударных волн на температурный перепад в устройстве безмашинного энергоразделения потоков**

**© Виноградов Юрий Алексеевич, Здитовец Андрей Геннадиевич,  
Попович Сергей Станиславович, Стронгин Марк Моисеевич,  
Леонтьев Александр Иванович**

Россия, г. Москва, Научно-исследовательский институт механики  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

[pss1@mail.ru](mailto:pss1@mail.ru)

*Представлены результаты исследования влияния генерации ударных волн на температурный перепад в устройстве безмашинного энергоразделения потоков (трубе Леонтьева). Исследования проводились на воздушном прототипе устройства в диапазоне чисел Маха  $M = 2-2,5$ . Ударные волны генерировались за счет использования в сверхзвуковом канале устройства конического сопла с углом раскрытия 20 граду-*

сов. На основе полученных результатов сделан вывод об увеличении температурного перепада за счет инициации ударных волн в сверхзвуковом канале устройства безмашинного энергоразделения потоков. Исследования выполнены на экспериментальной базе НИИ механики МГУ.

**Ключевые слова:** сверхзвуковой поток, ударная волна, число Маха, безмашинное энергоразделение потоков.

Безмашинное энергоразделение потоков предполагает перераспределение полного теплосодержания (температуры) в потоке газа без совершения им внешней работы или теплообмена с окружающей средой. Газовый поток с температурой  $T_0^*$ , пройдя через такое устройство, разделяется на два потока с температурами  $T_1^* < T_0^*$  и  $T_2^* > T_0^*$  [1–3]. Среди известных эффектов безмашинного энергоразделения можно отметить вихревые (Ранк — Хилш [4]), резонансные (Гартман — Шпренгер [5]), эжекцию с отрицательным коэффициентом эжекции (Емин — Зарицкий [6]), энергоразделение в двухфазных потоках (Столяров [7]), пульсационные трубы (Гиффорд — Лонгсворт [8]), стратификацию в потоках газа при обтекании различных преград (Эккерт — Вайс [1, 9]), а также стратификацию в свободно истекающей струе газа (Гольдштейн и др. [10–12]).

В настоящее время создано множество разновидностей энергоразделяющих устройств, отличительной особенностью которых является их простота, отсутствие движущихся частей, низкая инерционность, малый вес и надежность конструкций [3]. С другой стороны, им присущ и существенный недостаток, ограничивающий их применение в тепловых двигателях и установках — высокие потери полного давления на выходе по холодному и горячему потокам.

Академиком А.И. Леонтьевым был предложен новый метод энергоразделения газового потока [13]. Принцип действия нового устройства основан на известном газодинамическом эффекте: температура адиабатной стенки, обтекаемой потоком сжимаемого газа, может существенно отличаться от температуры торможения потока за счет диссипативных процессов в пограничном слое. В результате взаимодействия дозвукового и сверхзвукового потоков газа через теплопроводную стенку (рис. 1) на выходе из устройства энергоразделения образуются два потока — нагретый сверхзвуковой и охлажденный дозвуковой (при  $Pt < 1$ ).

Эффективность устройства энергоразделения определяется прежде всего количеством теплоты, передаваемой через разделяющую потоки стенку [14–16]. Тепловой поток, в свою очередь, зависит от теплоотдачи со стороны сверхзвукового  $\alpha_1$  и дозвукового потоков  $\alpha_2$  (коэффициента теплопередачи  $K$ ), начальной температуры торможения потока  $T_0^*$  и адиабатной температуры стенки  $T_w^*$ , обтекаемой сверхзвуковым потоком:

$$q_w = K(T_w^* - T_0^*) = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} (T_w^* - T_0^*). \quad (1)$$

Температура адиабатной стенки (также называемая теплоизолированной) в практике инженерных и научных расчетов определяется через коэффициент восстановления температуры  $r$ :



$$T_w^* = T_0 \left( 1 + r \frac{k-1}{2} M^2 \right); \quad (2)$$

$$r = \frac{T_{aw} - T_0}{T_0^* - T_0}. \quad (3)$$

Как следует из (1) и (2), эффективность безмашинного энергоразделения потоков существенным образом зависит от величины коэффициента восстановления температуры. Для повышения количества передаваемого тепла в устройстве необходимо уменьшить коэффициент восстановления, например, путем формирования поверхностей особой формы с пониженной температурой теплоизолированной стенки [17, 18]. Теоретические расчеты [19] также показывают перспективность существенного повышения эффективности энергоразделения за счет использования рабочих тел с низким числом Прандтля. Примерами таких рабочих тел являются смеси легких и тяжелых газов: водород — аргон, гелий — аргон, водород — ксенон, гелий — ксенон.

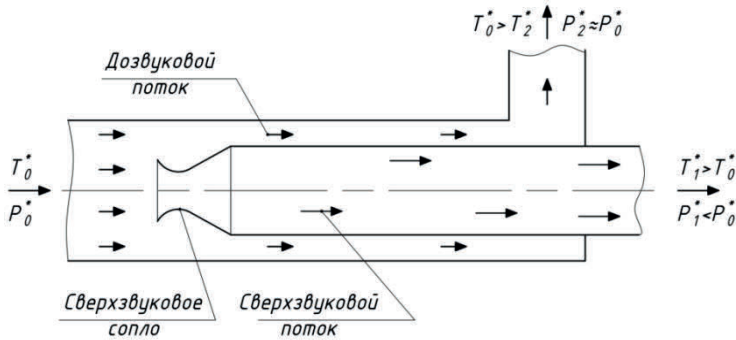


Рис. 1. Принцип действия устройства безмашинного энергоразделения потоков

Другим направлением повышения эффективности энергоразделения является увеличение наименьшего из коэффициентов теплоотдачи (1), в данном случае — со стороны сверхзвукового канала устройства [20, 21]. Любое внесение конструктивных изменений в сверхзвуковой канал с целью интенсификации теплоотдачи сопровождается образованием ударных волн и локальных отрывных зон. Организация течения потока в сверхзвуковом канале, заполненном скачками уплотнения малой интенсивности, может также способствовать увеличению коэффициента теплоотдачи [21].

В области отрыва турбулентного пограничного слоя тепловой поток увеличивается в несколько раз [22, 23]. Отрывом потока от стенки сопровождаются течения в проточных трактах теплообменных устройств, энергетических машин и двигателей. Расчет параметров теплообмена при отрывных течениях необходим из-за возникновения в области отрыва пиковых тепловых потоков. Этот эффект следует подавлять в случае разработки мер тепловой защиты, либо его можно использовать для локальной интенсификации теплообмена. Отрывные течения также могут дополнительно интенсифицировать теплообмен в устройстве энергоразделения. Однако необходимо также учитывать влияние отрывных течений на изменение коэффициента восстановления температуры, который наряду с теплоотдачей, в конечном итоге определяет эффективность устройства.

Экспериментальные исследования проводились на прототипе устройства газодинамической температурной стратификации с использованием систем регистрации данных National Instruments, автоматизированных программ опроса показаний датчиков в среде LabView и бесконтактных тепловизионных методов фиксации температурных полей. В процессе исследований измерялось распределение статического давления и температуры стенки сверхзвукового канала устройства при отсутствии дозвукового потока, что позволило оценить максимально возможное охлаждение дозвукового потока. После этого проводился эксперимент на устройстве температурной стратификации. По дозвуковому каналу запускался поток воздуха и измерялся суммарный эффект температурной стратификации по показаниям датчиков на входе и выходе из соответствующих каналов устройства.

Исследования проводились для двух видов конических сопел с малым ( $4^\circ$ ) и большим ( $20^\circ$ ) углом раскрытия. Основной гипотезой исследования было то, что при увеличении угла раскрытия сопла в сверхзвуковом канале возникает система косых скачков уплотнения, которые интенсифицируют теплообмен в области взаимодействия с пограничным слоем. Об этом свидетельствовали данные предыдущих исследований по влиянию скачков уплотнения и отрывного течения за ребром на коэффициент восстановления температуры в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа [24]. В результате исследования установлено, что при увеличении угла раскрытия сопла температурный перепад в устройстве безмашинного энергоразделения повышается до 20 % в зависимости от соотношения расходов по холодному и горячему трактам.

*Работа выполнена по гранту Российского научного фонда (проект № 14-19-00699).*

## Литература

- [1] Eckert E.R.G. Energy separation in fluid streams. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1986, vol. 13 (2), pp. 127–143.
- [2] Леонтьев А.И. Газодинамические методы температурной стратификации (обзор). *Изв. РАН. МЖГ*, 2002, № 4, с. 6–26.
- [3] Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор). *ТВТ*, 2014, т. 52, № 2, с. 297–307.
- [4] S. Eiamsa-ard, P. Promvonge. Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes (Review). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, iss. 7, pp. 1822–1842.
- [5] Raman G., Srinivasan K. The powered resonance tube: From Hartmann's discovery to current active flow control applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2009, vol. 45 (4–5), pp. 97–123.
- [6] Емин О.Н., Зарицкий С.П., Моравский А.В. Экспериментальное исследование работы эжектора с отрицательным коэффициентом эжекции. *Теплоэнергетика*, 1972, № 10, с. 51–53.
- [7] Столяров А.А. О механизме энергоразделения в газовом эжекторе. *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1977, № 6, с. 145.
- [8] Gifford W.E., Longworth R.C. Pulse-Tube Refrigeration. *Trans. ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* 1964. Vol. 86, iss. 3, pp. 264.
- [9] Eckert E.R.G., Weise W. Measurement of temperature distribution on the surface of unheated bodies in high velocity flow. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 1942, vol. 13, pp. 246–254.
- [10] Goldstein R.J., Seol W.S. Heat Transfer to a Row of Impinging Circular Air Jets Including the Effect of Entrainment. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1991, vol. 34, pp. 2133.
- [11] Goldstein R.J., Seol W.S. Energy Separation in a Jet Row. *Trans. ASME. J. Fluids Eng.*, 1997, vol. 119, iss. 1, p. 74.
- [12] Han B., Goldstein R.J., Choi H.G. Energy separation in shear layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, vol. 45 (1), pp. 47–55.

- [13] Леонтьев А.И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева). Пат. № 2106581 Российская Федерация. Кл. МПК-6: F25B9/02.10.03.1998.
- [14] Макаров М.С., Макарова С.Н. Эффективность энергоразделения при течении сжимаемого газа в плоском канале. *Теплофизика и аэромеханика*, 2013, т. 20, № 6, с. 777–787.
- [15] Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения. *ТВТ*, 2014, т. 52, № 1, с. 14.
- [16] Волчков Э.П., Макаров М.С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковом потоке. *Изв. РАН. Энергетика*, 2006, № 2, с. 19–31.
- [17] Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование температурной стратификации воздушного потока, протекающего через сверхзвуковой канал, с центральным телом в виде пористой трубки. *Изв. РАН. МЖГ*, 2013, № 5, с. 134–145.
- [18] Здитовец А.Г., Титов А.А. Влияние формы поверхности теплоизолированного стержня, омываемого сверхзвуковым потоком, на коэффициент восстановления температуры. *Изв. РАН. Энергетика*, 2007, № 2, с. 111–117.
- [19] Бурцев С.А. Методика расчета устройств газодинамической температурной стратификации при течении реального газа. *Тепловые процессы в технике*, 2013, № 9, с. 386–390.
- [20] Zditovets A.G., Vinogradov U.A., Titov A.A. Experimental investigation of the heat transfer process at a gas-dynamic method of energy separation. *Proceedings of 15th International Heat Transfer Conference*. ИИТЦ-15-8965, 2014, 13 p.
- [21] Попович С.С. Экспериментальное исследование влияния падающего скачка уплотнения на адиабатную температуру стенки в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа. *Тепловые процессы в технике*, 2014, т. 6, № 3, с. 98–104.
- [22] Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. Москва, Наука, 1974, 711 с.
- [23] Боровой В.Я. *Течение газа и теплообмен в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем*. Москва, Машиностроение, 1983, 144 с.
- [24] Popovich S.S., Egorov K.S., Vinogradov Yu.A. Experimental research of adiabatic wall temperature influenced by separated supersonic flow. *Proceedings of 15th International Heat Transfer Conference, ИИТЦ-15-8962*, 2014, 11 p.

УДК 536.24

## **Исследование гидравлического сопротивления труб с винтовой накаткой, полученной методом деформирующего резания**

**© Скрыпник Артем Николаевич, Щелчков Алексей Валентинович,  
Попов Игорь Александрович**

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный  
исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[maggotself@gmail.com](mailto:maggotself@gmail.com)

*Представлены экспериментальные исследования гидравлического сопротивления каналов с винтовой накаткой полученной методом деформирующего резания. В результате проведенных экспериментов получены графические зависимости гидравли-*

ческого сопротивления таких труб от числа Рейнольдса. Результаты показывают, что при использовании данного типа интенсификаторов прирост гидравлического сопротивления каналов может достигать 12 раз, по сравнению с гладким каналом при аналогичных условиях.

**Ключевые слова:** теплообмен, интенсификация теплообмена, винтовая накатка, закрутка потока, гидравлическое сопротивление, вынужденная конвекция, метод деформирующего резания.

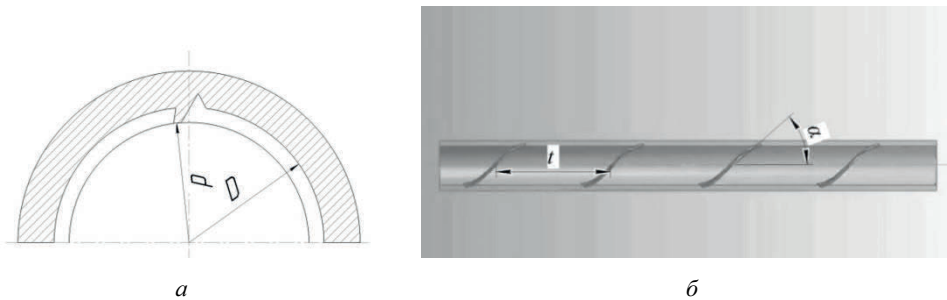
Из литературных данных следует, что устройства, производящие завихрение в движущейся жидкости, являются наиболее привлекательными средствами интенсификации теплообмена в системах с вынужденной конвекцией. В связи с этим большой интерес вызывают вопросы гидродинамики в каналах с закруткой потока.

Поэтому настоящее исследование имело две цели:

- 1) получить данные по коэффициенту гидравлического сопротивления в трубах с винтовой накаткой, полученной методом пластического деформирования;
- 2) сравнить гидравлическое сопротивление в трубах с винтовой накаткой с гидравлическим сопротивлением в гладкой трубе при одинаковых режимах течения и определить эффективность этого метода интенсификации.

Эксперименты проводились на медных трубах с винтовой накаткой, полученной методом деформирующего резания. Трубы имели различные углы и шаг накатки. Основные геометрические параметры приведены в табл. 1 и на рис. 1. Измерения коэффициента гидравлического сопротивления проводились в изотермических условиях при 20 °С в трубах длиной 800 мм в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 3 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^5$ .

В результате проведенных экспериментов получены графические зависимости коэффициента гидравлического сопротивления каналов с винтовой накаткой, полученной методом деформирующего резания от числа  $Re$ .



**Рис. 1.** Характерные размеры исследуемых труб: *a* — эквивалентный и внутренний диаметр исследуемых труб; *b* — шаг и угол закрутки винтовой накатки

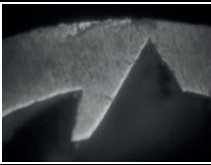

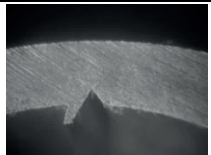

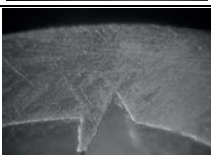

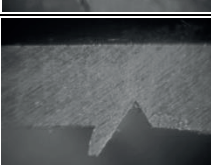

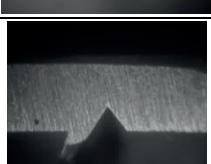




Коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывался по формуле

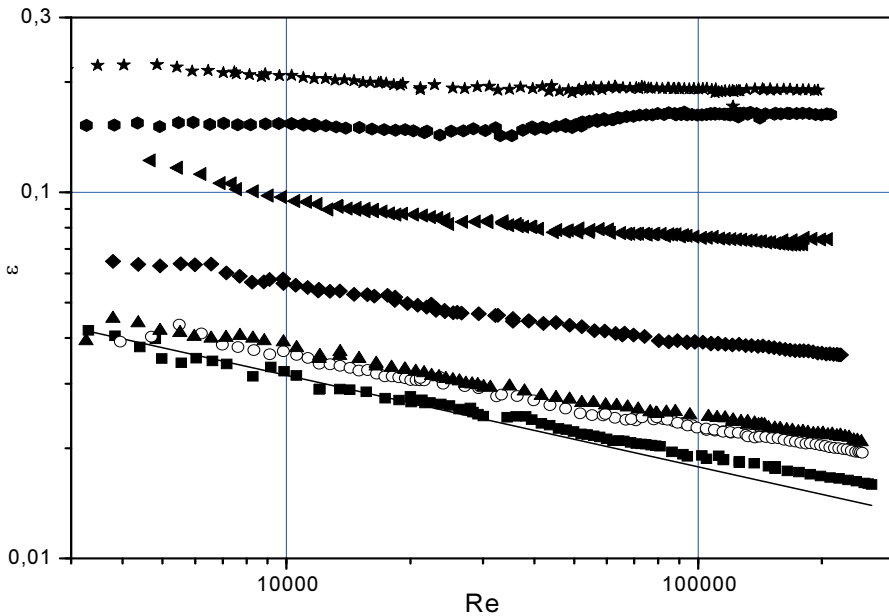
$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p D}{\rho w^2 L}, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  — перепад давления на исследуемой трубе, Па;  $D$  — внутренний диаметр трубы, м;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  — среднemasсовая скорость, кг/с;  $L$  — длина экспериментальных труб, м.

Таблица 1

Геометрические параметры исследуемых труб

Угол наклона канавки к оси трубы, град	Осевой шаг, мм	Срез профиля гребня-канавки в нормальном к нему сечении	Длина трубы, мм	Относительная высота выступа, $d/D$	Условное обозначение
14	198		800	0,825	
32	80		800	0,925	
46	48		800	0,9125	
61	28		800	0,9125	
76	12		800	0,95	
87	2,5		800	0,9125	
Гладкая труба					



**Рис. 2.** Зависимость гидравлического сопротивления труб с винтовой накаткой от числа Re:

— расчет по Блазиусу (2); точки — экспериментальные данные (обозначения см. табл. 1)

В исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 3 \cdot 10^3 — 2,5 \cdot 10^5$  измеренные значения коэффициента гидравлического сопротивления при течении в гладкой трубе описывались со стандартным отклонением 10 % известным соотношением (по Блазиусу):

$$\xi_0 = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (2)$$

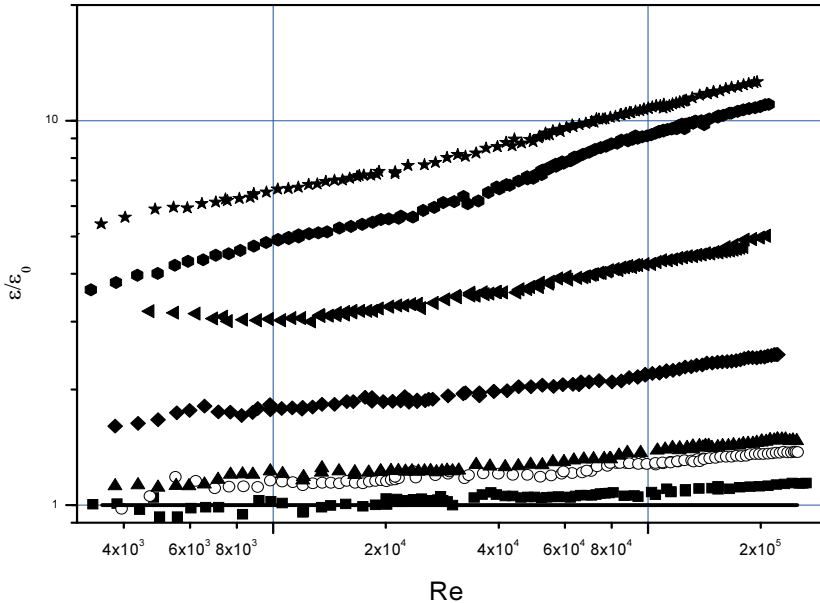
Здесь  $Re = \rho w D / \mu$  — число Рейнольдса;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Этот результат выполнял функцию калибровки экспериментальной установки.

После замены гладкой трубы на трубы с винтовой накаткой коэффициент гидравлического сопротивления заметно увеличился. Зависимость  $\xi$  от  $Re$  для шести исследуемых труб с винтовой накаткой, полученной методом деформирующего резания, представлена на рис. 2. Видно, что при низких  $Re$  увеличение коэффициента гидравлического сопротивления невелико, а при высоких значениях  $Re$  оно весьма значительно. Данный факт можно объяснить тем, что при низких значениях числа Рейнольдса (малый расход теплоносителя), увеличение коэффициента гидравлического сопротивления обусловлено наличием малых вихрей за выступами, т. е. жидкость просто обтекает винтовую накатку.

При увеличении расхода (повышения числа Рейнольдса) вследствие наличия винтовой закрутки индуцируется вторичное течение, а следовательно, происходит значительная турбулизация течения, которая приводит к сильному росту коэффициента гидравлического сопротивления.

Установлено, что для труб с углами накатки 61, 76 и 87°, начиная со значений  $Re = 5 \cdot 10^4$ , проявляется автомодельность, т. е. гидравлическое сопротивление труб не зависит от скорости теплоносителя, а соответственно и от значения числа  $Re$ .



**Рис. 3.** Зависимость прироста гидравлического сопротивления от числа  $Re$ :  
 — расчет по Блазиусу (2); точки — экспериментальные данные (обозначения см. табл. 1)

Увеличение гидравлического сопротивления каналов с винтовой накаткой по сравнению с гладкой трубой (по Блазиусу) в зависимости от значения числа  $Re$  показано на рис. 3. Наибольший прирост гидравлического сопротивления наблюдается для канала с углом винтовой закрутки 76° и относительной высотой выступов  $d/D = 0,95$  ( $d$  — диаметр трубы по высоте выступов, м). В данном случае коэффициент гидравлического сопротивления в 12,6 раз выше, чем в аналогичных условиях для гладкой трубы, т. е.  $\xi/\xi_0 = 12,6$ .

В данный момент ведутся эксперименты по измерению гидравлического сопротивления в ламинарной области течения, эксперименты по измерению коэффициента теплоотдачи труб с винтовой накаткой полученной методом деформирующего резания, построение модели для численного исследования труб с данным типом интенсификаторов.

### Литература

[1] Гортышов Ю.Ф., Щелчков А.В., Яркаев М.З., Аль-Джанаби А.Х.А., Попов И.А. Интенсификация теплоотдачи в теплообменных аппаратах. *Девятая Междунар. теплофизическая школа (МТФШ-9) «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий»*, Душанбе, 6–11 октября 2014 г. Душанбе: Филиал НИУ «МЭИ», 2014.

- [2] Попов И.А., Щелчков А.В., Яркаев М.З. Теплогидравлические характеристики дискретно-шероховатых труб на переходных режимах течения. *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2013, № 1.
- [3] Шукин А.В., Ильинков А.В. *Пристенная интенсификация теплообмена при сложных граничных условиях*. Казань, Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014.
- [4] Webb R.L., Eckert E.R.G., Goldstein R.J. Generalized heat transfer and friction correlations for tubes with repeated-rib. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. vol. 15, iss. 1.

УДК 536.24

## **Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении различных жидкостей на микродеформированных поверхностях в условиях свободной конвекции**

© Хакимзянов Раиль Рустямович, Щелчков Алексей Валентинович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[Strike92@inbox.ru](mailto:Strike92@inbox.ru)

*Представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи на микроструктурированных поверхностях. Поверхности получены методом деформирующего резания и имеют различные конструктивные формы и размеры. Достигнута интенсификация теплообмена на поверхностях с трехмерными столбчатыми и канальными структурами — с 3 до 10 раз. Для двухмерных микроребер достигнута интенсификация теплообмена — до 2,5 раз. Увеличение критической плотности теплового потока составило 4,1–6 раз. Даны рекомендации для использования исследованных поверхностей при кипении различных жидкостей.*

**Ключевые слова:** интенсификация, критические тепловые потоки, микроструктурированные поверхности.

Безопасность и надежность при эксплуатации авиационного радиоэлектронного оборудования требуют эффективных систем охлаждения микроэлектронной техники. При выборе типа системы охлаждения и ее проектировании необходимо определить уровень теплоотдачи, требуемый для отвода заданного теплового потока электронного компонента. Системы охлаждения должны помещаться в габаритах электронного оборудования и не вызывать резкое увеличение веса. Следует помнить, что самой целесообразной системой охлаждения являются естественно-конвективные системы охлаждения, так как не требуют дополнительной мощности на прокачку хладагента, не имеют движущихся деталей, надежные и бесшумные.

Электронное оборудование, разрабатываемое для бортовых систем самолетов, спутников и ракет, предполагает учет сложных форм мест крепления, малых габаритов при одновременном надежном обеспечении теплоотвода. Тип системы охлаждения электронных устройств и его надежность эксплуатации обычно определяется



уровнем коэффициента теплоотдачи и максимальной допустимой температуры устройства. Эти два параметра помогают выбрать метод охлаждения.

В настоящее время широко используются следующие типы систем охлаждения электронных устройств:

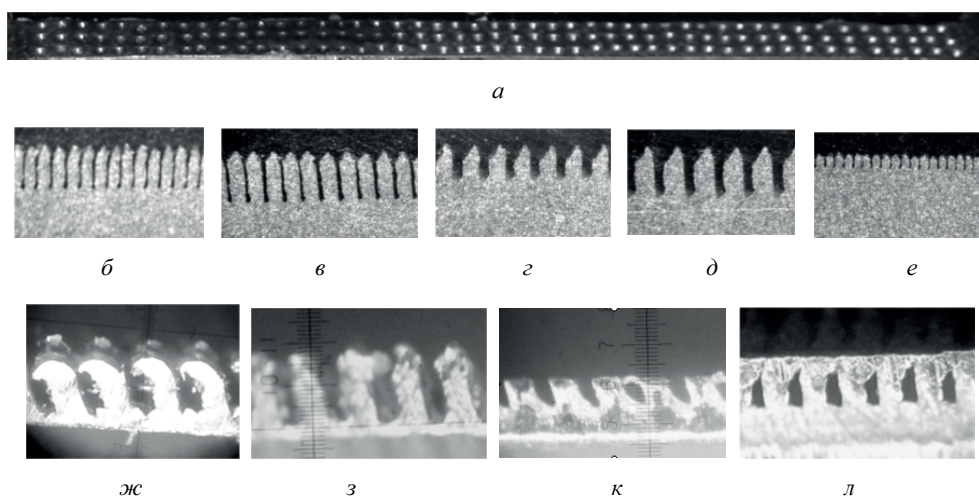
- 1) воздушная естественно конвективная система охлаждения и излучение;
- 2) воздушная принудительная система охлаждения;
- 3) иммерсия или свободно конвективное охлаждение при погружении в диэлектрические жидкости, в том числе криогенные или фреоны;
- 4) охлаждение при кипении в диэлектрической жидкости, в том числе при струйном охлаждении;
- 5) водяные принудительные системы охлаждения;
- 6) системы открытого испарения;
- 7) ватерчиллеры;
- 8) системы с использованием элементов Пельтье.

Разработка эффективных, надежных и компактных системы охлаждения типов 1–4 и 6 требует исследований повышения теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении различных жидкостей. Системы воздушного охлаждения типов 1 и 2 содержат тепловые трубы, которые позволяют отводить значительные тепловые потоки с малых поверхностей и транспортировать их в зоны, где нет ограничений для развития поверхности теплообмена при сбросе тепла в окружающую среду. Системы жидкостного и испарительного охлаждения типов 3, 4 и 6, так же как и области испарения тепловых труб, требуют значительного увеличения коэффициентов теплоотдачи для отвода больших удельных тепловых потоков с относительно малых площадей чипов. Решить задачу позволяет использование кипения жидкостей в системах охлаждения.

Повышение теплоотдачи от стенки к жидкости при кипении может быть достигнуто выбором соответствующей рабочей жидкости и формированием микроструктуры на поверхности теплообмена для повышения интенсивности образования и отрыва пузырьков.

Микроструктурированные поверхности — теплообменные поверхности, с полученными при их обработке и/или нанесении покрытий, мелкомасштабными деформациями, сопоставимыми по геометрическим параметрам с шероховатостью поверхности. В этом случае шероховатость поверхности мала для изменения интенсивности однофазной теплоотдачи. Такие поверхности используются, прежде всего, для процессов кипения. Разработка структурированных поверхностей для интенсификации процесса кипения основывается на основном правиле — создание большого количества центров парообразования или ловушек пузырьков пара на поверхности, что приводит к более раннему началу кипения или кипению при более низких температурных напорах [1–3]. В качестве микроструктурированных поверхностей для интенсификации процессов кипения могут быть использованы поверхности, полученные методом деформирующего резания (ДР), являющегося комбинацией подрезания и отгибки поверхностных слоев теплообменной поверхности.

Экспериментальные поверхности кипения обогревались путем непосредственно го пропускания тока. Исследования теплоотдачи проведено при кипении дистиллированной воды, 96 % этанола, 60 % водного раствора глицерина Д98, антифриза S11 и 0,05 % водного раствора  $Al_2O_3$ . Экспериментальные данные получены при атмосферном давлении 0,1 МПа. Тепловой поток изменялся в пределах 10...1200 кВт/м<sup>2</sup>. В исследуемом диапазоне плотности теплового потока наблюдались режимы конвекции, поверхностного и развитого пузырькового кипения, кризиса кипения. Исследования проводились при кипении насыщенных жидкостей.



**Рис. 1.** Внешний вид (сверху и шлифы) исследованных поверхностей кипения:

*а* — трехмерная шероховатость в виде сферических выемок; *б–е*, *з*, *к* — двумерная шероховатость в виде проводящих ребер; *ж* — трехмерная шероховатость в виде штырьковых рассеивающих ребер; *л* — двумерная шероховатость в виде микроканальной структуры

Проведенные эксперименты показали, что применение поверхностей с рельефом, полученным методом деформирующего резания, позволяет повысить интенсивность теплообмена при кипении по сравнению с гладкими образцами. Уровни интенсификации теплоотдачи определялись при  $q = idem$ .

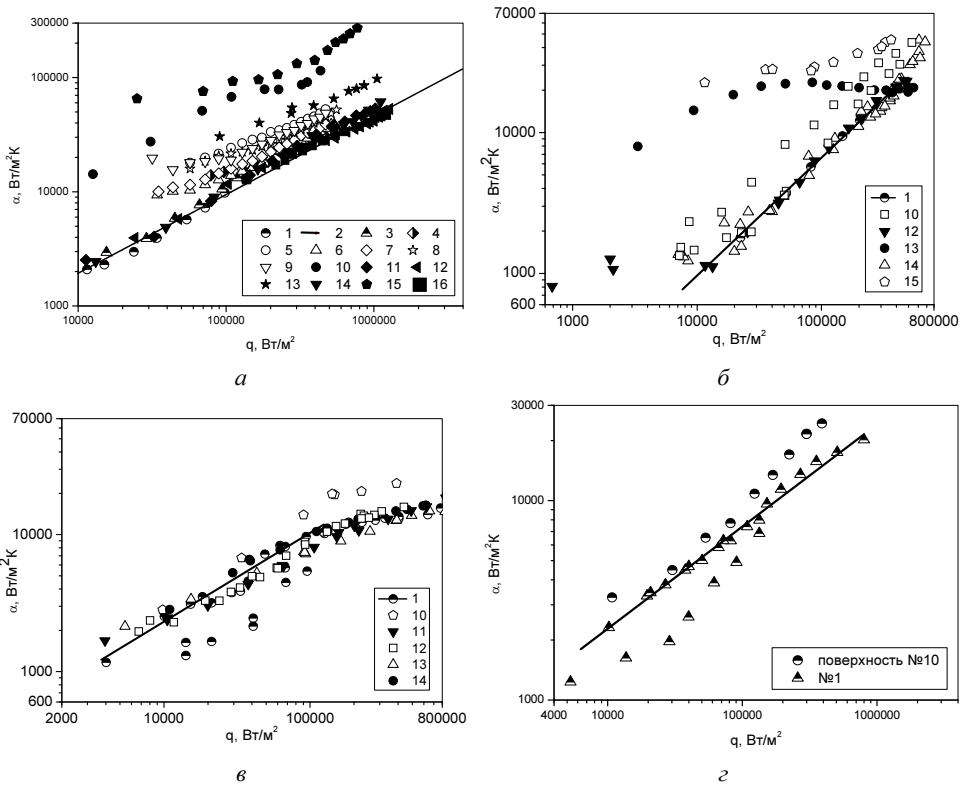
Таблица 1

**Параметры исследованных пластин**

Номер поверхности	Материал	Высота ребер <i>h</i> , мкм	Шаг ребер <i>s</i> , мкм	Межреберный зазор <i>b</i> , мкм	Угол наклона ребер к горизонтали, град	Глубина выемок, мм	Диаметр выемок, мм	Ширина канавки, мкм
1–2	12X18H9T	—	—	—	—	—	—	—
3	12X18H9T	—	—	—	—	1	2	—
4	12X18H9T	—	—	—	—	0,5	1	—
5	BT1-00	95	40	15	87	—	—	—
6	BT1-00	310	160	63	87	—	—	—
7	BT1-00	200	120	46	87	—	—	—
8	BT1-00	230	90	35	87	—	—	—
9	BT1-00	220	60	22	87	—	—	—
10	AISI 1020	420	350	—	90	—	—	140
11	12X18H10T	150	160	50	90	—	—	—
12	12X18H10T	90	160	50	90	—	—	—
13	BT1-00	200	200	30–40	60	—	—	—
14	12X18H10T	200	160	50	90	—	—	—
15	AISI 1020	340	240	—	75	—	—	140
16	12X18H10T	200	160	50	90	—	—	—

Наличие микрошероховатости позволяет достичь поставленные ранее задачи достижения более высоких коэффициентов теплоотдачи при заданной разности температур стенки и жидкости и начала пузырькового кипения при меньших разностях температур между горячей стенкой и жидкостью.

Наибольшая интенсификация теплоотдачи при кипении воды и 96 % этилового спирта свойственна поверхностям № 10 и 15 (табл. 1). Это поверхности с трехмерной столбчатой микрошероховатостью. Интенсификация теплоотдачи при кипении воды от 5 до 20 раз в зависимости от уровня плотности теплового потока и от 1,3 до 23 раз при кипении 96 % этилового спирта. Наличие малых межреберных зазоров обеспечивает подтекание жидкости к центрам парообразования, а значительные размеры поперечных канавок — выход пара. При кипении более вязкого 60 % водного раствора глицерина Д-98 интенсификация не превышала 1,1–3 раз.



**Рис. 2.** Теплоотдача при кипении в большом объеме различных жидкостей на поверхностях с различной геометрией:

*а* — дистиллированная вода; *б* — 96 % этилового спирта; *в* — 60 % водного раствора глицерина Д-98; *г* — антифриза S11

Также высокий уровень интенсификации теплоотдачи при кипении показала поверхность № 13 со сплошными ребрами, торцы которых загнуты горизонтально и образуют микроканалы. Данные поверхности близки по механизмам интенсификации к пористым покрытиям. Интенсификация теплоотдачи при кипении воды на

подобной поверхности составила 2,5–3 раза. При кипении 96 %-ного этилового спирта интенсификация достигала 10 раз, а при 60 %-ного водного раствора глицерина Д-98 — до 2 раз.

Как видно по рис. 2, лучшие данные по интенсивности теплоотдачи свойственны поверхностям со столбчатой структурой № 10 и 15. Для поверхности № 13 можно наблюдать «запаривание» пор под загнутыми ребрами, кипении на внешних сторонах ребер и свойственное распределение коэффициента теплоотдачи в зависимости от перегрева поверхности и плотности теплового потока. Особенно это видно при кипении 96 %-ного этилового спирта (рис. 2, б).

На основании анализа созданного массива данных установлено, что исследованные микрогеометрии поверхностей кипения более приемлемы для воды. Наибольшая интенсификация теплоотдачи при кипении воды свойственна поверхностям с трехмерными столбчатыми и канальными структурами — с 3 до 10 раз. Для двухмерных микроребер интенсификация теплообмена не превысила 2,5 раз. При этом уменьшение межреберного расстояния и толщины ребер увеличивают интенсивность теплообмена. Также отмечено, что начало пузырькового кипения на указанных микроструктурированных поверхностях наступает при значительно меньших разностях температур между горячей стенкой и жидкостью, например, для воды при  $\Delta t \approx 0,3 \dots 0,5$  °С по сравнению с гладкой поверхностью, где  $\Delta t \approx 4$  °С.

### Литература

- [1] Кузма-Кичта Ю.А., Москвин В.Н., Сорокин Д.Н. Исследование теплоотдачи при кипении воды на поверхности с пористым покрытием в широком диапазоне давлений. *Теплоэнергетика*, 1982, № 3, с. 53–54.
- [2] Диев М.Д., Соколова Т.В. Обработка экспериментальных данных по кипению в большом объеме на улучшенных поверхностях кипения в координатах С. С. Кутателадзе // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: *Тр. 16 Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева*, Санкт-Петербург, 21–25 мая, 2007, т. 1. Москва, МЭИ. 2007, с. 407–410.
- [3] Попов И.А., Зубков Н.Н., Каськов С.И., Щелчков А.В. Теплообмен при кипении жидкости на микроструктурированных поверхностях. Ч. 1. Теплоотдача при кипении воды. *Теплоэнергетика*, 2013, № 3, с. 3–11.

УДК 628.161

## Энерго- и ресурсосбережение при водоподготовке плавательных бассейнов

© Беляев Андрей Николаевич, Лысов Дмитрий Сергеевич,  
Флегентов Игорь Владимирович

Россия, г. Киров, Вятский государственный университет

[belyaev71@list.ru](mailto:belyaev71@list.ru), [siitop@rambler.ru](mailto:siitop@rambler.ru), [flegentov@vyatsu.ru](mailto:flegentov@vyatsu.ru)

*Рассмотрены вопросы энергоэффективности, снижения материальных затрат при водоподготовке плавательных бассейнов. Приведены схемы существующей циркуляционной системы водоподготовки и ее недостатки, а также предлагаемой авторами интегрированной системы, основанной на высокоинтенсивной гидродинамической обработке водной среды с одновременным разрушением посредством кавитационной эрозии серебряных и медных образцов. Представлены энергетические диаграммы и перспективы использования гидродинамической кавитации для водоподготовки бассейна.*

**Ключевые слова:** *энергозатраты, водоподготовка, плавательный бассейн, гидродинамическая кавитация, серебрение.*

Вопросы энергоэффективности и ресурсосбережения с каждым годом приобретают все большую актуальность. Поиск их решения в различных технологиях во многом одинаковый, а рациональное сочетание всегда дает высокий результат.

Существующие циркуляционные системы водоподготовки плавательных бассейнов решают три основные задачи: очистка, обеззараживание и подогрев воды. Каждая задача реализуется определенными техническими решениями, обеспечиваемые материальными и/или энергетическими ресурсами.

Одно из направлений энерго- и ресурсосбережения при водоподготовке — интеграция процессов подогрева и дезинфекционной обработки воды, основой которого является технология высокоинтенсивной гидродинамической обработки водной среды с одновременным разрушением посредством кавитационной эрозии серебряных и медных образцов. Данные металлы характеризуются олигодинамическим действием и при совместном использовании проявляют синергетический эффект. В настоящее

время технология использования серебра и меди для водоподготовки плавательных бассейнов достаточно популярна в ведущих европейских странах. Одним из крупнейших лидеров на этом рынке является немецкая компания NECON\*. Однако в этой технологии используется электролиз, являющийся источником активных ионов металлов. Основным недостатком этой технологии — отсутствие пролонгации действия — ионы активно взаимодействуют с клетками микроорганизмов и примесями, находящимися в воде. В процессе же кавитационной эрозии образуется тонкодисперсная суспензия металлов. В отличие от гальванических процессов, полученные частицы имеют единичную массу обладают более пролонгированным действием и способны служить дополнительным источником ионизации при бактерицидной обработке воды. Посредством электронной микроскопии удалось установить размер образующихся частиц: для серебра — 2...3 мкм, для меди — 1...2 мкм [1]. Кроме олигодинамического действия в процессе кавитационной обработкой происходит повышение эффекта обеззараживания, обусловленного разрушением защитных барьеров клеток микроорганизмов [2].

Основным показателем при оценке олигодинамического действия металлов, влияющим на эффективность процесса, является площадь поверхности образующихся частиц. Полученные данные позволяют определить удельную площадь межфазной поверхности, приведенную к массе металла, которая составит до 30 000 см<sup>2</sup>/г для серебра и до 70 000 см<sup>2</sup>/г для меди.

Схемы водоподготовки с использованием традиционной и предлагаемой технологий представлены на рис. 1.

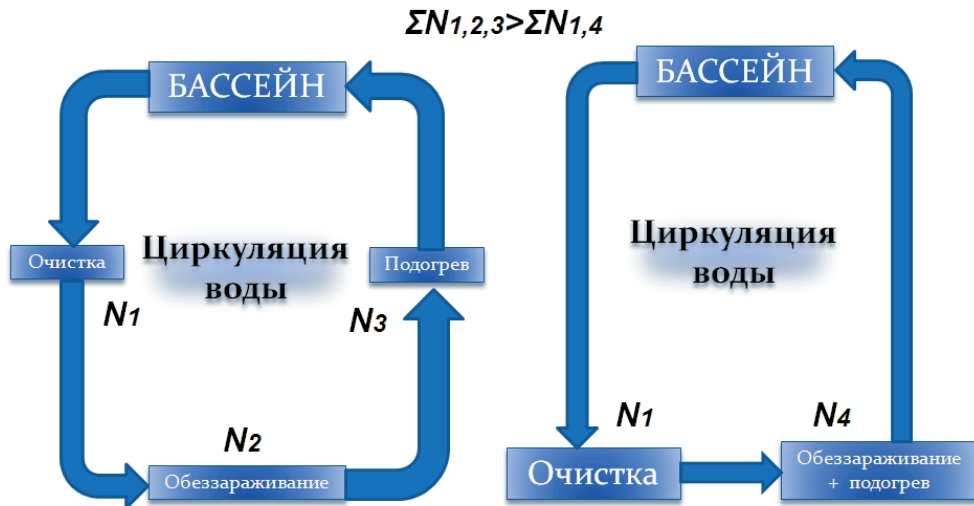


Рис. 1. Схемы обработки воды плавательного бассейна:

*a* — традиционная; *б* — предлагаемая;  $N_i$  ресурсные затраты на осуществление соответствующего *i*-го процесса

Суммарные затраты в новой схеме снижены на 20...60 %. Коэффициент полезного действия установки превышает 90 %. На рис. 2 представлены доли энергетиче-

\* URL: <http://www.necon.de>

ских составляющих, затрачиваемых на кавитационную эрозию и на тепловую мощность (нагрев) при суммарных затратах в 11,5 кВт.

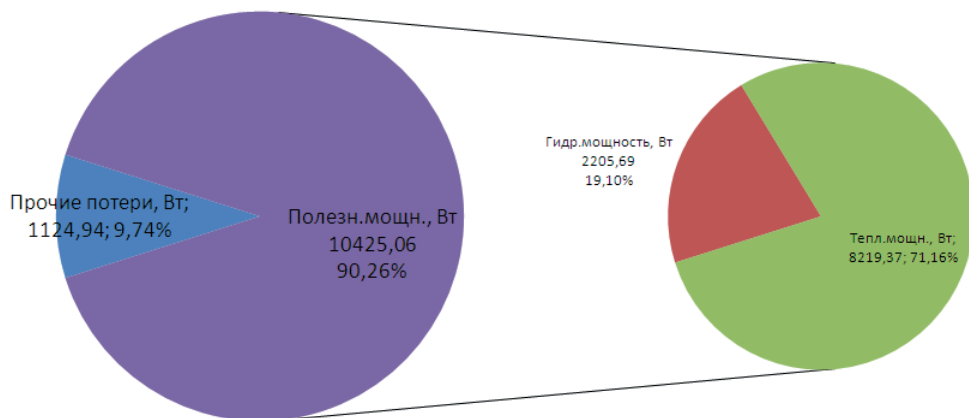


Рис. 2. Диаграмма энергетических составляющих

Процессы, протекающие при гидродинамической кавитации, связаны с образованием на локальном участке гидродинамической системы импульсных давлений до 1 500 МПа, обуславливающих увеличение температурного градиента в локальных областях с образованием высокотемпературных зон со значениями, доходящими до 2 000 °С [3]. Исследования различных конструкций кавитационных реакторов позволили выделить устройство, позволяющее добиться бóльшей динамики нагрева воды — 7,85 °С/(ч · м<sup>3</sup>) [4]. Работы по увеличению этого показателя продолжаются.

Полученные данные явились основой создания новой установки для обработки воды плавательных бассейнов. При этом кавитационный реактор включается в циркуляционную сеть до фильтрационной очистки, а получаемые с его помощью частицы остаются в загрузке фильтра. С течением времени количества частиц становится достаточным для обеспечения надежной бактерицидной обработки бассейна. Наличие в системе водоподготовки бассейна циркуляционного насоса позволяет подобрать его параметры и увязать их с интенсивностью кавитационных процессов, минимизировав при этом затраты на оборудование. В настоящее время установка проходит промышленную апробацию.

### Литература

- [1] Гимранов Ф.М., Беляев А.Н., Флегентов И.В., Куц Е.В. Перспективы использования кавитационной эрозии в получении водных суспензий металлов. *Вестник Казанского технологического университета*, 2014, т. 17, № 23, с. 65–68.
- [2] Беляев А.Н., Флегентов И.В. Гидродинамическая кавитационная обработка как инструмент интенсификации реагентных процессов в промышленных технологиях. *Журнал прикладной химии*, 2014, т. 87, № 8, с. 1092–1100.
- [3] Кнепп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. *Кавитация*. Москва, Мир, 1974, 687 с.
- [4] Гимранов Ф.М., Беляев А.Н., Флегентов И.В., Куц Е.В. Использование кавитационной обработки при снижении содержания кремния в питьевой воде. *Вестник Казанского технологического университета*, 2014, т. 17, № 23, с. 65–68.

## Исследование влияния количества топлива в предварительных порциях на экономические и экологические показатели автомобильного дизеля

© Гордеев Александр Владимирович<sup>1,2</sup>, Хайруллин Азат Хативович<sup>1,2</sup>,  
Хасанов Раиль Рауфович<sup>1,2</sup>, Гуреев Виктор Михайлович<sup>1</sup>,  
Никишин Вячеслав Николаевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

<sup>2</sup> Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский федеральный университет

[al.gor05@yandex.ru](mailto:al.gor05@yandex.ru), [azat-meh@mail.ru](mailto:azat-meh@mail.ru), [qazan7@yandex.ru](mailto:qazan7@yandex.ru)

*Представлены результаты исследования влияния параметров топливоподающей аппаратуры при реализации трехстадийного закона топливоподдачи на экономические и экологические показатели автомобильного дизеля. Установлено влияние количества топлива в предварительной порции топлива и угла поддачи на удельный эффективный расход топлива  $g_e$  и эмиссию оксидов азота  $NO_x$  в отработавших газах дизеля.*

**Ключевые слова:** токсичность ДВС, отработавшие газы, закон топливоподдачи, предварительная порция топлива, угол поддачи топлива, эмиссия оксидов азота  $NO_x$ .

Увеличение количества транспортных средств, оснащенных двигателями внутреннего сгорания (ДВС) обуславливает необходимость постоянного ужесточения законодательства, ограничивающего выбросы вредных веществ в отработавших газах (ОГ) ДВС таких компонентов, как оксиды азота  $NO_x$ , оксид углерода CO, углеводороды СН и дисперсные частицы РТ, при условии обеспечения низких эксплуатационных затрат. В первую очередь, требуется снижение концентрации  $NO_x$  в ОГ при условии сохранения приемлемого удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ . Следует отметить, что решение задачи повышения эффективных показателей и снижения концентрации нормируемых токсичных компонентов  $NO_x$ , СН, СО и РТ в соответствии с правилами № 24 и 49 ЕЭК ООН в ОГ ДВС является компромиссным. Сложность решения данной задачи заключается в том, что автомобильный ДВС эксплуатируются в широком диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала (КВ). Практика показывает, что снижение  $NO_x$  при сохранении приемлемого значения  $g_e$  представляет определенную сложность. Исследования [1] доказали, что  $NO_x$  в дизелях образуется в течение первой фазы сгорания, причем более половины — в зоне быстрого выгорания гомогенной топливно-воздушной смеси (ТВС), подготовленной в период задержки воспламенения топлива (ПЗВТ) [2]. Скорость образования  $NO_x$  в двигателях с непосредственным впрыском топлива напрямую зависит от длительности ПЗВТ [2]. В работах [1–3] определен принцип организации оптимального дизельного процесса с точки зрения достижения наилучшего соотношения между топливной экономичностью и выбросами  $NO_x$ , согласно которому необходимо стремиться полу-



чить в период сгорания максимальные среднемассовые температуры в цилиндре при минимальной неравномерности температурного поля. Исходя из этого, основная причина значительного выхода  $\text{NO}_x$  в дизелях заключается в неравномерности температурного поля в процессе сгорания.

Важнейшим мероприятием позволяющее повысить качество рабочего процесса является определение оптимальных значений параметров ТПА. Известно, что условия протекания процессов смесеобразования и горения ТВС в цилиндре при реализации многостадийного закона топливоподачи (МЗТ) по сравнению со сгоранием при однократном впрыске существенно отличаются. При реализации МЗТ ПЗВТ предварительной порции (ПП) топлива протекания процессов смесеобразования и горения ТВС в цилиндре зависит от температуры и концентрации реагентов, для последующих порций топлива добавляется еще два фактора — несгоревшие пары топлива и продукты сгорания предыдущих порций. Таким образом, процесс тепловыделения при сгорании первой и последующих порций топлива протекает с разным физико-химическим механизмом. Исходя из этого, необходимо обеспечить воспламенения ПП топлива до начала воспламенения основной, так как за ПЗВТ может накопиться большое количество горючей смеси, что приведет к увеличению скорости нарастания давления, и, следовательно, шума процесса сгорания [4]. Таким образом, каждому значению ПП соответствует оптимальное значение угла начала топливоподачи и временного интервала между порциями. При увеличенном интервале между порциями топлива, продукты сгорания ПП успевают перераспределиться в объеме КС, что является положительным фактором с точки зрения снижения неравномерности температурного поля. При малых временных интервалах между стадиями, когда основная порция топлива поступает в продукты сгорания ПП или обогащенную ТВС, температура не успевает заметно повыситься и в большей степени на процесс сгорания влияет нехватка кислорода. Это приводит к тому, что ПЗВТ увеличивается и скорость нарастания давления становится примерно такой же, как при однократном впрыскивании [4]. Если снижение температуры газов в цилиндре оказывается более существенным, чем при снижении концентрации кислорода, то ПЗВТ сокращается, что приводит к уменьшению скорости нарастания давления в цилиндре в процессе горения [4].

Целью работы является экспериментальное исследование влияния угла начала топливоподачи, массовой доли ПП при реализации трехстадийного закона топливоподачи (рис. 1) на выбросы  $\text{NO}_x$  с ОГ и  $g_e$  при частоте вращения КВ  $1\ 250\ \text{мин}^{-1}$  при нагрузке 25, 50, 75 и 100 %, данный режим выбран исходя из того, что эти режимы работы двигателя наиболее близки к эксплуатационным.

Объектом исследования является поршневой четырехтактный 8-цилиндровый дизель V8ЧН 12/13, оснащенный газотурбинным наддувом, промежуточным охлаждением надувочного воздуха и аккумуляторной системой топливоподачи типа Common Rail рабочим объемом  $iV_h = 11,76$  л и номинальной мощностью  $N_e = 338,5$  кВт при частоте вращения КВ  $1\ 900\ \text{мин}^{-1}$ .

Анализ полученных результатов показал, существенное влияние настройки системы ТПА на  $g_e$  и эмиссию  $\text{NO}_x$  в ОГ (рис. 2). Следует отметить, что характер протекания изменения  $g_e$  и эмиссии  $\text{NO}_x$  в ОГ в зависимости от изменения нагрузки на двигатель существенно не изменяется. Увеличение количества в ПП топлива и угла начала топливоподачи в цилиндр приводит к снижению  $g_e$  на 2...20 % в зависимости от режима работы двигателя, но при этом увеличиваются выбросы  $\text{NO}_x$  в ОГ до 30 % за счет того, что увеличение количество топлива обуславливает повышение давления

и температуры газов в процессе сгорания ТВС. Снижение значения угла начала топливоподачи в цилиндр приводит к увеличению продолжительности процесса сгорания, переносит процесс активного тепловыделения на такт расширения, вследствие чего увеличиваются тепловые потери в систему охлаждения, снижается давление и температура газов в процессе сгорания. В результате этого существенно возрастает  $g_e$  и снижается эмиссия  $\text{NO}_x$  в ОГ.

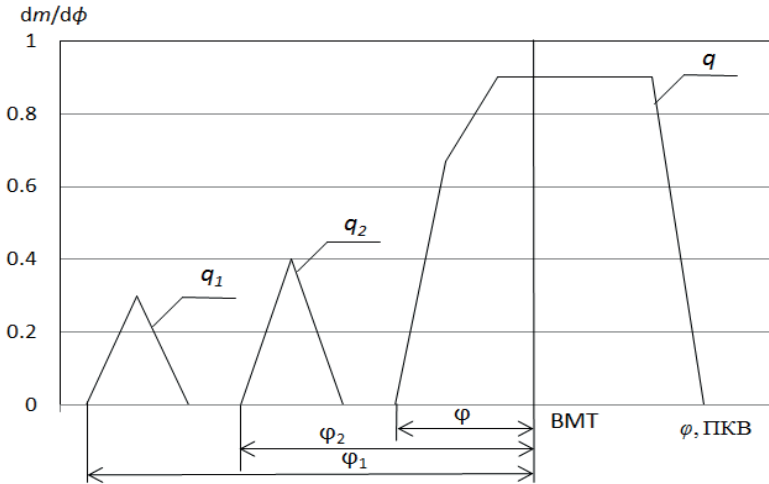
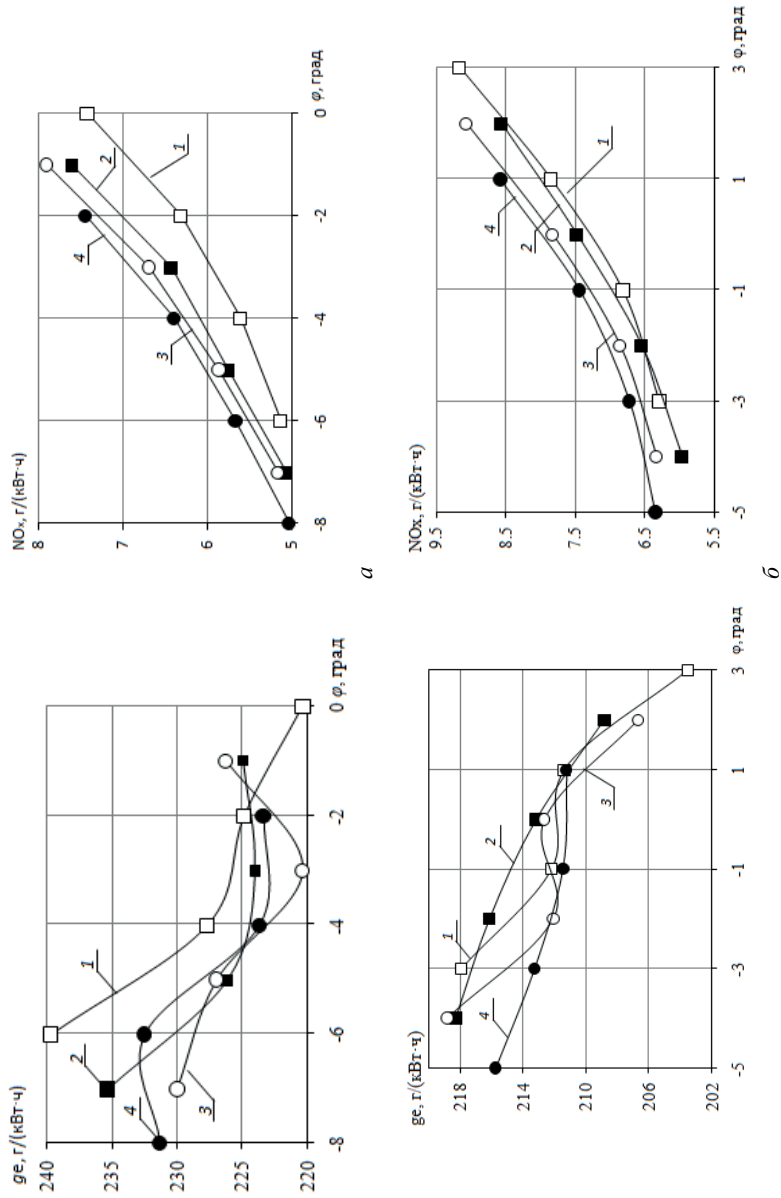
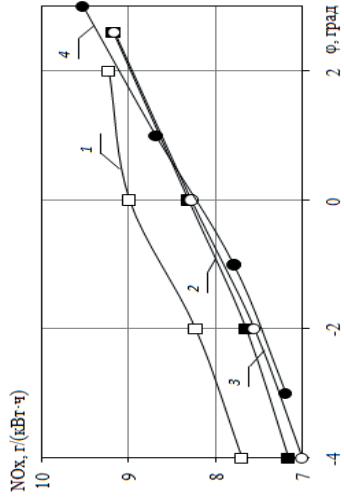
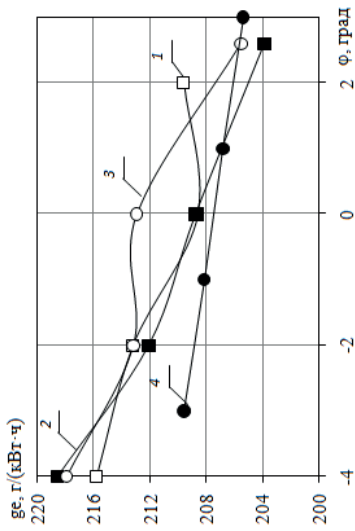


Рис. 1. Закон топливоподачи с двумя предварительными порциями топлива

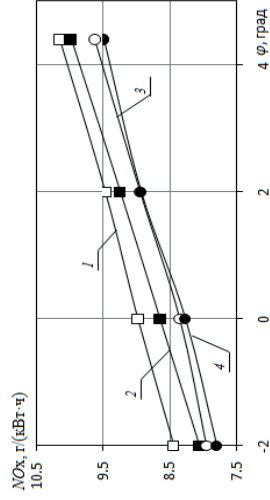
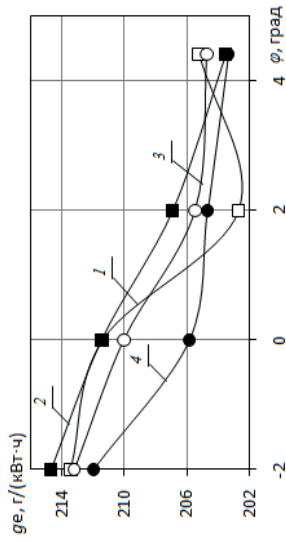
Анализ полученных результатов показал существенное влияние настройки системы ТПА на  $g_e$  и эмиссию  $\text{NO}_x$  в ОГ. Следует отметить, что характер протекания изменения  $g_e$  и эмиссии  $\text{NO}_x$  в ОГ в зависимости от изменения нагрузки на двигатель существенно не изменяется. Увеличение количества в предварительных порциях и угла начала топливоподачи в цилиндр приводит к снижению  $g_e$  на 2...20 % в зависимости от режима работы двигателя, но при этом увеличиваются выбросы  $\text{NO}_x$  в ОГ до 30 % за счет того, что увеличение количество топлива приводит к повышению давления и температуры газов в процессе сгорания ТВС. Снижение значения угла начала топливоподачи в цилиндр приводит к увеличению продолжительности процесса сгорания, переносит процесс активного тепловыделения на такт расширения и тем самым увеличиваются тепловые потери в систему охлаждения, снижается давление и температура газов в процессе сгорания. В результате этого существенно возрастает  $g_e$  и снижается эмиссия  $\text{NO}_x$  в ОГ.



**Рис. 2 (начало).** Зависимость удельного эффективного расхода топлива и эмиссии  $\text{NO}_x$  в ОГ от угла подачи топлива и количества топлива в предварительных порциях:  
 а — нагрузка 25 %, 1 —  $q_1 = 7\%$ ,  $q_2 = 9\%$ ; 2 —  $q_1 = 7\%$ ,  $q_2 = 15\%$ ; 3 —  $q_1 = 7\%$ ,  $q_2 = 27\%$ ; 4 —  $q_1 = 7\%$ ,  $q_2 = 37\%$ ; б — нагрузка 50 %, 1 —  $q_1 = 4\%$ ,  $q_2 = 5\%$ ; 2 —  $q_1 = 4\%$ ,  $q_2 = 10\%$ ; 3 —  $q_1 = 4\%$ ,  $q_2 = 14\%$ ; 4 —  $q_1 = 4\%$ ,  $q_2 = 18\%$



6



2

**Рис. 2 (окончание).** Зависимость удельного эффективного расхода топлива и эмиссии  $\text{NO}_x$  в ОГ от угла подачи топлива и количества топлива в предварительных порциях:  
 $\nu$  — нагрузка 75 %, 1 —  $q_1 = 3\%$ ,  $q_2 = 3,5\%$ ; 2 —  $q_1 = 3\%$ ,  $q_2 = 6,6\%$ ; 3 —  $q_1 = 3\%$ ,  $q_2 = 10\%$ ; 4 —  $q_1 = 3\%$ ,  $q_2 = 13\%$ ;  $\nu$  — нагрузка 100 %, 1 —  $q_1 = 2\%$ ,  $q_2 = 2,6\%$ ; 2 —  $q_1 = 2\%$ ,  $q_2 = 5\%$ ; 3 —  $q_1 = 2\%$ ,  $q_2 = 8\%$ ; 4 —  $q_1 = 2\%$ ,  $q_2 = 10\%$

## Литература

- [1] Семенов Б.Н., Смайлис В.И., Быков В.Ю., Липчук В.А. Возможности со-кращения выброса окислов азота с отработавшими газами быстроходного форсированного дизеля при сохранении высокой топливной экономичности. *Двигателестроение*, 1986, № 9, с. 3–6.
- [2] Смайлис В.И. Современное состояние и новые проблемы экологии дизелестроения. *Двигателестроение*, 1991, № 1, с. 3–6.
- [3] Смайлис В.И. О связи между эффективным КПД дизеля и выходом окислов азота с его отработавшими газами. *Энергомашиностроение*, 1976, № 8, с. 43–45.
- [4] Кавтарадзе Р.З. *Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учеб. пособие для вузов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 472 с.

УДК 621.436

## Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами дизеля за счет применения системы рециркуляции отработавших газов

© Гордеев Александр Владимирович<sup>1,2</sup>, Хайруллин Азат Хативович<sup>1,2</sup>,  
Хасанов Раиль Рауфович<sup>1,2</sup>, Гуреев Виктор Михайлович<sup>1</sup>,  
Никишин Вячеслав Николаевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

<sup>2</sup>Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский федеральный университет

[al.gor05@yandex.ru](mailto:al.gor05@yandex.ru), [azat-meh@mail.ru](mailto:azat-meh@mail.ru), [qazan7@yandex.ru](mailto:qazan7@yandex.ru)

*Ужесточение международных стандартов, регламентирующие выбросы вредных веществ с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также требования потребителей по топливной экономичности требуют проведения исследовательских работ по совершенствованию рабочего процесса и конструкции ДВС.*

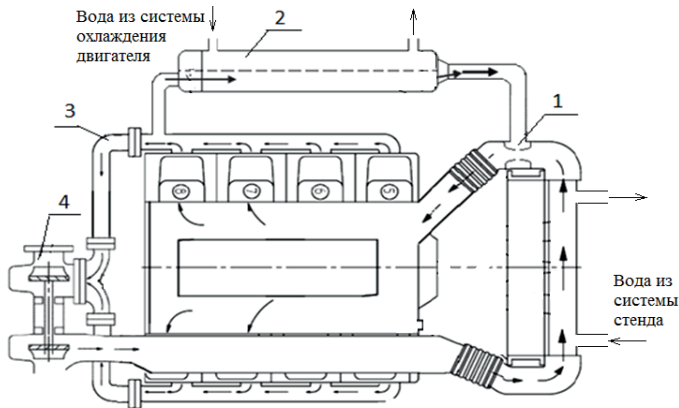
**Ключевые слова:** дизель, отработавшие газы, система рециркуляции, оксиды азота NO<sub>x</sub>.

Решение задачи повышения эффективных показателей и снижения концентрации нормируемых токсичных компонентов (оксиды азота NO<sub>x</sub>, углеводороды СН, оксид углерода СО и дисперсные частицы РМ), в отработавших газах (ОГ) ДВС является компромиссным. Сложность решения данной задачи заключается в том, что транспортные ДВС эксплуатируются в широком диапазоне изменения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала. Как правило, условия снижения выбросов NO<sub>x</sub>, СН и РМ в ОГ и удельного расхода топлива  $g_e$  противоположны.

Цель исследования — влияние рециркуляции ОГ на концентрацию оксидов азота NO<sub>x</sub> в ОГ и экономические показатели дизеля в условиях моторного стенда. Исследования проводились при работе дизеля по внешней скоростной характеристике (ВСХ).

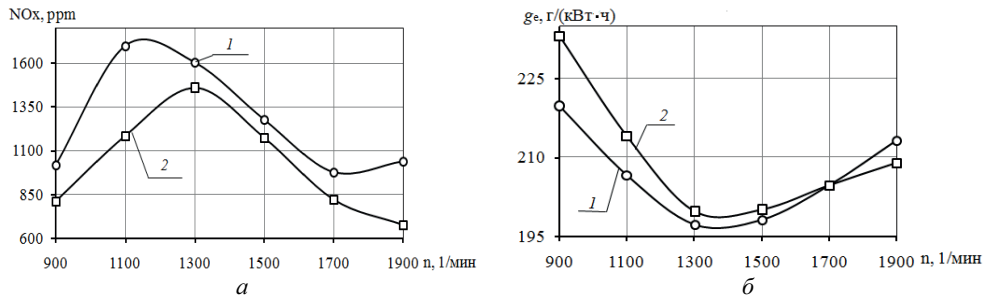
Объектом исследования являлся поршневой четырехтактный 8-цилиндровый дизель V8ЧН 12/13, оснащенный газотурбинным наддувом, промежуточным охлаждением надвучного воздуха и аккумуляторной системой топливоподачи типа Common Rail рабочим объемом  $iV_h = 11,76$  л и номинальной мощностью  $N_e = 338,5$  кВт при частоте вращения КВ  $1\,900$  мин<sup>-1</sup>.

Для проведения экспериментальных исследований выбрана схема, представленная на рис. 1. Отбор ОГ проводился из правого выпускного коллектора с последующим охлаждением в теплообменнике. Подача ОГ во впускной коллектор осуществлялась после охладителя надвучного воздуха с помощью специального смесителя. Подвод воды к теплообменнику производился из внутреннего контура системы охлаждения двигателя, температура воды при этом составляла 80...85 °С. Следует отметить высокую эффективность теплообменника ОГ ( $E$ ) на всех режимах (не менее 95 %) и невысокую степень рециркуляции ОГ ( $R$ ), которая существенно снижается с увеличением нагрузки, максимальное значение его составило 9 %.



**Рис. 1.** Схема системы рециркуляции:  
1 — смеситель; 2 — радиатор; 3 — выпускной коллектор; 4 — турбокомпрессор

Анализ полученных результатов показал снижение концентрации  $\text{NO}_x$  в ОГ на 15...30 % и увеличении удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  до 6 %, в зависимости от режима работы двигателя (рис. 2).



**Рис. 2.** Влияние РОГ при работе двигателя по ВСХ:  
 $a$  — на концентрацию  $\text{NO}_x$  в ОГ;  $b$  — на удельный эффективный расход топлива  $g_e$ ; 1 — без рециркуляции ОГ; 2 — с рециркуляцией ОГ

Таким образом, установлено влияние РОГ на концентрацию  $\text{NO}_x$  в ОГ и удельный эффективный расход топлива  $g_e$  по ВСХ. Выбранная схема системы РОГ не позволяет обеспечивать степень рециркуляции на уровне 20 %. В связи с этим рекомендуется, проводить отбор с левого и правого выпускных коллекторов с применением турбокомпрессора с регулируемым сопловым аппаратами турбины. Применение данной схемы системы рециркуляции ОГ позволит регулировать и обеспечивать необходимую степень рециркуляции ОГ во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимах работы двигателя.

### Литература

- [1] Семенов Б.Н., Смайлис В.И., Быков В.Ю., Липчук В.А. Возможности сокращения выброса окислов азота с отработавшими газами быстрого форсированного дизеля при сохранении высокой топливной экономичности. *Двигателестроение*, 1986, № 9, с. 3–6.
- [2] Смайлис В.И. *Малотоксичные дизели*. Ленинград, Машиностроение, 1974, 126 с.
- Смайлис В.И. Современное состояние и новые проблемы экологии дизелестроения. *Двигателестроение*, 1991, № 1, с. 3–6.

УДК 621.43

## Разработка эмпирической модели расчета концентрации оксидов азота при сгорании бензоводородовоздушной смеси в двигателе с искровым зажиганием

© Дерячев Александр Дмитриевич, Шайкин Александр Петрович

Россия, Самарская обл., г. Тольятти, Тольяттинский государственный университет

[proscripts@mail.ru](mailto:proscripts@mail.ru)

*На основе результатов эксперимента проведен анализ основных параметров сгорания, определяющих выбросы окислов азота при добавках водорода в топливно-воздушную смесь. Представлена эмпирическая модель расчета концентрации оксидов азота на базе безразмерного комплекса параметров сгорания, учитывающих режимные и регулировочные параметры работы двигателя.*

**Ключевые слова:** датчик ионизации, оксиды азота, время сгорания, основная фаза сгорания, угол опережения зажигания, коэффициент избытка воздуха.

Оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) — определяющие реагенты в образовании фотохимического смога. Основные методы снижения  $\text{NO}_x$  в отработавших газах (ОГ) поршневых двигателей, такие как рециркуляция и нейтрализация ОГ, уменьшают экономические и мощностные показатели работы двигателя. Одним из перспективных направлений снижения оксидов азота в поршневом двигателе с искровым зажиганием является воздействие на параметры сгорания, т. е. непосредственно на причины образования  $\text{NO}_x$ , а не воздействие на выхлопные газы.

Известно, что максимум концентрации оксидов азота располагается в области некоторого обеднения смеси ( $\alpha \approx 1,1$ ) вследствие оптимальных условий для образования  $\text{NO}_x$ . Одно из основных направлений снижения оксидов азота — организация устойчивого горения топливно-воздушной смеси (ТВС) на бедных смесях ( $\alpha > 1,3$ ), где концентрация оксидов азота мала. Установлено, что перспективным направлением для этой цели является использование микродобавок водорода в ТВС, при этом в значительной степени расширяются пределы воспламенения смеси [1, 2]. Однако до сих пор недостаточно изучены механизмы влияния добавок водорода в ТВС на процесс сгорания и образование токсичных веществ.

Анализ термической теории Я.Б. Зельдовича показывает, что основными факторами образования оксидов азота в ОГ ДВС с искровым зажиганием являются высокая температура, атомарный кислород и время пребывания азота и кислорода в зоне высоких температур [3].

Современные программы рассчитывают выбросы оксидов азота в ОГ на основе термического механизма Я.Б. Зельдовича, используя сложные многозонные модели и схемы, что позволяет учитывать теплообмен и химическую кинетику горения в каждой зоне камеры сгорания (КС). Однако для двигателей, работающих на альтернативном виде топлива, расчеты по таким моделям дают неприемлемые результаты, которые могут отличаться от экспериментальных более чем в 3 раза [4]. Это свидетельствует о недостаточном понимании влияния водорода на химическую кинетику процесса сгорания. Поэтому необходимы дополнительные исследования для разработки моделей расчета концентрации оксидов азота, применимых для двигателей с альтернативным видом топлива, в частности, с добавками водорода в ТВС.

Для решения поставленной задачи проведен эксперимент на одноцилиндровой установке УИТ-85. Динамическое изменение индикаторного давления в КС регистрировалось датчиком Kistler. Для экспериментального определения скорости и ширины зоны турбулентного горения использовалось явление электропроводности углеводородного пламени. В КС в удаленной от свечи зажигания зоне устанавливался двухэлектродный ионизационный датчик (ИД), регистрирующий ионный ток при прохождении пламени через электроды датчика. Схема установки датчиков в камере сгорания УИТ-85 показана на рис. 1.

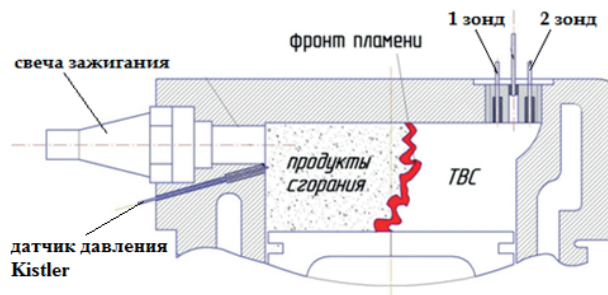


Рис. 1. Камера сгорания УИТ-85 с установленными датчиками

Средняя скорость распространения пламени и ширина зоны турбулентного горения (ЗТГ) определялись по формулам:

$$U_{\text{ср}} = \frac{L_1}{\tau_1};$$

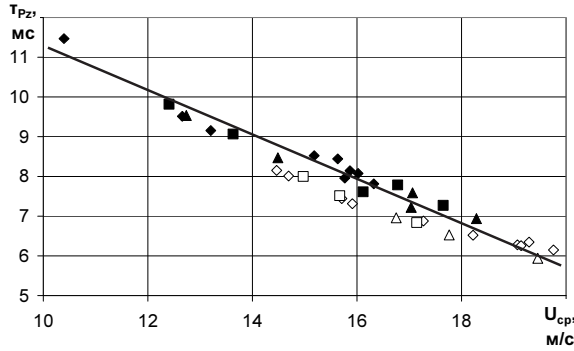


$$\delta_{зтг} = U_{1-2} \cdot \tau_i - D_{эл},$$

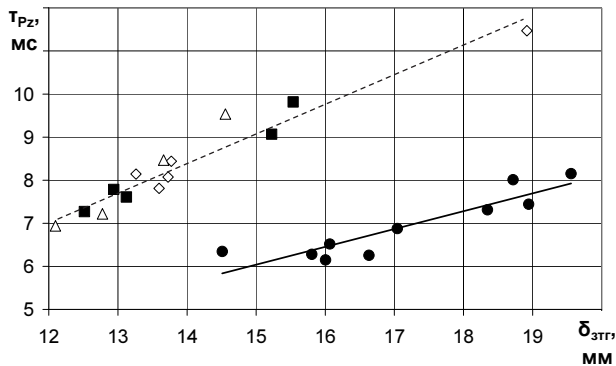
где  $L_1$  — расстояние от свечи зажигания до 1-го электрода ИД;  $\tau_1$  — время возникновения ионного тока у 1-го электрода ИД;  $U_{1-2}$  — местная скорость распространения пламени у электродов ИД;  $L_{1-2}$  — расстояние между электродами ИЗ, м;  $\tau_{1-2}$  — разница времени возникновения ионного тока у электродов ИД, с.;  $\Delta\tau_i$  — разность времени ухода пламени и прихода пламени к  $i$ -тому электроду ИД, т. е. продолжительность существования ионного тока на электроде датчика,  $D_{эл}$  — диаметр электрода ИД.

Зависимости средней скорости распространения пламени и ширины зоны турбулентного горения от состава топливно-воздушной смеси при различной частоте вращения коленчатого вала и доле добавляемого водорода представлены в работе [5].

Зависимости продолжительности основной фазы сгорания от средней скорости распространения пламени и ширины зоны турбулентного горения приведены на рис. 2 и 3.



**Рис. 2.** Зависимость продолжительности основной фазы сгорания от средней скорости распространения пламени:  
 $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{H_2}$ :  $\blacklozenge$  — 0%;  $\blacksquare$  — 3%;  $\blacktriangle$  — 5%;  
 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{H_2}$ :  $\diamond$  — 0%;  $\square$  — 3%;  $\triangle$  — 5%



**Рис. 3.** Зависимость продолжительности основной фазы сгорания от ширины зоны турбулентного горения:  
 $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{H_2}$ :  $\diamond$  — 0%;  $\blacksquare$  — 3%;  $\triangle$  — 5%;  
 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{H_2}$ :  $\bullet$  — 0%

Продолжительность основной фазы сгорания линейно зависит от средней скорости распространения пламени (см. рис. 2). При этом при различной добавке водорода и частоте вращения коленчатого вала все экспериментальные точки располагаются на одной прямой.

Увеличение ширины ЗТГ приводит к росту продолжительности основной фазы сгорания (см. рис. 3). При этом независимо от добавок водорода в ТВС все экспериментальные точки попадают на соответствующую прямую линию для каждого исследуемого скоростного режима.

Таким образом, экспериментально показано влияние скорости распространения пламени и ширины ЗТГ на продолжительность основной фазы сгорания.

Согласно термическому механизму Я.Б. Зельдовича [3], концентрация оксидов азота зависит от концентрации кислорода, температуры продуктов сгорания и времени пребывания азота и кислорода в зоне высокой температуры. Температура продуктов сгорания обратно пропорциональна коэффициенту избытка воздуха в степени  $k$ , определяемой экспериментально:

$$T_{п.с} \sim \frac{1}{\alpha^k}.$$

Положение и значение максимальной температуры также определяется углом опережения зажигания и объемом продуктов сгорания в момент окончания основной фазы сгорания:

$$T_{п.с \max} \sim \theta_{0,3}; \quad T_{п.с \max} \sim V_a - V_{Pz},$$

где  $V_a$  — полный объем цилиндра, см<sup>3</sup>;  $\theta_{0,3}$  — угол опережения зажигания, град.

Время пребывания азота и кислорода в зоне высоких температур определяется продолжительностью основной фазы сгорания:

$$\tau_{\text{преб}} \sim \tau_{\text{сг}} \sim \tau_{Pz}.$$

Концентрация оксидов азота прямо пропорциональна атомарному кислороду в степени 0,5, определяемой коэффициентом избытка воздуха. Следовательно,

$$[\text{NO}_x] \sim [\text{O}]^{0,5} \sim \alpha^{0,5}.$$

Рассмотрев факторы, влияющие на температуру, количество свободного кислорода и располагаемое время процесса сгорания, получаем

$$[\text{NO}_x] \sim \frac{\alpha^{0,5}}{\alpha^k}; \tau_{Pz}; \theta_{0,3}; (V_a - V_{Pz}).$$

Введем параметр

$$K = f \left[ \frac{\alpha^{0,5}}{\alpha^k}; \tau_{Pz}; \theta_{0,3}; (V_a - V_{Pz}) \right].$$

По экспериментальным данным была получена эмпирическая зависимость безразмерного комплекса параметров  $K$ :

$$K = \frac{1}{\alpha^{2/3}} \left( \frac{\tau_{180} - \tau_{Pz}}{\tau_{180}} \right) \left( \frac{180 - \theta_{0,3}}{180} \right) \left( \frac{V_a - V_{Pz}}{V_a} \right),$$

где  $\tau_{180}$  — время, за которое поршень достигает нижнюю мертвую точку (НМТ) от верхней мертвой точки (ВМТ), с;  $\tau_{Pz}$  — время окончания сгорания (от ВМТ), с;  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха;  $V_{Pz}$  — объем смеси при максимуме давления цикла, см<sup>3</sup>.

Известно, что при добавлении водорода в топливно-воздушную смесь растет максимальная температура сгорания. Температура сгорания, в свою очередь, зависит от продолжительности процесса сгорания, время которого учитывается в предложенном выражении. Полный объем цилиндра и объем при завершении основной фазы сгорания учитывают степень сжатия, параметры КС и температуру цикла. На продолжительность процесса сгорания значительное влияние оказывает частота вращения коленчатого вала. В данной зависимости она выражена через время достижения НМТ (от ВМТ), где также учтена величина хода поршня. Количество свободного кислорода в ТВС отражается в соотношении коэффициента избытка воздуха.

Зависимость концентрации  $\text{NO}_x$  от безразмерного комплекса параметров  $K$  представлена на рис. 4.

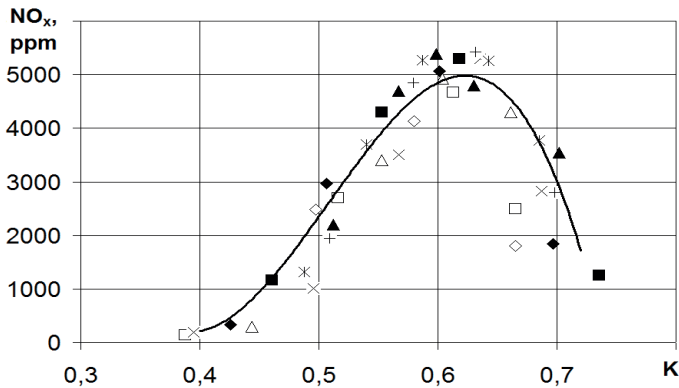


Рис. 4. Зависимость концентрации оксидов азота от параметра  $K$ :

$n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{0,3} = 13^\circ$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\diamond$  — 0 %,  $\square$  — 3 %,  $\Delta$  — 5 %;

$n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{0,3} = 22^\circ$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $+$  — 0 %,  $*$  — 3 %,  $\times$  — 5 %;

$n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{0,3} = 13^\circ$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\blacklozenge$  — 0 %,  $\blacksquare$  — 3 %,  $\blacktriangle$  — 5 %

Зависимость концентрации оксидов азота от предложенного безразмерного комплекса параметров  $K$  может быть описана полиномом 3-го порядка:

$$[\text{NO}_x] = -783\,000K^3 + 1\,191\,500K^2 - 573\,500K + 89\,100.$$

Модель, основанная на безразмерном комплексе параметров  $K$ , позволяет оценить концентрацию  $\text{NO}_x$  в ОГ с учетом конструктивных и режимных параметров двигателя и, что особенно важно, с учетом добавок водорода в ТВС. Использование параметров  $\tau_{Pz}$  и  $V_{Pz}$  в качестве основных позволяет оценивать концентрацию оксидов азота при тепловом расчете по эмпирической модели И.И. Вибе [6], на основе которого отечественные и зарубежные инженеры оценивают динамику изменения индикаторных показателей рабочего цикла.

*Данная работа выполнена в рамках Государственного задания, проект № 394.*

## Литература

- [1] Бортников Л.Н., Павлов Д.А., Русаков М.М. Экспериментальная и расчетная оценки эффективности применения водорода на автомобиле. *Автомобильная промышленность*, 2013, № 6, с. 33–36.
- [2] Шайкин А.П., Ивашин П.В., Галиев И.Р., Дерячев А.Д. К вопросу о природе электрических явлений и турбулентной скорости распространения метановодородного пламени. *Вектор науки ТГУ*, 2015, № 1, с. 51–54.
- [3] Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. *Окисление азота при горении*. Москва — Ленинград, Изд. АН СССР, 1947, 148 с.
- [4] Mustafi N.N., Miraglia Y.C., Raine R.R., Bansal P.K., Elder S.T. Spark-Ignition Engine Performance with 'Powergas' Fuel (Mixture of CO/H<sub>2</sub>). *A Comparison with Gasoline and Natural Gas Fuel*, 2006, vol. 85, pp. 1605–1612.
- [5] Шайкин А.П., Ивашин П.В., Дерячев А.Д. Эмпирическая модель для прогнозирования оксидов азота при добавках водорода в ТВС двигателей с искровым зажиганием. *IV Междунар. науч.-техн. конф. (Резниковские чтения) «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства»*, Сб. тр, Тольятти, 2015, с. 276–281.
- [6] Вибе И.И. *Новое о рабочем цикле двигателя*. Москва — Ленинград, Машгиз, 1962, 271 с.

УДК 621.43

## Ширина зоны турбулентного горения и скорость распространения пламени в камере сгорания бензинового двигателя с добавками водорода

© Дерячев Александр Дмитриевич, Шайкин Александр Петрович

Россия, Самарская обл., г. Тольятти,  
Тольяттинский государственный университет

[proscripts@mail.ru](mailto:proscripts@mail.ru)

*Основываясь на явлениях электропроводности пламени, авторы предложили методика экспериментального определения ширины зоны турбулентного горения и средней скорости распространения пламени при добавках водорода в бензовоздушную смесь. Показано влияние добавок водорода и частоты вращения коленчатого вала на ширину зоны горения и скорость распространения пламени в камере сгорания экспериментальной установки. Представлена зависимость ширины зоны турбулентного горения от скорости распространения пламени.*

**Ключевые слова:** процесс сгорания, ионизация, скорость распространения пламени, ширина зоны горения, добавка водорода.

Один из перспективных методов повышения экономичных показателей работы двигателя с искровым зажиганием — организация устойчивого горения на бедных смесях. Для решения данной задачи наиболее часто применяют альтернативные виды топлива, в частности, добавки водорода в топливно-воздушную смесь (ТВС). Основ-

ное преимущество применения добавок водорода в ТВС — значительное расширение пределов воспламенения и устойчивого горения [1].

При протекании рабочего процесса основными характеристиками распространения пламени являются скорость распространения пламени и ширина зоны турбулентного горения (ЗТГ) [2, 3]. Исследование ширины ЗТГ наиболее актуально при анализе влияния добавок водорода в топливно-воздушную смесь на химическую кинетику горения, развитии технологии сжигания бедных смесей (расслоение заряда ТВС, форкамерные и лазерные источники воспламенения, применение альтернативных видов топлива и т. д.) [4, 5]. Следует отметить, что работа [5], выполненная в 1940-х годах, отличается высокой методической обоснованностью и тщательностью экспериментального анализа, доступного в технике того времени.

В настоящее время недостаточно экспериментальных исследований, посвященных анализу влияния добавок водорода в топливно-воздушную смесь на скорость распространения пламени и ширину зоны турбулентного горения в условиях интенсивной турбулентности в камере сгорания двигателя с искровым зажиганием.

Для исследования характеристик распространения пламени при добавках водорода в ТВС на кафедре «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета проведен ряд экспериментов на исследовательской одноцилиндровой установке УИТ-85. Для получения информации о процессе сгорания в камеру сгорания устанавливался ионизационный датчик (ИД) с двумя электродами, регистрирующими проходящий фронт пламени. Конструкция исследовательской установки и методика проведения эксперимента описана в работе [6].

Средняя скорость распространения пламени определялась по формуле

$$U_{\text{cp}} = \frac{L_1}{\tau_1},$$

где  $L_1$  — расстояние от свечи зажигания до первого электрода ИД;  $\tau_1$  — время возникновения ионного тока у первого электрода ИД, с.

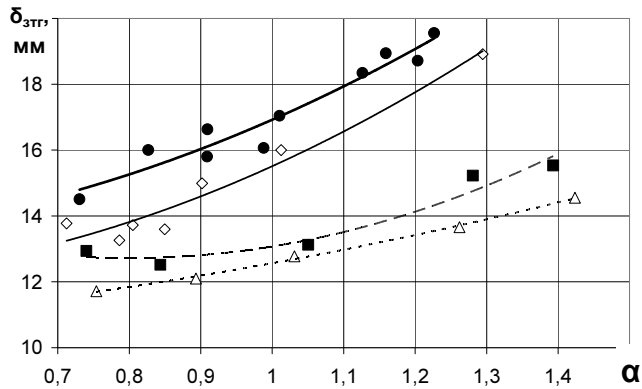
На основе анализа результатов эксперимента предложена методика определения ширины ЗТГ по формуле

$$\delta_{\text{ЗТГ}} = U_{1-2} \Delta \tau_i - D_{\text{эл}},$$

где  $U_{1-2}$  — местная скорость переднего фронта пламени между электродами ИД;  $\Delta \tau_i$  — разность времени ухода пламени и прихода пламени к  $i$ -му электроду датчика ионизации (продолжительность существования ионного тока на электроде датчика);  $D_{\text{эл}}$  — диаметр электрода ИД.

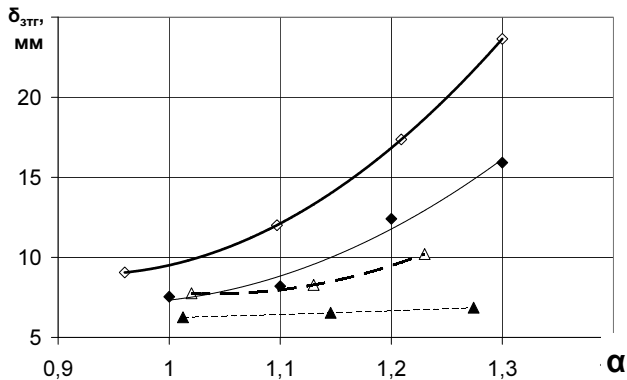
Зависимость ширины ЗТГ от состава смеси при разной добавке водорода и частоте вращения коленчатого вала представлена на рис. 1. Видно, что ширина ЗТГ значительно увеличивается при обеднении смеси. С добавлением водорода в ТВС наблюдается сокращение ширины ЗТГ. Это обусловлено тем, что добавка водорода приводит к повышению турбулентной диффузии и нормальной скорости распространения пламени, тем самым увеличивая интенсивность химических реакций горения.

Повышение частоты вращения коленчатого вала приводит к росту ширины ЗТГ во всем исследуемом диапазоне по составу смеси. Это можно объяснить двумя причинами: во-первых, увеличением поверхности горения ТВС за счет повышения пульсационной скорости, что происходит с увеличением скорости поршня, во-вторых, уменьшением времени, необходимого на процесс сгорания.



**Рис. 1.** Зависимость ширины зоны турбулентного горения от состава смеси:  
 $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\diamond$  — 0 %,  $\blacksquare$  — 3 %,  $\triangle$  — 5 %;  
 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\bullet$  — 0 %

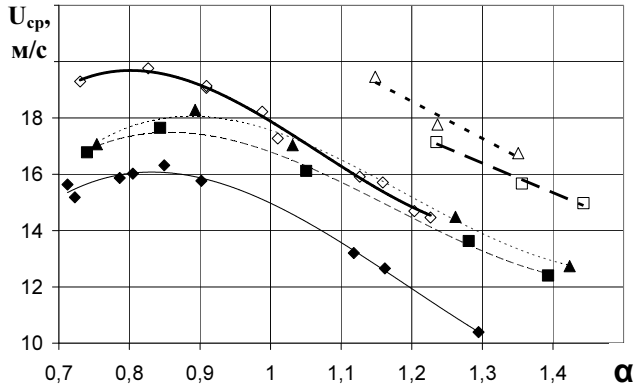
В работе проведен анализ ширины ЗТГ при изменении угла опережения зажигания (УОЗ). Зависимость ширины ЗТГ от состава смеси при изменении УОЗ и доли добавляемого водорода представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость ширины зоны турбулентного горения от состава смеси:  
 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{\text{о.з.}} = 13^\circ$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\diamond$  — 0 %,  $\triangle$  — 5 %;  
 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{\text{о.з.}} = 22^\circ$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\blacklozenge$  — 0 %,  $\blacktriangle$  — 5 %

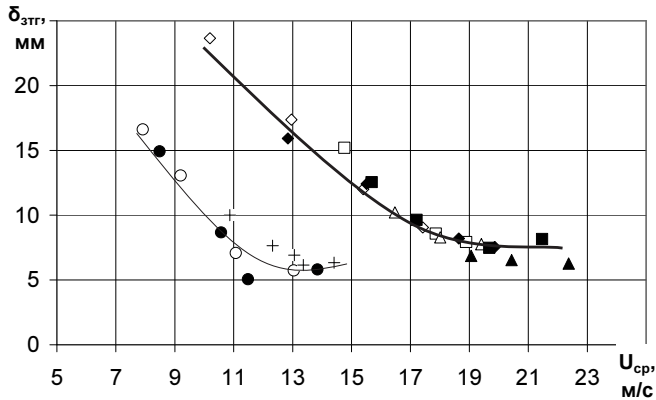
С увеличением угла опережения зажигания ширина ЗТГ уменьшается, причем при  $\theta_{\text{о.з.}} = 22^\circ$  и  $g_{\text{H}_2} = 5\%$  ширина ЗТГ практически не изменяется по составу смеси. Таким образом, угол опережения зажигания в значительной мере определяет ширину ЗТГ.

Зависимость средней скорости распространения фронта от состава смеси при различной частоте вращения коленчатого вала и доле добавляемого водорода представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимость средней скорости распространения пламени от состава смеси:  
 $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\blacklozenge$  — 0 %;  $\blacksquare$  — 3 %;  $\blacktriangle$  — 5 %;  
 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\diamond$  — 0 %;  $\square$  — 3 %;  $\triangle$  — 5 %

С увеличением частоты вращения средняя скорость распространения пламени повышается. Это объясняется ростом пульсационной скорости пламени, которая возрастает вследствие увеличения скорости поршня. При добавке водорода в ТВС скорость распространения пламени растет за счет увеличения интенсивности химических реакций и роста нормальной составляющей скорости распространения пламени.



**Рис. 4.** Зависимость ширины зоны турбулентного горения от средней скорости распространения пламени:  
 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{0.3} = 13^\circ$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\diamond$  — 0 %,  $\square$  — 3 %,  $\triangle$  — 5 %;  
 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{0.3} = 22^\circ$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\blacklozenge$  — 0 %,  $\blacksquare$  — 3 %,  $\blacktriangle$  — 5 %;  
 $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\theta_{0.3} = 13^\circ$ ,  $g_{\text{H}_2}$ :  $\circ$  — 0 %,  $\bullet$  — 3 %,  $+$  — 5 %

Для анализа взаимосвязи двух основных характеристик пламени построена зависимость ширины ЗТГ от средней скорости распространения пламени (рис. 4), на которой видно, что изменение ширины ЗТГ относительно средней скорости распространения пламени не зависит ни от доли добавляемого водорода в топливно-

воздушную смесь, ни от изменения угла опережения зажигания, а определяется частотой вращения коленчатого вала.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- экспериментально исследованы характеристики распространения пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха, частоты вращения коленчатого вала, угла опережения зажигания и добавок водорода в топливно-воздушную смесь. Показано, что добавка 3...5 % водорода в ТВС значительно увеличивает среднюю и турбулентную скорость распространения пламени и сокращает ширину ЗТГ. Повышение частоты вращения коленчатого вала на 33 % приводит к увеличению ЗТГ на 7 % и росту средней скорости распространения пламени на 16 % практически во всем диапазоне исследуемого состава смеси;

- изменение ширины ЗТГ относительно средней скорости распространения пламени не зависит от добавки водорода в топливно-воздушную смесь и угла опережения зажигания.

*Данная работа выполнена в рамках Государственного задания, проект №394.*

### Литература

- [1] Бортников Л.Н. Обобщенная характеристика горения бензоводородовоздушных смесей на нижней границе устойчивого воспламенения. *Вектор науки ТГУ*, 2010, № 2, с. 28–33.
- [2] Кавтарадзе Р.З. *Теория поршневых двигателей. Специальные главы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 720 с.
- [3] Ясников И.С., Ивашин П.В., Шайкин А.П. К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме. *ЖТФ*, 2013, № 11, с. 39–43.
- [4] Талантов А.В. *Горение в потоке*. Москва, Машиностроение, 1978, 160 с.
- [5] Иноземцев Н.В. Кошкин В.К. *Процессы сгорания в двигателях*. Москва, Машгиз, 1949, 173 с.
- [6] Шайкин А.П., Дерячев А.Д. Взаимосвязь ширины зоны горения с ионным током и скоростью распространения пламени в условиях двигателя с искровым зажиганием. *Вектор науки ТГУ*, 2014, № 3, с. 82–86.

УДК 621.039.63:621.891

## Определение оптимальной толщины электроизоляционных покрытий в изделиях бланкета ИТЭР

© Зайцев Андрей Николаевич, Куксенова Лидия Ивановна

Россия, г. Москва, АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала»

[odin221@yandex.ru](mailto:odin221@yandex.ru)

*Предложен метод расчета минимальной толщины электроизоляционного оксидного покрытия (ЭИП)  $H_{\min}$  деталей модулей бланкета ИТЭР с учетом влияния  $\gamma$ -облучения, температуры и величины износа. Проведены триботехнические испыта-*



ния плазмо-напыленного покрытия  $Al_2O_3$  в паре со сталью 316L(N)-IG и алюминиевой бронзой БрАЖНМц9-4-4-1 по схеме торцевого трения на воздухе в диапазоне температур 20...400 °С. В паре с бронзовыми контробразцами наблюдается прирост толщины ЭИП- $Al_2O_3$  при температурах выше 100 °С. Ожидаемая величина падения  $\rho_v$  плазмо-напыленного ЭИП- $Al_2O_3$  в условиях эксплуатации модулей blankets ИТЭР не превысит четырех порядков. Проведенные расчеты показали, что в зависимости от конструкции изделия модуля blankets, толщина ЭИП может варьироваться в пределах 0,18...0,35 мм.

**Ключевые слова:** ИТЭР, blankets, электроизоляционное оксидное покрытие, плазменное напыление, износ.

В модулях blankets ИТЭР предполагается широкое применение газотермических оксидных электроизоляционных покрытий (ЭИП) из  $Al_2O_3$ ,  $MgAl_2O_4$ , работающих в условиях  $\gamma$ -нейтронного излучения при повышенной температуре [1]. Согласно конструкторской документации не менее 12 типов деталей модулей blankets должны иметь ЭИП толщиной 0,35<sub>-0,05</sub> мм для обеспечения заданной работоспособности ИТЭР (рис. 1).

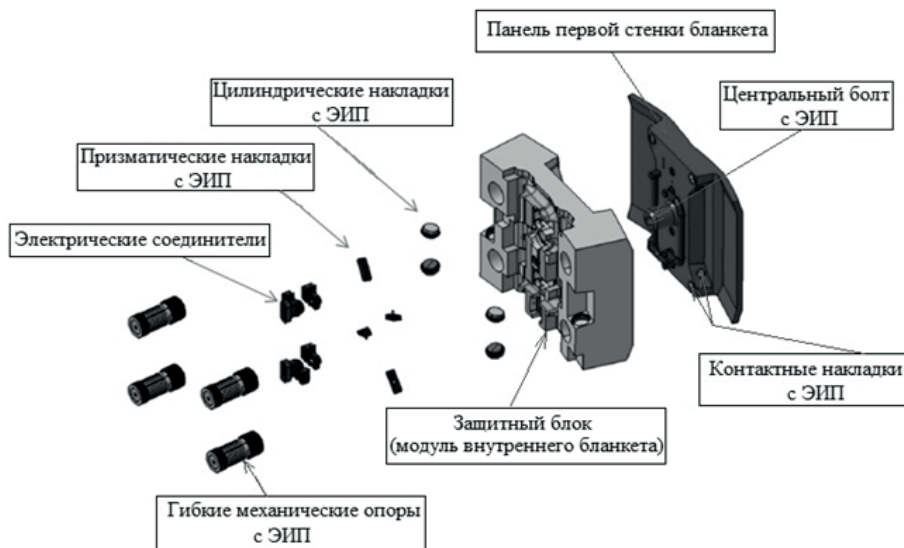


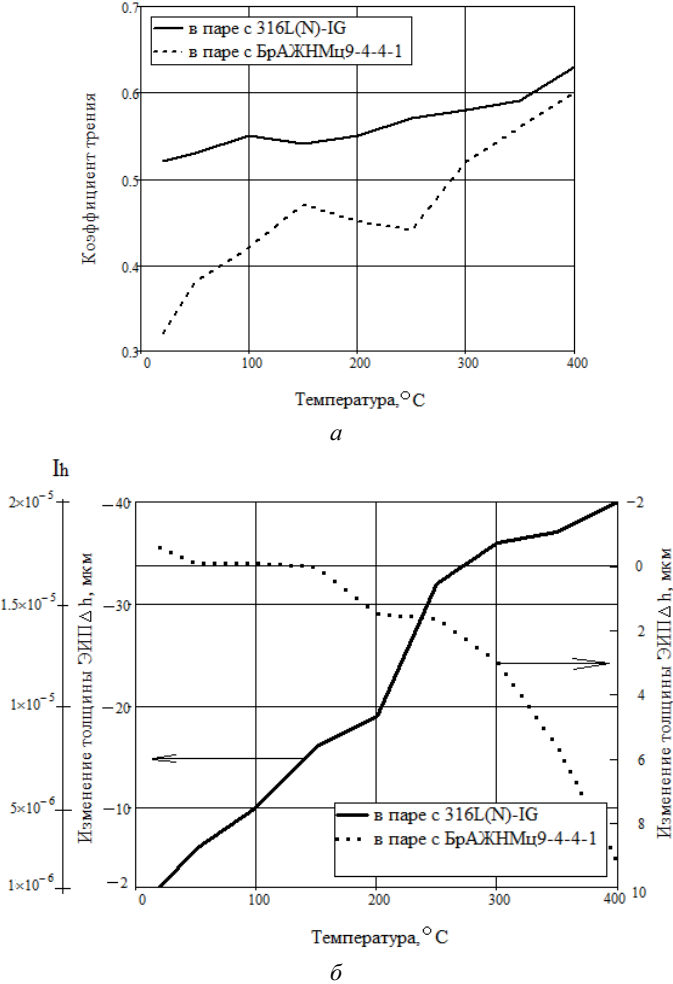
Рис. 1. Общий вид модулей blankets ИТЭР [2]

Наряду с радиационным воздействием, модули blankets ИТЭР находятся в сложном напряженном состоянии, вызванным флуктуациями температурного поля и силовых факторов. Наличие вибраций при циклической работе реактора (горение плазмы/пауза) в сочетании с нестабильностью температурных и силовых факторов может вызвать импульсивный сдвиг деталей с ЭИП в местах их установки, и как следствие, приведет к износу покрытия.

Целью настоящей работы является разработка метода расчета минимально допустимой толщины ЭИП ( $H_{min}$ ) деталей модулей blankets ИТЭР, выполненного с уче-

том влияния не только ионизирующего излучения, но и фактической износостойкости материала ЭИП.

Оценка влияния температуры на изменение коэффициента трения и толщины ЭИП в паре со стальным и бронзовым контробразцами представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость триботехнических свойств пар трения ЭИП со сталью и бронзой от температуры:  
*a* — коэффициент трения; *б* — изменение толщины ЭИП на пути трения  $L = 2$  м

Проведенные измерения показали, что в необлученном состоянии электрическое сопротивление образцов с ЭИП толщинами 0,18 и 0,24 мм составляет  $R_1 = 3,7 \cdot 10^{11}$  Ом и  $R_2 = 5,1 \cdot 10^{11}$  Ом, соответственно. Значение удельного объемного сопротивления  $\rho_V$  ЭИП составило  $10^{14}$  Ом · см, а значение удельного поверхностного сопротивления —  $\rho_S > 10^{15}$  Ом.

Анализ литературных источников [3] и данных, полученных в АО «НИКИЭТ», по влиянию  $\gamma$ -нейтронного излучения и температуры на  $\rho_V$  плазмо-напыленных ЭИП- $Al_2O_3$  показал, что для энергетического спектра нейтронов реактора ИТЭР и флюенса  $2,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  основными определяющими факторами  $\rho_V$  является  $\gamma$ -излучение и температура. Проведенные расчеты показали, что в наиболее жестких условиях работы ЭИП blankets ИТЭР ( $P_\gamma = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Р/с}$ ,  $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $\rho_V = 3 \cdot 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , т. е. падение относительно исходного (необлученного) не превысит четырех порядков.

На основании полученных экспериментальных данных были проведены расчеты  $H_{\min}$  для 12 типов деталей модулей blankets ИТЭР.

Таким образом, проведенный расчет минимальных толщин ЭИП- $Al_2O_3$  ( $H_{\min}$ ) применительно к деталям модулей blankets ИТЭР выявил их вариацию в пределах 0,18...0,35 мм в зависимости от геометрической формы, габаритных размеров и условий работы. Установленные требования по толщине к ЭИП 0,35 $_{-0,05}$  мм могут быть снижены для ряда деталей в зависимости от вида и места расположения в модуле blankets, что позволит повысить их адгезионную/когезионную прочность, трещиностойкость в системе ЭИП-изделие.

### Литература

- [1] MaterialAssesment report 3.6 “Electrical-Insulation Ceramic Coating”. ITER\_D\_22eYPW v. 2.0, 2004.
- [2] Merola M., Loesser D., Martin A., Chappuis P. et al. ITER plasma-facing components. *Fusion Engineering and Design*, 2010, vol. 85, pp. 2312–2322.
- [3] Дубинин Г.В. Влияние реакторного облучения на прочностные свойства электрокерамики. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1981, 206 с.

УДК 624.4

## Обоснование выбора системы рециркуляции отработавших газов для газовых двигателей КАМАЗ

© Зарипов Риваль Эдуардович, Кадышев Вячеслав Григорьевич

Россия, Республика Татарстан, г. Набережные Челны,  
Научно-технический центр ОАО «КАМАЗ»

[rivalzaripov@mail.ru](mailto:rivalzaripov@mail.ru)

*В настоящее время одной из актуальнейших проблем создания современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является проблема экологии. ДВС, работающие на природном газе, не являются исключением, несмотря на то, что выброс основных токсичных компонентов такими двигателями заметно ниже в сравнении с дизелями и бензиновыми ДВС. Без дополнительного оборудования их системами снижения токсичности отработавших газов они не могут соответствовать экологическому классу Евро-6.*

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, рециркуляция отработавших газов, рециркулируемые газы, сопло Вентури, мощностно-экономические показатели, степень рециркуляции.

В данной работе обоснован выбор типа системы рециркуляции отработавших газов (ОГ), основным токсичным компонентом которых являются оксиды азота, так как выброс продуктов неполного сгорания газовым двигателем незначителен, а способы борьбы с ними известны и не вызывают больших проблем. Для ДВС искрового зажигания чаще всего применяют каталитические нейтрализаторы, однако для двигателя КАМАЗ 820.73-300 такой выбор вряд ли оправдан вследствие рабочего объема двигателя и, соответственно, стоимости системы. Системы накопительного или селективного типа (применяемые на дизелях КАМАЗ) также имеют высокую стоимость и не лишены ряда недостатков. Из известных способов снижения токсичности можно назвать рециркуляцию ОГ (РОГ).

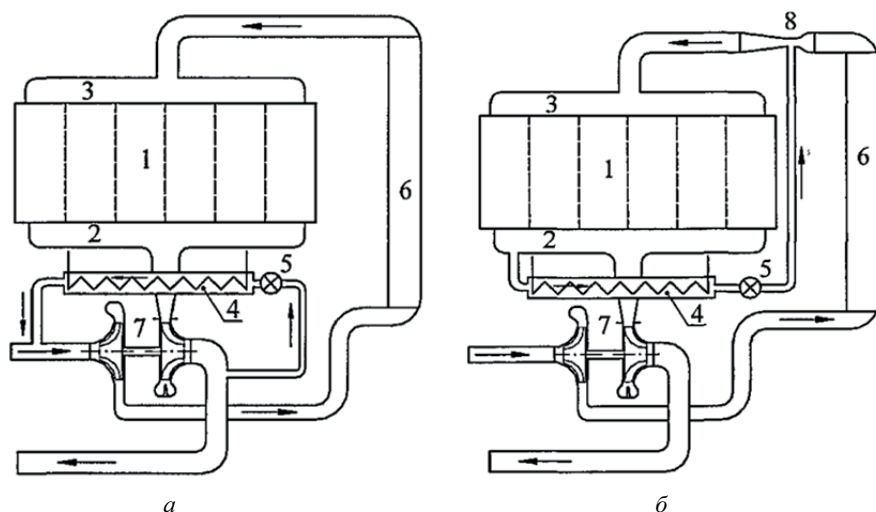
В работе ставится цель достигнуть экологического стандарта «Евро-6», в соответствии с которым содержание выбросов оксида азота, в частности, не должно превышать 0,4 г/(кВт·ч). Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выбрать модель двигателя КАМАЗ для применения на нем системы РОГ;
- 2) провести анализ существующих схем систем РОГ для выбора оптимального варианта;
- 3) определить степень рециркуляции для каждого режима двигателя;
- 4) провести расчетный анализ для выбранных систем РОГ.

На первом этапе была выбрана модель двигателя КАМАЗ для применения на нем системы РОГ — 820.73-300.

Далее был проведен анализ существующих схем систем РОГ для использования на газовом двигателе с турбонаддувом с указанием достоинств и недостатков каждой системы [2]. В системе РОГ низкого давления рециркулируемые газы (РГ) отводятся из выпускного коллектора до или после турбины и добавляются к воздушному заряду перед компрессором, при этом РОГ возможна на всех режимах работы двигателя, так как давление РГ всегда больше давления во впускной системе перед компрессором. Существенным недостатком данной системы является, то что через компрессор и теплообменник наддувочного воздуха проходит смесь воздуха и РГ. Содержащиеся в ней частицы сажи, пары серной и азотной кислот приводят к загрязнению рабочих поверхностей. Один из вариантов системы РОГ высокого давления — схема РОГ с дросселем во впускном коллекторе. За счет дросселирования наддувочного воздуха обеспечивается положительный перепад давлений  $\Delta p_{\text{рог}}$  даже в области высоких нагрузок. В связи с большим расходом воздуха в газовых двигателях, использование в нем дросселирования наддувочного воздуха выхлопных газов на выпуске или на впуске обусловит значительное ухудшение его топливной экономичности вследствие увеличения работы насосных ходов и уменьшения количества воздуха, поступающего в цилиндры двигателя. Использование сопла Вентури позволяет увеличить положительный перепад давлений за счет подвода РГ в область горловины сопла, где и обеспечивается наименьшее статическое давление охлажденного наддувочного воздуха. Сопло Вентури может располагаться как в главной магистрали впускного коллектора, так и в обводном трубопроводе. В первом случае имеют место несколько большие потери давления наддувочного воздуха, однако можно обеспечить равномерное смешивание РГ с наддувочным воздухом при наименьших габаритах двига-

теля. К специальным схемам РОГ можно отнести систему РОГ высокого давления, в которой РГ нагнетаются во впускной коллектор с помощью дополнительного турбокомпрессора. Использование турбокомпрессора для нагнетания РГ позволяет значительно эффективней, например, чем при использовании сопла Вентури, подать РГ во впускной коллектор. Однако, во-первых, эта система будет иметь большую стоимость и, во-вторых, из-за дополнительного агрегата, возможно, снизится общая надежность двигателя. В многоцилиндровом газовом двигателе с восьмью и более цилиндрами может быть применена система РОГ, в которой выхлопные газы от одного «специального» цилиндра нагнетаются им же по принципу поршневого насоса во впускной трубопровод. При использовании схемы РОГ от «специального» цилиндра работа насосных ходов увеличивается только у одного цилиндра. Недостатком такой схемы РОГ является ограничение по максимальной степени РОГ в соответствии с выбранным числом «специальных» цилиндров. После чего для проведения расчетного анализа были выбраны две наиболее простые и эффективные схемы РОГ: система рециркуляции низкого давления (рис. 1, а) и система рециркуляции высокого давления с соплом Вентури (рис. 1, б).



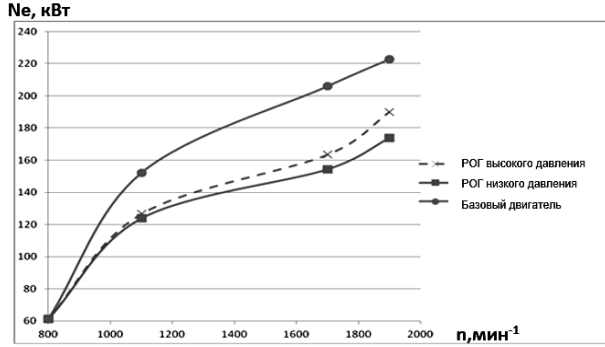
**Рис. 1.** Схема системы РОГ:

а — низкого давления; б — высокого давления с соплом Вентури; 1 — двигатель; 2 — выпускной коллектор; 3 — впускной коллектор; 4 — теплообменник РГ; 5 — клапан для регулирования количества РГ; 6 — ОНВ; 7 — турбокомпрессор; 8 — сопло Вентури

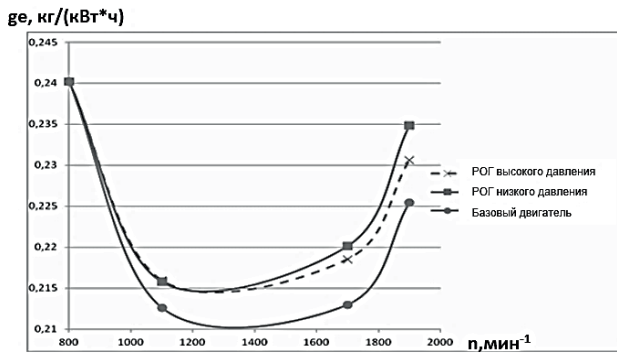
На следующем этапе были рассчитаны оптимальные значения степени РОГ для каждого режима работы двигателя. На режиме  $800 \text{ мин}^{-1}$  степень рециркуляции принималась 0 %, на режиме наибольшего крутящего момента — 13 %, на режиме  $1700 \text{ мин}^{-1}$  — 16,5 %, на номинальном режиме — 11 %. Расчеты были проведены на ЭВМ в программном комплексе Дизель-РК, разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эта программа позволяет рассчитать рабочие процессы двигателя и приближенные экологические параметры — выбросы оксидов азота.

Далее для выбора оптимального варианта системы РОГ проводились их сравнительные расчеты (рис. 2). Сначала рассчитывалась система РОГ высокого давления с соплом Вентури с применением EGR-охладителя и без него. В результате — мощност-

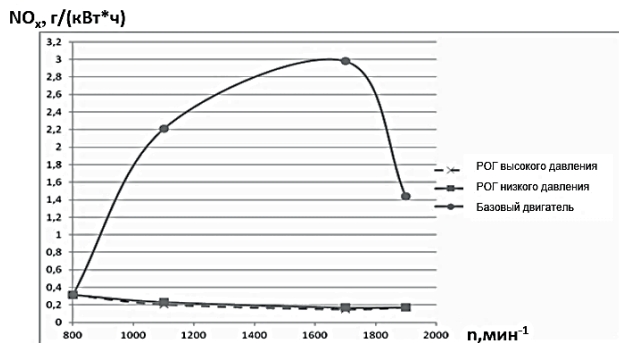
но-экономические показатели получили на 14 % ниже, чем в двигателе без РОГ. Однако при этом выбросы оксида азота снизились на ~ 92 %. Затем рассчитывалась система РОГ низкого давления с применением EGR-охладителя и без него. Потеря мощностно-экономических показателей составила ~ 23 % и выбросы оксида азота снизились лишь на 84 %.



а



б



в

Рис. 2. Зависимости изменения мощности (а), удельного эффективного расхода топлива (б) и выбросов оксида азота с отработавшими газами (в) от режима работы двигателя по ВСХ

Расчетный анализ показал, что рециркуляция является достаточно эффективным методом снижения выбросов оксида азота в ОГ и необходимо продолжить дальнейшие исследования в данной области с целью снижения воздействия двигателя внутреннего сгорания на окружающую среду. Исходя из полученных результатов было принято решение использовать систему РОГ высокого давления с соплом Вентури с установкой EGR-охлаждителя с целью достижения высоких экологических и мощностно-экономических показателей. Данная схема обеспечивает достижения экологического стандарта «Евро-6» по выбросам оксида азота, для достижения норм по другим нормируемым вредным веществам необходимо провести дальнейшие расчеты и стендовые испытания.

### Литература

- [1] Генкин К.И. *Газовые двигатели*. Москва, Машиностроение, 1977, 169 с.
- [2] Голиков В.П. *Улучшение экологических и топливно-экономических показателей транспортного дизеля за счет применения рециркуляции отработавших газов и совершенствования рабочих процессов*. Дис. ... канд. техн. наук. Ярославль, 2004, 174 с.
- [3] Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. *Токсичность двигателей внутреннего сгорания*. Москва, РУДН, 1998, 214 с.

УДК 629.7.036.3

## **Анализ схемных решений и расчет возможностей повышения топливной экономичности ТРДД с помощью применения технологий «третьего контура»**

**© Кизеев Илья Сергеевич, Эзрохи Юрий Александрович,  
Дрыгин Алексей Сергеевич**

Россия, г. Москва, Центральный институт авиационного машиностроения  
имени П.И. Баранова

[30105@ciam.ru](mailto:30105@ciam.ru)

*Из теории воздушно-реактивных двигателей известно, что к двигателям сверхзвуковых самолетов на режиме сверхзвукового полета предъявляются требования высокой удельной тяги и высокой максимальной тяги, а для двигателей транспортной и гражданской авиации на режиме крейсерского полета — максимально возможная экономичность и полетный КПД при фиксированной потребной тяге. Предложены пути разрешения этой фундаментальной задачи и обосновано применение трехконтурного двигателя на многорежимном летательном аппарате.*

**Ключевые слова:** *многорежимный двигатель, сверхзвуковой самолет, параметры цикла, двигатель изменяемого рабочего процесса, трехконтурный турбореактивный двигатель.*

Как известно, принципиальная сложность разработки многорежимных двигателей сверхзвуковых самолетов обусловлена кардинальной противоположностью требований к двигателям на режимах полета со сверхзвуковой скоростью (высокая удельная и максимальная тяга и, как следствие, небольшая степень двухконтурности) и на режимах крейсерского полета с дозвуковой скоростью (относительно низкая потребная тяга, пониженная удельная тяга для повышения полетного КПД двигателя и повышенная степень двухконтурности). В ГТД обычных схем это противоречие разрешается выбором компромиссных расчетных параметров двигателя с учетом назначения ЛА. Альтернативным подходом является применение двигателей изменяемого рабочего процесса, в которых возможно изменение основных параметров цикла двигателя, что позволяет совместить в одном двигателе высокую тягу на сверхзвуковых режимах и высокую экономичность на дозвуковых крейсерских режимах полета.

Как показали результаты анализа различных схем и конструкций двигателей изменяемого рабочего процесса и их элементов, в основном, на примере работ иностранных фирм и запатентованных технических решений, перспективным и технологичным может быть трехконтурный двигатель с адаптивным вентилятором. Двигатель такой схемы в настоящее время широко прорабатывается передовыми зарубежными двигателестроительными фирмами в рамках исследовательских программ, в том числе и для маневренного ЛА 6-го поколения.

В качестве инструмента для проведения расчетных исследований была специально разработана математическая модель силовой установки с учетом воздухозаборника и реактивного сопла и учетом взаимного влияния потоков основного и «третьего» контуров.

Проведенные по этой математической модели многочисленные расчетные оценки параметров и характеристик трехконтурного двигателя-демонстратора на базе одного из современных ТРДД на основных крейсерских режимах показали, что применение технологии трехконтурного двигателя с адаптивным вентилятором для одного из современных авиационных многорежимных двигателей может повысить эффективную топливную экономичность СУ на режимах, соответствующих дозвуковому крейсерскому полету до 15 % и более.

Полученные самые предварительные результаты расчетных оценок возможности использования хладоресурса воздуха третьего контура с помощью расположенного в нем топливо-воздушного теплообменника для охлаждения топлива в топливных баках при характерных значениях длительности дозвукового крейсерского полета показали принципиальную возможность заметного снижения температуры топлива в баке на момент окончания полета при вполне приемлемых уровнях потерь полного давления в канале и значениях массы дополнительного оборудования.

Необходимо продолжить исследования трехконтурного двигателя и его элементов (прежде всего адаптивного трехпоточного вентилятора) с целью экспериментального подтверждения прогнозируемых преимуществ этой схемы двигателя и определения его наиболее рациональной компоновки.

## Литература

- [1] Дрыгин А.С., Кизеев И.С., Эзрохи Ю.А. Анализ путей повышения топливной экономичности ТРДД с помощью применения технологий «третьего контура». *Новые решения и технологии в газотурбостроении. Москва 26–28 мая 2015 г. Сб. тез. докл.* Москва, ЦИАМ, 2015.



- [2] Кулибин А. Ход реализации в США программы создания перспективного авиационного ГТД. *Зарубежное военное обозрение*. № 6, 2013, с. 64–67.
- [3] Скибин В.А., Солонин В.И., ред. *Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей*. Москва, ЦИАМ, 2010.

УДК 621.438

## Реверсивный узел двухконтурной силовой турбины

© Немтырева Ирина Александровна, Заваркин Вадим Николаевич,  
Карпов Федор Васильевич

Россия, Ярославская обл., г. Рыбинск,  
ОАО «Научно-производственное объединение “Сатурн”»

[irina.nemtyreva@yandex.ru](mailto:irina.nemtyreva@yandex.ru)

*Реверсивный узел двухконтурной силовой турбины состоит из турбины прямого хода и турбины заднего хода, совершающей маневр реверса. В реверсивном узле содержится корпус газоперебрасывающего канала, разделенный на два контура внутренней стенкой, с которой контактирует устройство переключения рабочего тела, поочередного перекрывающее контура газоперебрасывающего канала. Предложено выполнить устройство переключения рабочего тела в виде кольцевого корпуса, подвижного в осевом направлении.*

**Ключевые слова:** *реверсивная турбина, устройство перепуска, рабочее тело, полезная работа.*

Реверс — маневр движения корабля, при котором направление его движения изменяется на обратное или осуществляется торможение судна до его остановки. Силовая турбина реверсивного двигателя имеет турбину прямого и турбину заднего хода. На прямом ходу вращается и совершает полезную работу турбина прямого хода (ТПХ), турбина заднего хода (ТЗХ), ротор которой жестко связан с ТПХ, вращается вхолостую. На обратном ходу вращается и совершает полезную работу ТЗХ, а ТПХ вращается вхолостую [1]. Вращение той или иной турбины происходит за счет полезной работы газа (рабочего тела), направление движения которого (в ТПХ или в ТЗХ) регулируется устройством перепуска.

На практике часто применяется ленточный механизм перепуска [2]. Он работает по следующему принципу: на прямом ходу корабля проточная часть ТЗХ перекрывается лентой перепуска газа 1, рабочее тело устремляется в проточную часть 2 ТПХ и совершает полезную работу (рис. 1). На заднем ходу проточная часть ТПХ перекрывается поворотными лопатками 3, а лента перепуска 1 открывается и рабочее тело устремляется в проточную часть 4 ТЗХ, вращающуюся в обратную сторону, и совершает маневр реверса.

Недостаток такой конструкции — сложный механизм с отдельным рычагом на каждую поворотную лопатку, управляемый общим приводом. Заклинивание любой из лопаток приводит к нарушению работы всего механизма. Кроме того, при такой

конструкции на заднем ходу турбины неизбежна негерметичность, возникающая при недостаточно плотной стыковке поворотных лопаток друг с другом, вызывающая утечки в ТПХ и снижающая полезную мощность ТЗХ. Недостатком также является и ограниченный ресурс ленты перепуска, обусловленный ее температурным короблением, что приводит к утечкам газа в ТЗХ и снижению мощности турбины на прямом ходу.

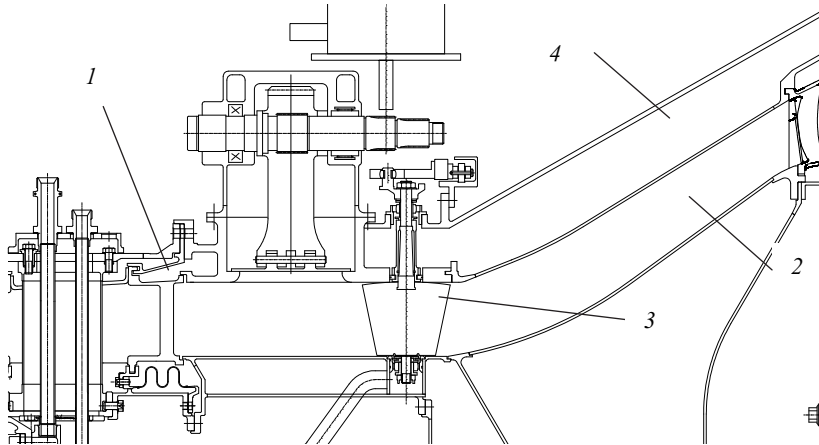


Рис. 1. Силовая турбина с устройством перепуска ленточного типа

В современных реверсивных узлах двухконтурных силовых турбин кораблей устройство для перепуска потока рабочего тела выполнено в виде створок 1, поочередно перекрывающих проточные части, в нижнем положении створки перекрывают первый контур 2 — ТПХ, в верхнем положении перекрывают второй контур реверсивной турбины 3 — ТЗХ (рис. 2).

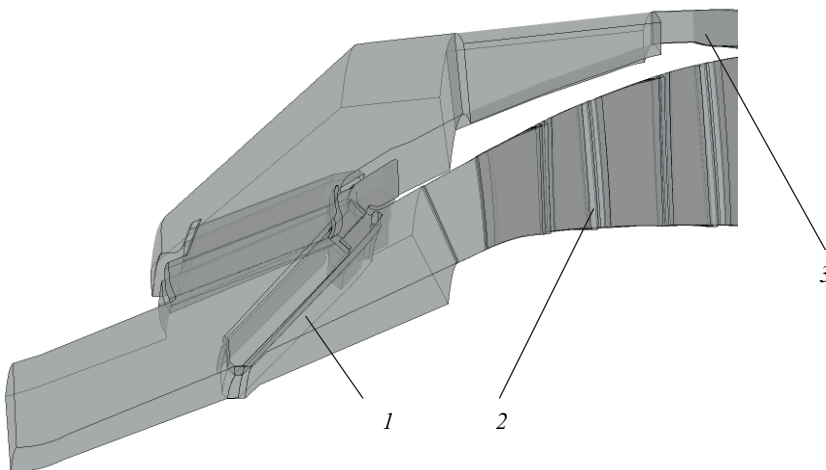


Рис. 2. Силовая турбина с устройством перепуска в виде створок

По сравнению с механизмом ленточного типа механизм створочного типа имеет следующие преимущества:

- меньше механизмов переключения;
- меньшие утечки на переднем ходу;
- отсутствие в канале поворотных лопаток на переднем ходу;
- малое сопротивление потоку на заднем ходу;
- больше ресурс.

Несмотря на это, каждая створка также имеет отдельный рычаг, управляемый общим приводом, и при заклинке одной из створок может произойти нарушение работы всего механизма перепуска. Кроме того, в такой конструкции при перекрытии створками проточной части ТЗХ неизбежна некоторая негерметичность, снижающая полезную мощность силовой турбины на прямом ходу.

В литературе известно предложение [3] выполнить устройство перепуска рабочего тела не в виде створок, а в виде гибких заслонок. Во время прямого хода заслонка опирается о внутреннюю стенку газоперебрасывающего канала, перекрывая тем самым контур ТЗХ. Во время заднего хода привод поворачивает заслонку в крайнее верхнее положение, перекрывая тем самым контур ТПХ. При этом в обоих положениях гибкая заслонка должна приобрести кривизну в соответствии с требованиями плавности проточной части.

Этот механизм перепуска, по мнению авторов данной статьи, не позволяет сделать герметичный стык между соседними заслонками и не гарантирует формирование газодинамически совершенной проточной части с требуемой площадью проходного сечения. При использовании таких заслонок на двигателях большей размерности на них будут действовать гораздо большие усилия со стороны рабочего тела, поэтому они будут не изгибаться, а деформироваться.

В качестве механизма перепуска рабочего тела нами предлагается использовать кольцевой корпус, совершающий поступательное движение вдоль оси двигателя и регулирующий направление движения рабочего тела. Управление кольцевым корпусом осуществляется единичным приводом — реечным механизмом с поступательным движением, что значительно увеличивает его надежность. Предлагаемый реверсивный узел двухконтурной силовой турбины изображен на рис. 3.

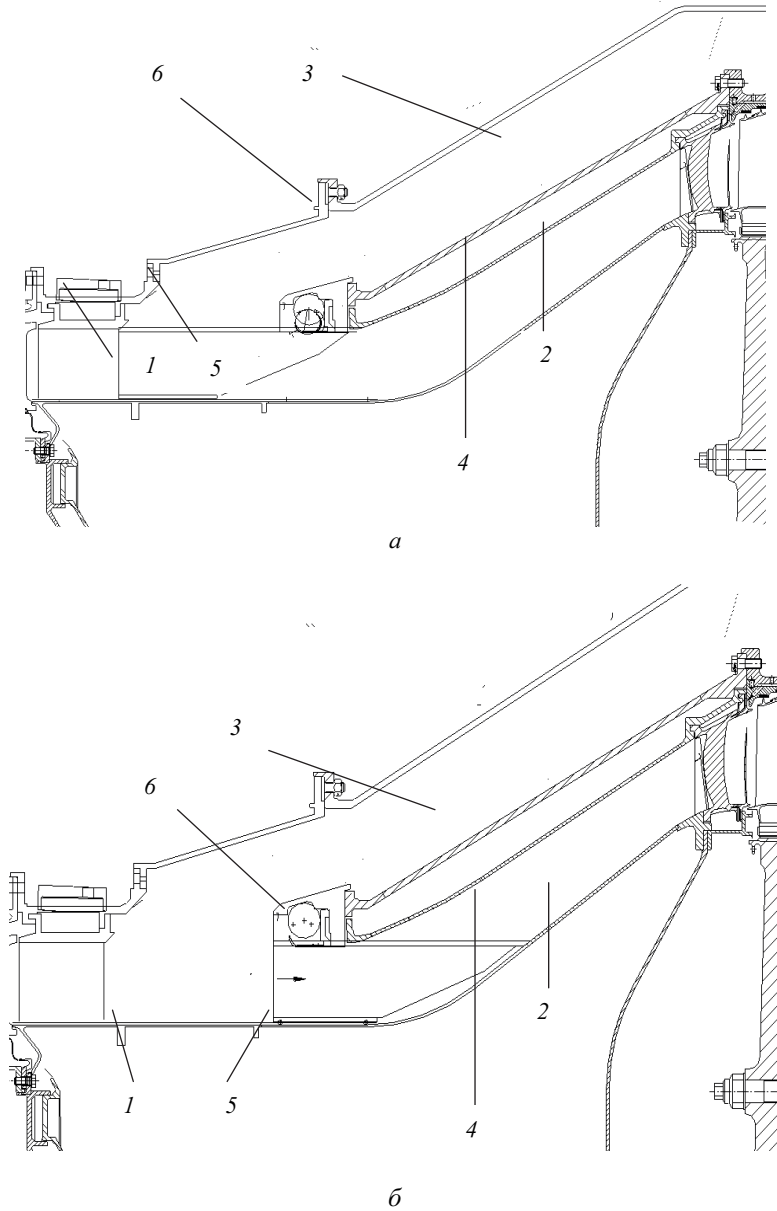
Реверсивный узел двухконтурной силовой турбины содержит корпус газоперебрасывающего канала 1, разделенный на два контура 2 (ТПХ) и 3 (ТЗХ) внутренней стенкой 4. Между внутренней стенкой 4 и корпусом газоперебрасывающего канала 1 расположено устройство перепуска потока рабочего тела 5, которое снабжено механизмом переключения 6.

Реверсивный узел двухконтурной силовой турбины работает следующим образом. На прямом ходу корабля устройство перепуска потока рабочего тела 5, оснащенное механизмом переключения 6, перекрывает контур 3, рабочее тело поступает в контур 2 и совершает полезную работу. На заднем ходу корабля устройство перепуска потока рабочего тела 5, оснащенное механизмом переключения 6, перекрывает контур 2, рабочее тело поступает в контур 3 и совершает полезную работу, тем самым корабль совершает маневр реверса.

Неоспоримым преимуществом данной конструкции является то, что при перекрытии на прямом ходу проточной части ТЗХ достигается максимально возможная герметичность, обеспечивающая уменьшение протечек газа в ступень обратного хода и снижение вентиляционных потерь. Также увеличивается возможность регулирования потоков рабочего тела (одновременное частичное перекрытие проточной части

турбины прямого и турбины обратного хода), в том числе для режима стоп-винт. Предлагаемая конструкция упрощает управление механизмом, перекрывающим поочередно проточную часть ТЗХ и ТПХ, повышает надежность конструкции.

По данной конструкции подана заявка на патент.



**Рис. 3.** Реверсивный узел:  
*a* — на прямом ходу; *б* — на обратном ходу

Литература

- [1] Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е. и др. *Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
- [2] Романов В.И., Кирзнер Ф.И. *Ревёрсивные газовые турбины*. Санкт-Петербург, Судостроение, 1992, 152 с.
- [3] Пат. SU № 1803591, МПК F01D1/30, опубл. 23.03.1993.

УДК 629.7.036.3

**Формирование облика силовой установки  
сверхзвукового административного самолета  
с крейсерским числом  $M = 3,0...4,0$**

© Нигматуллин Руслан Радикович, Ершов Андрей Станиславович

Россия, г. Москва, Центральный институт авиационного машиностроения  
имени П.И. Баранова

[RUSLAN240190@mail.ru](mailto:RUSLAN240190@mail.ru)

*Рассмотрен комплекс проблем, относящихся к силовой установке (СУ) сверхзвукового административного самолета (САС) с увеличенной крейсерской скоростью. Рассмотрен САС с крейсерским числом  $M = 3...4$ , массой 80...100 т, коммерческой нагрузкой 1140 кг (12 пассажиров) и определен возможный уровень его летно-технических и экологических характеристик. Проведена сравнительная оценка различных вариантов СУ на базе ТРДФ и ТРДДФ.*

**Ключевые слова:** *сверхзвуковой административный самолет, силовая установка, турбореактивный двигатель, летно-технические характеристики, шум.*

Сектор административных или деловых самолетов постоянно расширяется. Это обстоятельство дает шанс отечественной авиационной промышленности при имеющемся заделе занять в перспективе значительную долю мирового рынка авиатранспорта.

Одной из задач, решаемых административными самолетами, является сокращение времени полета. При этом предпочтительно использовать сверхзвуковые скорости крейсерского полета. Сверхзвуковой административный самолет (САС) предназначен для совершения деловых поездок бизнесменами, а также для экстренной доставки небольших грузов с целью экономии времени на преодоление больших расстояний по сравнению с другими транспортными средствами. Большая скорость полета самолета облегчает физиологическую переносимость полета за счет существенного выигрыша по времени полета и позволяет реализовывать однодневные деловые поездки. В этих условиях своевременным и оправданным представляется интерес, проявляемый некоторыми фирмами к возможности существенного дальнейшего увеличения скорости таких самолетов. В 2005–2009 годах проводились работы по европейскому проекту HISAC, целью которого являлось исследование технических рис-

ков создания сверхзвуковых бизнес-джетов. Из российских компаний в проекте участвовали «Гражданские самолеты Сухого», ЦАГИ, ЦИАМ. В рамках проекта исследовались критические технологии САС и его силовой установки (СУ), в частности, обеспечение низкого уровня звукового удара. Предложена аэродинамическая компоновка САС, обеспечивающая возможность крейсерского сверхзвукового полета над населенной сушей.

Цель данного исследования — выбор основных параметров СУ САС с учетом ее интеграции с планером, режимов работы двигателей, а также определение параметров согласования системы «планер-СУ».

Проанализирован комплекс проблем, относящихся к СУ САС с крейсерской скоростью полета, равной числу  $M = 3,0...4,0$ , взлетной массой  $80...100$  т, коммерческой нагрузкой  $1\ 140$  кг (12 пассажиров). В работе рассмотрен самолет массой  $90$  т, компоновочная схема которого разработана в «ОКБ Сухого» (рис. 1). Аэродинамическая компоновка этого планера — с низкорасположенным крылом простой формы в плане с большим углом стреловидности, цельноповоротным передним горизонтальным оперением и однокилевым вертикальным оперением [1]. Пассажирский салон и кабина экипажа расположены в передней секции фюзеляжа. В задней секции фюзеляжа находятся топливные баки.

В качестве базовой принята схема СУ с расположением двигателей в подкрыльевых гондолах. В основу базового варианта рассматриваемой СУ положены ТРДФ и ТРДДФ 4-го и 5-го поколения.

На дозвуковых и трансзвуковых участках полета рассматриваемые ТРДДФ могут работать как на форсажных режимах, так и на режиме максимала. Для достижения крейсерских условий полета используется форсажный режим двигателей. На крейсерском участке и участках снижения, торможения и посадки двигатели дросселируются по тяге.

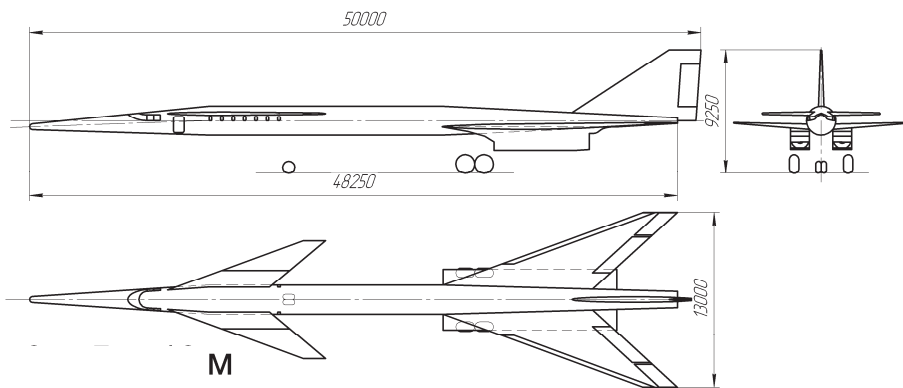


Рис. 1. Проекция САС

Исследования проведены с использованием комплекса программ ВАКС, разработанным в ЦИАМ под руководством Н.П. Дулепова, предназначенным для исследования эффективности применения различных схем комбинированных СУ для обоснования выбора облика ЛА различного назначения [2, 3]; и программы расчета высотно-скоростных и дроссельных характеристик ТРДФ и ТРДДФ, разработанной специалистами ЦИАМ.

Комплекс программ ВАКС включает в себя подпрограммы расчета тягово-экономических характеристик двигателей СУ, аэродинамических, массо-габаритных характеристик элементов СУ и планера, а также летно-технических характеристик самолета. Схема программного комплекса ВАКС показана на рис. 2.

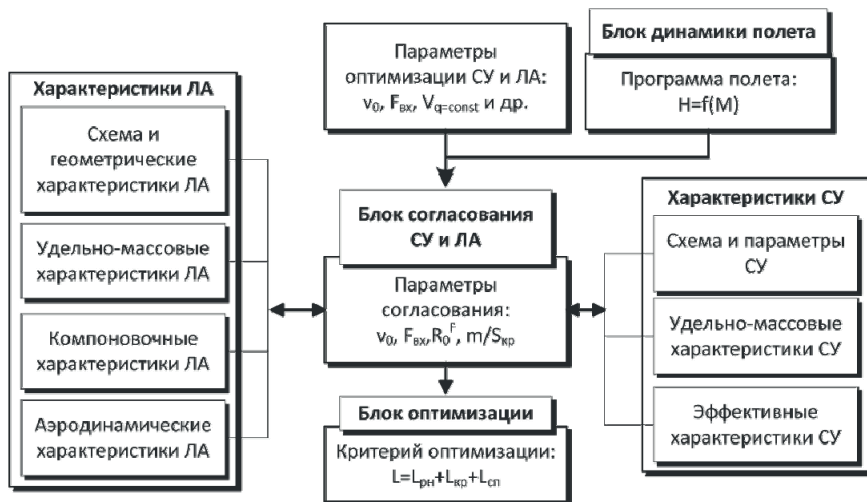


Рис. 2. Краткая блок-схема программного комплекса ВАКС

Комплекс программ неоднократно апробирован при выполнении тематических работ ЦИАМ.

С помощью программ выполнены расчеты идеальных и эффективных высотно-скоростных и дроссельных характеристик двигателей, аэродинамических характеристик ЛА и характеристик воздухозаборника и сопла, а также программы полета. Определен возможный уровень летно-технических характеристик ЛА. Проведено исследование основных проектных параметров СУ, ЛА и траектории полета на основной критерий оптимизации — суммарную дальность по траектории полета. Оценка эффективности ЛА определялась при условии применения керосина. Проведена сравнительная оценка различных вариантов СУ. Тяговооруженность определялась заданием дискретного количества и изменением размерности двигателей. Оценено влияние проектных параметров двигателей на взлетно-посадочные характеристики самолета, шум на местности и уровни эмиссии вредных веществ.

### Литература

- [1] Дулепов Н.П., Семенов В.Л., Харчевникова Г.Д., Сунцов П.С. Поисковые исследования эффективности применения КСУ с ДГПВРД на воздушно-космическом самолете воздушного старта. *Конверсия в машиностроении*, 2008, № 2, с. 7–15.
- [2] Дулепов Н.П., Ланшин А.И., Сосунов В.А. Исследования ЦИАМ по формированию технического облика комбинированных силовых установок гиперзвуковых аэрокосмических транспортных систем. *Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики*, 2000, № 4, с. 17–24.

- [3] Дулепов Н.П., Ланшин А.И., Луковников А.В., Семенов В.Л., Харчевникова Г.Д., Фокин Д.Б., Сунцов П.С. Эффективность применения двухрежимного ГПВРД в составе комбинированной силовой установки авиационно-космической системы. *Вестник машиностроения*, 2011, № 8, с. 51–56.

УДК 621.4

## **Исследование напряженного состояния БКШМ с помощью объемной тензометрической модели**

© Новиков Руслан Асланович, Киселев Сергей Анатольевич

Россия, г. Брянск, Брянский государственный технический университет

[ranowikow@gmail.com](mailto:ranowikow@gmail.com)

*Рассмотрена актуальная задача в двигателестроении — уменьшению расхода топлива и увеличению мощности. Одним из способов форсировки двигателя внутреннего сгорания является замена кривошипно-шатунного механизма на бескривошипно-шатунный механизм (БКШМ). Предложено экспериментальные исследования проводить на тензометрических моделях. Проведен опыт создания физической модели из оргстекла, по результатам которой сделан вывод о том, что применение такой модели существенно сокращает сроки создания и доводки БКШМ, а также позволяет на стадии проектирования своевременно вносить конструктивные изменения в чертежи. Особенно эффективным является сочетание тензометрирования модели с математическим моделированием.*

**Ключевые слова:** *двигатель внутреннего сгорания, кривошипно-шатунный механизм, бескривошипно-шатунный механизм, тензометрическая модель.*

В настоящее время в двигателестроении наблюдается тенденция к уменьшению расхода топлива и увеличению мощности. Одним из способов форсировки двигателя внутреннего сгорания (ДВС) является замена кривошипно-шатунного механизма на другой более производительный и лишенный большого числа кинематических связей, например бескривошипно-шатунный механизм (БКШМ) с зубчато-реечным зацеплением [1, 2]. В таком механизме отсутствует шатун и кривошипный вал, а вместо них использована зубчатая пара рейка — колесо [3]. БКШМ был разработан и запатентован на кафедре «Тепловые двигатели» БГТУ.

Преобразующий механизм ДВС подвергается высоким механическим нагрузкам от сил давления газов и инерционных сил. Поэтому при разработке новых конструкций возникает сложная проблема обеспечения надежности узлов и деталей, которую невозможно решить без проведения обширных научно-исследовательских работ. Опыт создания современных двигателей показал, что исследования напряженного состояния натуральных изделий необходимо проводить до изготовления их в металле и по результатам этих исследований своевременно вносить необходимые изменения в чертежи. В связи с этим для проверки работоспособности конструкции БКШМ тре-



буется выполнить теоретический расчет. А затем, для подтверждения полученных данных, следует провести исследования на натурной модели.

Предварительные экспериментальные исследования можно проводить на тензометрических моделях, применение которых весьма эффективно для деталей, работающих в области упругих деформаций [4]. В качестве материала для моделей используются полимерные материалы, алюминий, резина и др. К достоинствам метода тензометрических моделей из материала с низким модулем упругости следует отнести: возможность выполнения объемных моделей сложных деталей и конструкций, в том числе составных, с точным воспроизведением формы, внешней нагрузки, условий сопряжения и жесткости; малые величины прилагаемых нагрузок; простоту выполнения моделей и легкость внесения изменений в них для сопоставления вариантов конструкций; возможность определения на объемной модели напряжений и перемещений от нескольких видов нагрузок; возможность выполнения в модели технологических отступлений, неизбежных в крупной натурной конструкции, и оценки их влияния, а также изучения отдельных силовых воздействий в общем комплексе нагрузок, что обычно трудно осуществимо на натурной конструкции [5].

Сущность данного метода заключается в следующем: модель, выполненная из другого материала, чем натурная деталь, при определенных условиях испытывает напряжения и перемещения, пропорциональные получаемым в натурной детали. По замеренным в различных точках модели напряжениям и перемещениям могут быть по масштабу подобия определены напряжения и перемещения в натурной детали при заданной нагрузке. Условия подобия, на основании которых выполняется упругая модель и по которым от замеров на модели переходят к искомым величинам в натурной детали, составляются из анализа размерностей или по общим функциональным зависимостям строительной механики и теории упругости. Относительная погрешность определения на моделях деформаций, напряжений, усилий и перемещений в большинстве случаев составляет 5...15 %.

Для исследования напряженного состояния БКШМ на кафедре «Тепловые двигатели» БГТУ создана физическая модель из оргстекла. Нагружение тензометрической модели производится от ресивера со сжатым воздухом через редуктор. Подачу воздуха в цилиндр осуществляет система газораспределения БКШМ.

Для измерения деформаций в элементах модели применяются тензорезисторы (ТР) с чувствительным элементом из металлической фольги (фольговые) или проволоки (проволочные). Для определения числа и типа ТР выполняется эскиз детали (узла) с размещением ТР, на котором указываются типы ТР и их координаты.

Для наклейки ТР на модель используются клеи холодного отверждения: ацетоноцеллулоидный (6...8 % целлулоида в ацетоне ЧДА) для ТР на бумажной подложке и «Циакрин» — на бумажной и полимерной подложках.

Аппаратура для измерения деформаций на моделях из полимерных материалов должна обеспечивать многоточечность измерений, регистрировать информацию в виде, удобном для автоматической обработки на ЭВМ, иметь малое напряжение питания на измерительный полумост. Последнее требование особенно важно в связи с низкой теплопроводностью полимерных материалов, что может приводить к перегреву ТР и появлению значительных температурных погрешностей.

Нагрузка на модель выбирается таким образом, чтобы при нагружении модели иметь деформации, достаточные для измерения их значения и не вызывающие ползучести материала модели. Для органического стекла, эпоксидной смолы этому соответствуют максимально допустимые в модели напряжения  $[\sigma] = 5...6$  МПа. При этом

вне зоны концентрации среднее значение напряжений составляет 2...3 МПа, что может быть измерено с достаточной степенью точности. Для уменьшения расхода воздуха и рабочего объема в модели предусмотрен вытеснитель (легкий, достаточно прочный и жесткий материал типа пенопласта). Для лучшей стабилизации давления внутри модели вытеснитель помещается в оболочку из тонкой резины. Герметизация внутреннего объема модели осуществляется резиновыми манжетами. Давление контролируется образцовыми манометрами.

Проведение тензометрирования сводится к снятию показаний (отсчетов) по тензорезисторам до нагружения рабочей нагрузкой — нулевое состояние и при наличии нагрузки — грузовое состояние. По приращению  $\Delta$  показаний тензорезисторов определяют искомые значения напряжений, усилий и перемещений в модели, а затем по формулам подобия пересчитывают результаты для натурной конструкции. За нулевое состояние целесообразно принимать нагружение модели незначительной нагрузкой, составляющей 5...10 % рабочей. При этом устраняются возможные зазоры в узлах сопряжения, в опорных устройствах модели и нагрузочных элементах, что приводит к более стабильной и линейной работе модели. При нагружении модели внутренним давлением предварительная нагрузка обеспечивает более точное определение давления в модели по шкале манометра.

Модель перед измерениями необходимо подвергнуть трехкратному нагружению нагрузкой, равной рабочей. Такая «тренировка» материала модели повышает его упругие свойства и обеспечивает стабильность показаний тензорезисторов.

Для повышения точности обычно выполняют 3–5 циклов нагружения, в каждом из которых ступенчато увеличивают нагрузку до наибольшего значения с проведением на каждой ступени измерений по всем измерительным точкам. При этом необходимо точно выдерживать 5...10-минутный интервал между моментами нагружения (разгрузки) и записью показаний. При ступенчатом нагружении модели легко обнаружить повреждения тензосхемы, разрушение элементов модели, неисправность нагрузочного устройства, выражающиеся, как правило, в нелинейности показаний. Для каждой ступени нагружения рассчитывают среднее значение показаний.

В итоге, после обработки экспериментальных данных, можно судить о геометрических параметрах преобразующего механизма, определить усилия, перемещения, распределение напряжений в деталях БКШМ. Тензометрическая модель позволяет определить переменную и постоянную составляющие напряжений на одной модели, на основании которых можно рассчитывать запас сопротивления усталости детали или узла в целом. Применение модели из оргстекла существенно сокращает сроки создания и доводки БКШМ, позволяет на стадии проектирования одновременно вносить конструктивные изменения в чертежи. Особенно эффективным является сочетание тензометрирования модели с математическим моделированием.

## Литература

- [1] Иващенко Н.А., Пахомов Ю.А., Киселев С.А. Принцип работы и основные преимущества бескривошипно-шатунного двигателя внутреннего сгорания. *Вестник БГТУ*, 2005, № 4, с. 77–82.
- [2] Новиков М.А., Киселев С.А. Перспективы развития и этапы исследования бескривошипно-шатунного механизма. *Новые горизонты: Материалы Междунар. конф.-конкурса*. Брянск, 18 марта 2015 г. Брянск: БГТУ, 2015, с. 3–5.

- [3] Хабенков Р.О., Киселев С.А. Основные положения к определению напряжений в зубчатом зацеплении модели БКШМ. *Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр.* Брянск, БГТУ, 2015, с. 86–92.
- [4] Васильев Г.Л., Фокин Ю.И., Тищенко А.Т. Исследование напряженного состояния деталей ДВС на тензометрических моделях. Брянск, БГТУ, 2001, 100 с.
- [5] Пахомов Ю.А., Киселев С.А. Эффективность преобразования энергии приводными механизмами. *Турбины и дизели*, 2008, № 4, с. 46–49.

УДК 621.43-233.13

## **Усовершенствованная система газораспределения модели двигателя с БКШМ**

© Новиков Максим Александрович, Киселев Сергей Анатольевич

Россия, г. Брянск, Брянский государственный технический университет

[NovikovMax14@yandex.ru](mailto:NovikovMax14@yandex.ru)

*Рассмотрен разработанный газораспределительный механизм (ГРМ), в котором отсутствуют все недостатки предыдущего, а именно диаметр впускных и выпускных отверстий не ограничен диаметром вала, подвод воздуха осуществляется к неподвижному штуцеру, установленному на корпусе газораспределительного механизма. Предлагаемый ГРМ соответствует все предъявляемым к нему требованиям, обеспечивает непрерывную и бесперебойную работу модели двигателя, а также осуществляет дозированную подачу сжатого воздуха в один из цилиндров и одновременно выпуск отработавших газов из другого.*

**Ключевые слова:** газораспределительный механизм, преобразующий механизм, бескривошипно-шатунный механизм, подача.

В настоящее время в сфере двигателестроения наблюдается тенденция постоянного повышения качества продукции: технико-экономических и экологических показателей двигателей, их ресурса и надежности. Поэтому периодически возникает необходимость модернизации или создания новых двигателей, отвечающих определенным требованиям.

Один из вариантов повышения качества и мощности ДВС — замена преобразующего механизма (ПМ). На сегодняшний день по ряду параметров кривошипно-шатунный ПМ не является оптимальной конструкцией, поэтому ведется поиск альтернативных ПМ.

Достойная замена классическому КШМ — бескривошипно-шатунный механизм (БКШМ) с реечно-зубчатым зацеплением. В данных механизмах отсутствует шатун и кривошипный вал, вместо этого используется зубчатая пара рейка — колесо.

Для более подробного исследования БШМ, подтверждения теоретических расчетов и снятия различного рода характеристик необходимо создание твердотельной модели механизма двигателя.

Для обеспечения работоспособности физической модели двигателя с БКШМ разработаны схема и конструкция газораспределительного механизма (ГРМ), позволяющие осуществить его привод от источника сжатого воздуха. Газораспределительный механизм модели двигателя с БКШМ, установленный на предыдущем двигателе, имел ряд недостатков, обусловленных его конструктивными особенностями.

В ходе анализа ГРМ данной конструкции авторами данной статьи был создан новый ГРМ, не имеющий недостатков прежней.

Оптимизированный ГРМ, представленный на рис. 1, состоит из корпуса, который имеет форму квадрата со сквозным отверстием в центре и четырьмя отверстиями меньшего диаметра на каждой стороне крышки; манжеты, расположенной в корпусе; вала и вращающегося клапана, установленного на валу.

Работа ГРМ данной конструкции осуществляется следующим образом: воздух от компрессора подается непрерывно. Вращающийся клапан в корпусе ГРМ создает две камеры (впускную и выпускную). При положении верхнего поршня БКШМ в верхней мертвой точке (ВМТ) приводной вал расположен таким образом, что впускной канал через верхний патрубок обеспечивает подачу воздуха в надпоршневое пространство верхнего цилиндра, в это же время в нижнем цилиндре происходят аналогичные процессы, но со смещением на  $180^\circ$  поворота приводного вала. При проходе перемычки начинается впуск во второй цилиндр, а из верхнего происходит выпуск.

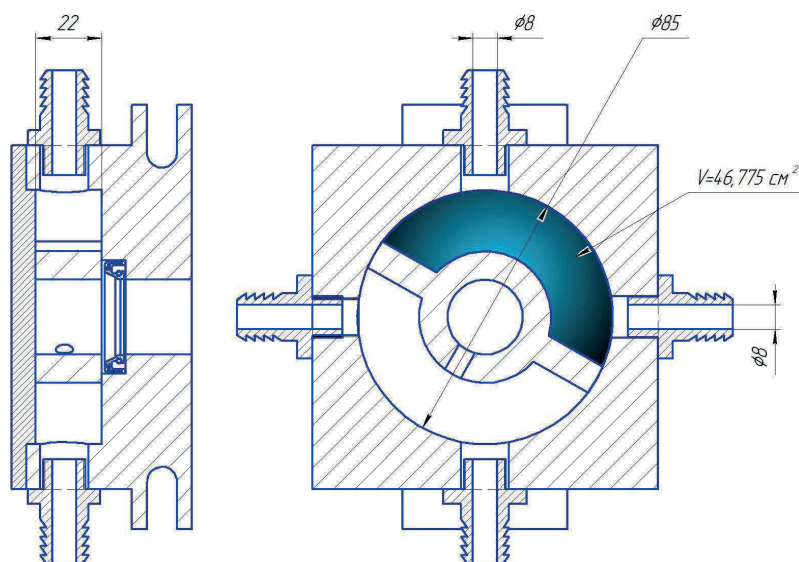


Рис. 1. Модифицированный ГРМ модели двигателя с БКШМ

Таким образом при повороте приводного вала осуществляется дозированная подача сжатого воздуха в один из цилиндров и одновременно выпуск отработавших газов из другого. Разработанная конструкция позволяет обеспечить газообмен модели двигателя с БКШМ.

Наряду с исследованием модели БКШМ ведутся исследования по установке БКШМ на оппозитные двигатели без изменения блок картера. Создан ГРМ, в котором устранены все недостатки предыдущего: диаметр впускных и выпускных отверстий не ограничен

диаметром вала, подвод воздуха осуществляется к неподвижному штуцеру, установленному на корпусе ГРМ. Данный механизм соответствует всем предъявляемым к нему требованиям и обеспечивает бесперебойную работу модели двигателя.

### Литература

- [4] Пахомов Ю.А., Козлов Ю.С. Возможные перспективы повышения технико-экономических параметров поршневых ДВС. *Надежность и эффективность работы двигателей и автомобилей. Сб. науч. Тр. БГТУ*. Брянск, 1999, с. 33–38.
- [1] Иващенко Н.А., Ю.А. Пахомов, С.А. Киселев. Принцип работы и основные преимущества бескривошипно-шатунного двигателя внутреннего сгорания. *Вестник БГТУ*, 2005, № 4, с. 77–82.
- [2] Новиков Р.А., Киселев С.А. Особенности расчета газовоздушного тракта модели БКШМ. *Новые горизонты: Матер. Междунар. конф.-конкурса*, Брянск, 18 марта 2015 г. Брянск, БГТУ, 2015, с. 5–6.
- [3] Новиков М.А., Киселев С.А. Перспективы развития и этапы исследования бескривошипно-шатунного механизма. *Новые горизонты: Матер. Междунар. конф.-конкурса*, Брянск, 18 марта 2015 г. Брянск, БГТУ, 2015, с. 3–5.

УДК 621.452.322

## Комплексная математическая модель формирования облика ТВГТД в системе вертолета

© Рахманкулов Данил Яхьяевич, Захарченко Виктор Савельевич,  
Сунцов Павел Сергеевич

Россия, г. Москва, Центральный институт авиационного машиностроения  
имени П.И. Баранова

[rahmankulov.91@mail.ru](mailto:rahmankulov.91@mail.ru), [zvs002@ciam.ru](mailto:zvs002@ciam.ru), [suntsov@ciam.ru](mailto:suntsov@ciam.ru)

*Изложены методологические основы построения математической модели формирования облика и оценки эффективности ТВГТД в системе вертолета. Большое внимание уделено структуре и особенностям расчета программного комплекса ТВГТД. Рассмотрены преимущества математической модели формирования облика ТВГТД и ряд допущений, которые могут ограничить область ее применения. Приведены результаты верификации комплексной математической модели расчета ТВГТД на примере двигателя ВК-2500П.*

**Ключевые слова:** турбовальный двигатель (ТВГТД), математическая модель, комплексная система СУ-вертолет, эксплуатационные характеристики.

В настоящее время для расчета рабочих процессов ГТД существует множество математических моделей (программ): GasTurb, ГРАД, АСТРА, ОГРА, DWIGwT и др. Однако для оценки эффективности применения различных схем силовых установок в

системе вертолета необходима гибкая математическая модель (как элемент сложной комплексной многодисциплинарной системы СУ-вертолет), способная к изменению внутренней структуры исходного кода и, как следствие, к доработке и легкому сопряжению с другими моделями на определенном языке программирования.

Целью работы является создание математической модели и программного комплекса, необходимого для формирования облика двигателя на базе ТВГТД и проведения исследований по влиянию расчетных параметров турбовального двигателя и его программы управления на эксплуатационные характеристики на установившихся режимах работы. Отличительная особенность предлагаемой технологии и методологии — тесное сопряжение «вертолетных» и «двигательных» аспектов проектирования и расчета, возможность использования внешних (экспериментальных) характеристик элементов двигателя, инструмент визуализации и анализа получаемых результатов.

Программный комплекс ТВГТД разрабатывается как подсистема комплексной многодисциплинарной системы оценки эффективности применения различных схем силовых установок в системе вертолета (рис. 1).

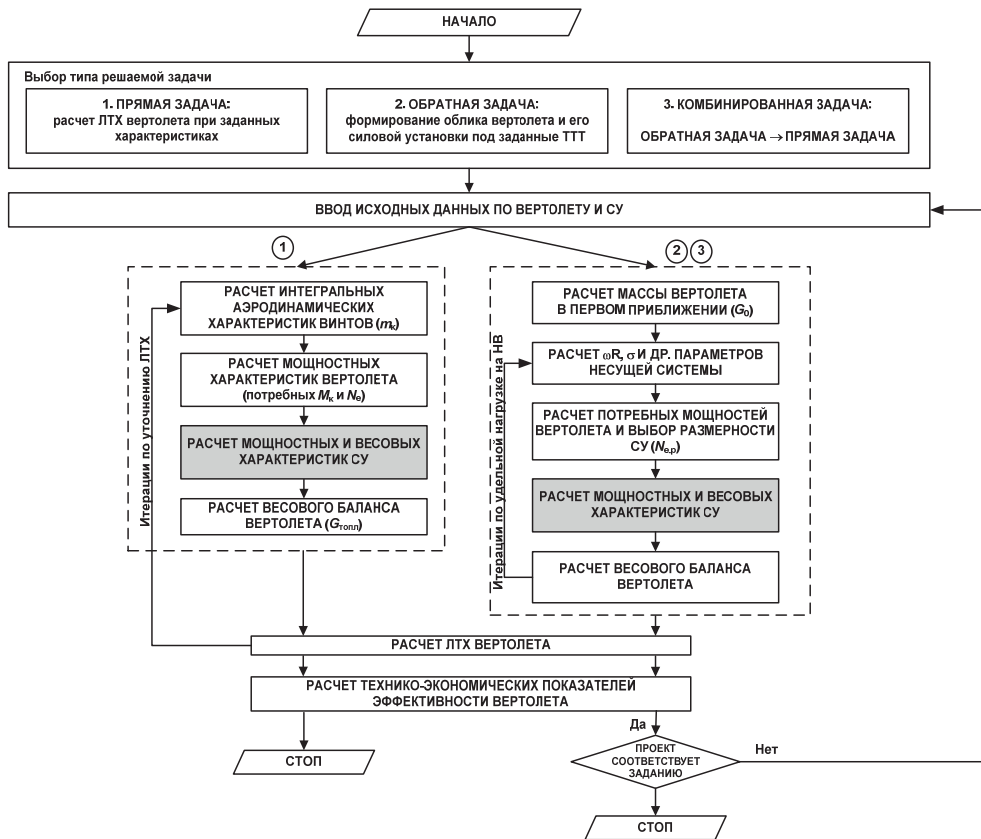


Рис. 1. Блок-схема математической модели вертолета (при решении прямой, обратной и комбинированной задачи)

Программный комплекс ТВГТД предназначен для расчета эксплуатационных (высотных, высотно-скоростных, дроссельных и климатических) и геометрических характеристик турбовального двигателя. Использование рассчитанных эксплуатационных характеристик двигателя для моделирования полетного цикла летательного аппарата позволяет проводить исследование влияния параметров и программ управления двигателя на летно-технические характеристики вертолета [1, 2]. Программный комплекс реализован на алгоритмическом языке FORTRAN.

Модель позволяет рассчитать характеристики ТВГТД со свободной турбиной и выхлопным патрубком, реализующим дозвуковое истечение продуктов сгорания в атмосферу, имеющего газогенератор (ГГ), реализованный по трем конструктивным схемам:

- одновальный однокаскадный ГГ, состоящий из компрессора, КС и ТК;
- одновальный ГГ с комбинированной схемой компрессора, условно разделенный на КНД, КВД, КС и ТК;
- двухвальный двухкаскадный ГГ, состоящий из КНД, КВД, КС, ТВД и ТНД.

В программе расчета используется ряд допущений, которые могут ограничивать область ее применения, либо, при расчете эксплуатационных характеристик с привязкой к двигателю-прототипу потребуются подбирать параметры программы управления:

- на расчетном режиме работы ( $H = H_0$ ,  $M_n = M_{н0}$ ,  $\Delta T_n = T_n - T_{н\text{ МСА}}$ ,  $\Delta p_n = p_n - p_{н\text{ МСА}}$ ,  $\sigma_{вх} = \sigma_{вх0}$ ) приведенные частоты вращения компрессора (компрессоров низкого и высокого давления) принимаются равными 100 %;
- полное давление воздуха на входе во входное устройство принимается равным давлению адиабатного сжатия за счет скоростного напора, при этом потери полного давления в воздухозаборнике не зависят от скорости (числа М) полета, а определяются лишь приведенной скоростью потока в контрольном сечении входного устройства;
- отбор охлаждающего воздуха осуществляется за последней ступенью компрессора;
- коэффициент полноты сгорания топлива принимается постоянным;
- независимо от скорости и направления полета статическое давление на выходе из выхлопного патрубка равно давлению невозмущенной атмосферы.

Блок-схема математической модели турбовального двигателя представлена на рис. 2.

Для расчета характеристик ТВГТД решается система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), сформированная исходя из условий совместной работы элементов двигателя (условия согласования расходов и балансы мощностей на валах) [3].

При расчете отдельных точек эксплуатационных характеристик программа управления двигателем формируется по принципу ограничения заданного значения мощности на определенном режиме. При этом выполняется принцип ограничения других управляемых параметров с целью недопущения превышения ими максимально допустимых значений [4].

Верификация (оценка достоверности) эксплуатационных характеристик на примере двигателя ВК-2500П показал удовлетворительную сходимость, что свидетельствует о корректности и точности вычисления (рис. 3).

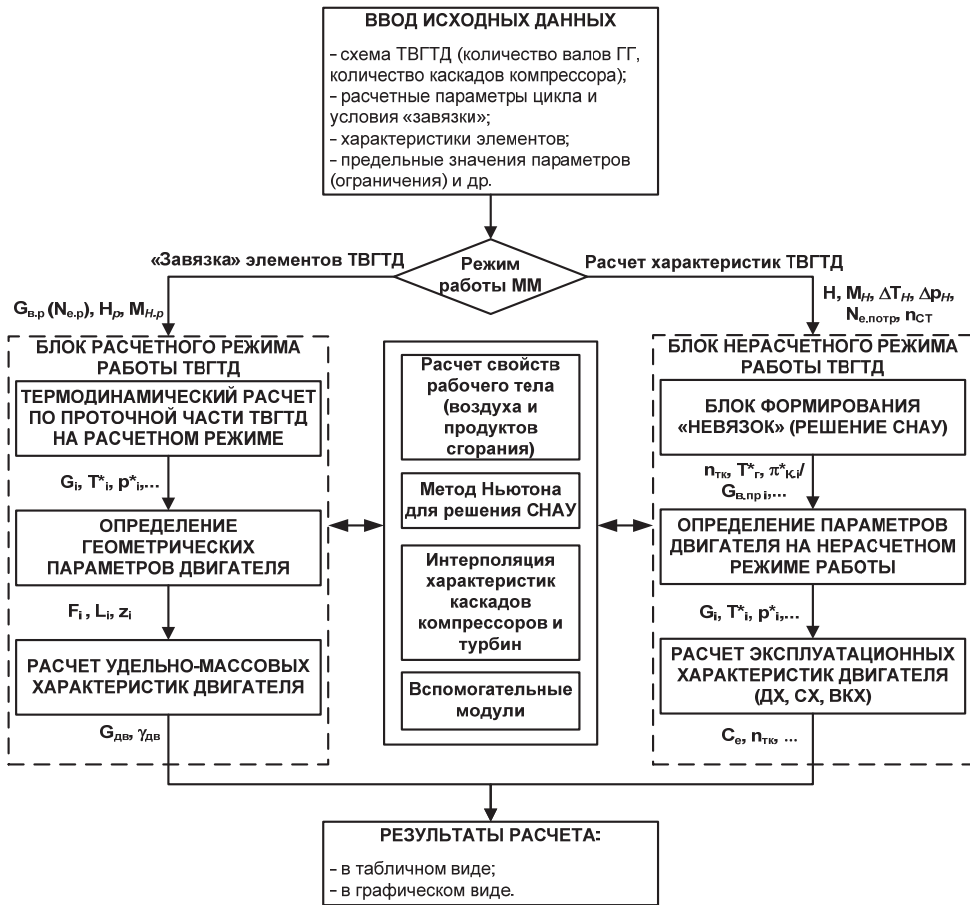


Рис. 2. Блок-схема математической модели ТВГТД

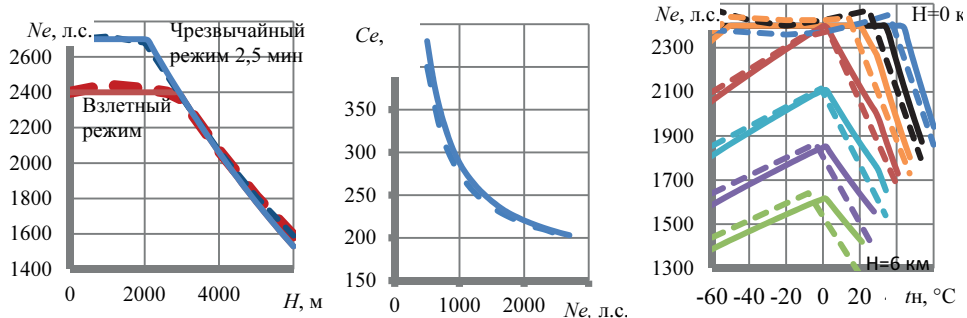


Рис. 3. Сравнение эксплуатационных характеристик ВК-2500П:

— математическая модель; — эксперимент



Расчетные исследования по оценке характеристик ТВГТД для вертолетов выполняются с использованием разработанной комплексной математической модели (КММ) формирования облика СУ вертолетов.

### Литература

- [1] Югов О.К., Селиванов О.Д. *Основы интеграции самолета и двигателя*. Москва, Машиностроение, 1989, 304. с.
- [2] Тищенко М.Н., Некрасов А.В., Радин А.С. *Вертолеты. Выбор параметров при проектировании*. Москва, Машиностроение, 1976,— 368 с.
- [3] Бутов А.М., Козарев Л.А. *Математическое моделирование рабочего процесса авиационных двигателей*. Москва, Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1993, 143 с.
- [4] Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М., Котовский В.Н., Полев А.С. *Теория авиационных двигателей*. Москва, Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006, 448 с.

УДК 621.438

## Анализ причин возникновения и мероприятия по устранению дефекта рабочей лопатки турбины ГТД-110

©Скирта Сергей Михайлович<sup>1</sup>, Пиралишвили Шота Александрович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, Ярославская обл., г. Рыбинск,

ОАО «Научно-производственное объединение “Сатурн”»

<sup>2</sup> Россия, Ярославская обл., г. Рыбинск, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева

[sergey.skirta@npo-saturn.ru](mailto:sergey.skirta@npo-saturn.ru), [piral@list.ru](mailto:piral@list.ru)

*Рассмотрены недостатки рабочей лопатки 1-й ступени турбины, выявленные в процессе опытных работ и испытаний двигателей ГТД-110 № 1 и 2, опытно-промышленной эксплуатации двигателя №2 и промышленной эксплуатации двигателей № 3–7. Расчетными и экспериментальными исследованиями определены основные причины возникновения дефектов. Для устранения этих дефектов разработаны мероприятия по повышению надежности и обеспечению ресурса в соответствии с требованиями проектной документации.*

**Ключевые слова:** *энергомашиностроение, газотурбинная установка, турбина, ресурс, термонапряженность, ГТД-110.*

Перед российским энергомашиностроением стоит задача обеспечения энергетического комплекса отечественными энергоустановками большой мощности для обновления и модернизации отработавших свой ресурс мощностей электрогенерации и теплоснабжения, которые должны быть экономичными и учитывать различные условия эксплуатации.

На объектах российской электроэнергетики эксплуатируются газотурбинные установки (ГТУ) как зарубежного (62 %), так и отечественного производства (38 %). Однако среди ГТУ большой мощности функционирует только одна, пока малоиспользуемая отечественная ГТУ-110. Одна лицензионная ГТУ-160 изготавливается по лицензии компании Siemens. Применение лицензионного оборудования и деталей, поставляемых зарубежными компаниями, ставит под угрозу надежность работы станций в определенных политических и экономических ситуациях. Такая же ситуация возникает при эксплуатации новых станций, работающих на импортируемом оборудовании. Таким образом, широкое использование покупного зарубежного оборудования ставит под угрозу энергобезопасность страны. В сложившейся ситуации требуется создание новых отечественных ГТУ большой мощности и модернизация существующих.

Газотурбинная установка ГТУ-110 разрабатывалась при сотрудничестве РАО «ЕЭС «России», ОАО «НПО «Сатурн», НПП «Машпроект» и представляет собой одновальный агрегат, простого термодинамического цикла для непосредственного привода электрического генератора (рис. 1). Она может работать автономно или использоваться в комбинированном парогазовом цикле.

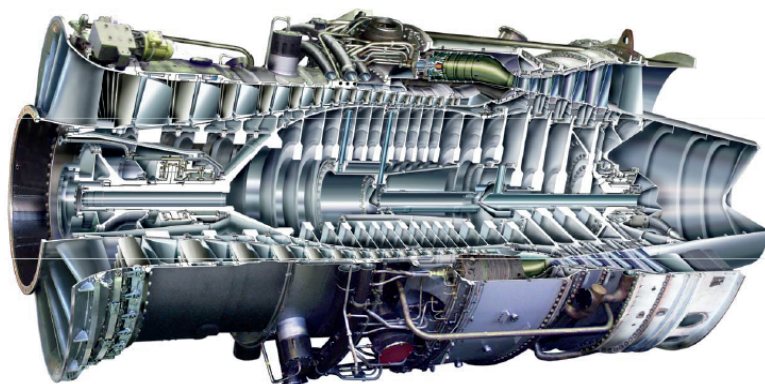
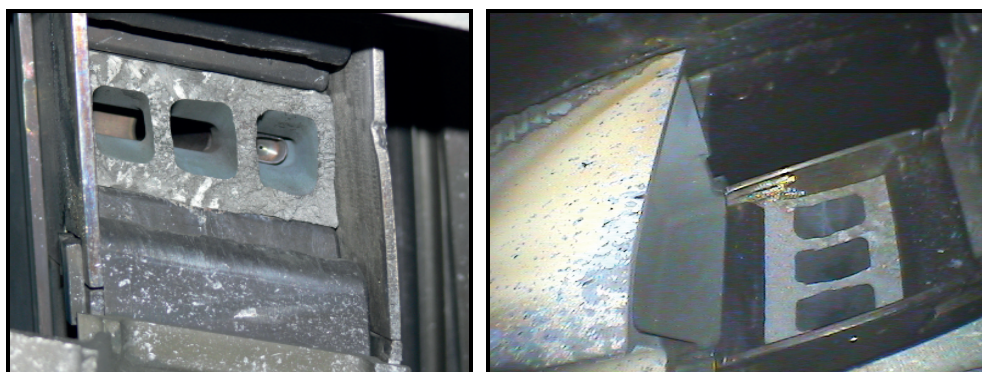


Рис. 1. Газотурбинный двигатель ГТД-110

Опытно-промышленная эксплуатация двигателя № 2 и промышленная эксплуатация двигателей № 3–7 выявили недостатки в конструкции рабочей лопатки 1-й ступени турбины, требующие разработки мероприятий по обеспечению надежности и увеличению ресурса.

Из результатов исследований фрагментов разрушившихся лопаток, проведенных ведущими институтами (ОАО ВТИ, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», ОАО «НПО ЦКТИ»), следует, что дефект носит усталостный характер, зоной зарождения трещины является галтель над средним (3 случая) или над верхним (3 случая) зубом (рис. 2). Кроме того, в заключениях отмечено снижение механических свойств и структурные изменения сплава рабочей лопатки 1-й ступени. В качестве причин возникновения дефекта рассматривались следующие: касание рабочих лопаток о статор на переходных режимах, влияние зазоров между трактовыми полками, работа на резонансных режимах, температурное состояние замкового соединения, нестабильные свойства сплава ЧС88У-ВИ.



а

б

**Рис. 2.** Разрушение рабочей лопатки 1-й ступени по галтели над средним зубом (а) и галтели над верхним зубом (б)

Проведенные аналитические, расчетные и экспериментально-исследовательские работы по определению причин разрушения рабочих лопаток позволили определить ряд факторов, оказывающих влияние на развитие следующих дефектов:

- касание рабочих лопаток о статорную часть на переходных режимах работы двигателя (подтверждено вибрографированием на двигателях № 4 и 7);
- высокие уровни измеренных напряжений на рабочей лопатке 1 ступени при прохождении резонансных режимов на 40-й и 48-й гармониках, что соответствует числу лопаток сопловых аппаратов 1-й и 2-й ступеней соответственно (результаты тензометрирования НПО «Машпроект»);
- длительный запуск двигателя до оборотов «Холостой ход», что увеличивает время нахождения на резонансных режимах;
- неравномерное распределение напряжений в замковом соединении, что обусловлено значительной разницей в коэффициенте теплового расширения материалов рабочей лопатки и диска (результаты расчетного анализа);
- особенности конструкции рабочей лопатки 1-й ступени турбины, заложенные при проектировании (массивная жесткая ножка, составляющая до 50 % массы лопатки, малая площадь сечения в месте перехода ножки в замок, узкая замковая часть и др., рис. 3);
- значительные градиенты температур в замковом соединении, вследствие низкой температурой кондиционируемого воздуха подводимого на охлаждение рабочей лопатки;
- высокая термонапряженность трактовой полки и неоптимальная схема охлаждения рабочей лопатки;
- малый относительный осевой зазор между сопловым аппаратом и рабочей лопаткой 1-й ступени;
- разрушение происходит в галтели над средним или верхним зубом со стороны входной кромки и спинки (по диагонали острого угла), что соответствует максимальным напряжениям при колебаниях по 2 форме (подтверждено расчетным анализом и экспериментальными работами по снятию полей напряжений);
- недостатки сплава ЧС88У-ВИ, обусловленные структурной нестабильностью.

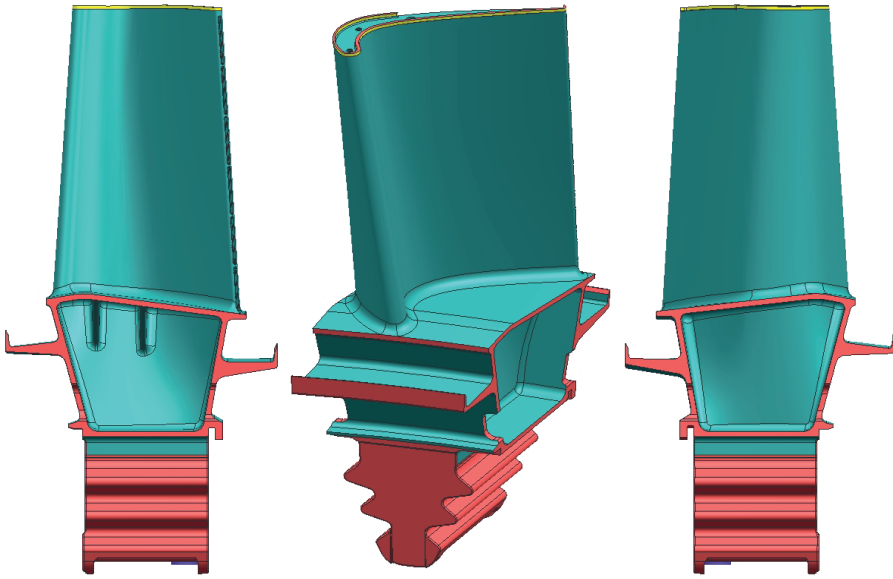


Рис. 3. Рабочая лопатка 1-й ступени турбины ГТД-110

Из анализа результатов расчетно-исследовательских работ следует, что основная причина разрушения рабочей лопатки — накопление повреждаемости при прохождении резонансных режимов во время запуска двигателя, остальные факторы являются сопутствующими и усугубляющими условия работы рабочей лопатки.

По результатам исследовательских работ определены мероприятия, направленные на устранение конструктивных недостатков и снижение динамического воздействия на рабочую лопатку в целом и зону разрушения в частности. Для снижения вероятности возникновения дефекта разработаны две группы мероприятий: оперативные (быстрое внедрение без существенных доработок материальной части) и перспективные (требующие детальной проработки и существенной/длительной доработки материальной части).

Для верификации расчетных моделей и оценки разработанных мероприятий необходимо проведение тензо- и термометрирования роторных и статорных деталей турбины в составе двигателя. Для обеспечения оперативного исследования частотных характеристик рабочих лопаток 1-й ступени различной конструкции, планируется провести исследование бесконтактного измерения амплитудно-частотных характеристик.

### Литература

- [1] Ольховский Г.Г., Березинец Н.П. Перспективы использования ГТЭ-110 в тепловой энергетике. *Газотурбинные технологии*, 2000, № 6.
- [2] Поваров О.А. Современные мощные парогазовые установки с КПД 58–60 %. *Новое в российской электроэнергетике*, 2006, № 9.
- [3] Романов В.В., Межибовский В.М. ГТД-110 — от проекта к реальности. *Газотурбинные технологии*, 2000, № 6.

- [4] Скирта С.М., Гасуль М.Р., Золотогоров М.С., Егоров И.Н. Экспериментально-расчетные исследования рабочих лопаток турбины ГТЭ-110. Тез. докл. LXI науч.-техн. сессии по проблемам газовых турбин парогазовых установок. Пермь, 2014.
- [5] Скирта С.М., Поткин А.Н., Карпов Ф.В., Немтырева И.А. Способ доводки рабочего колеса газотурбинного двигателя (ГТД). Пат. № 2548221 Российская Федерация МПК F 01 D. 2015, бюл. № 11, 11 с.
- [6] Фаворский О.Н. ГТУ — основа будущей энергетики России. URL: <http://www.engine.aviaport.ru> (дата обращения 15.03.2015).
- [7] Фаворский, О.Н. Повышение эффективности энергетики — стратегическая задача государства. Газотурбинные технологии, 2000, № 6.

УДК 629.02

## **Конструктивные изменения в силовой установке мотовездехода, позволяющие определить основные параметры и качественные характеристики работы клиноременного вариатора**

**© Стариков Александр Игоревич, Лукьянов Александр Сергеевич,  
Дмитриева Людмила Александровна**

Россия, г. Москва, Московский государственный  
машиностроительный университет

[alexigorevich@mail.ru](mailto:alexigorevich@mail.ru), [salek61@mail.ru](mailto:salek61@mail.ru), [daliavto@rambler.ru](mailto:daliavto@rambler.ru)

*Рассмотрена проблема настройки и регулировки клиноременного вариатора (КРВ), а также различные конструкции специальных деталей для настройки вариатора. Представлена экспериментальная испытательная силовая установка, встроенная в конструкцию мотовездехода. Конструкция самого клиноременного вариатора сохранена в первоначальном варианте, серийно выпускаемом заводом. Предложена схема взаимодействия ремня со шкивами вариатора.*

**Ключевые слова:** клиноременный вариатор, шкивы, контур ремня, силовая установка, результирующая сила, силы натяжения ремня.

Клиноременные вариаторы (КРВ) давно используются в транспортных машинах. Самое широкое распространение КРВ получили в легких транспортных средствах, таких как мотороллеры, квадроциклы, снегоходы (рис. 1) и других, как правило, недорогих средств с двигателями небольшой мощности.

В настоящее время более 90 % транспортных средств оснащены КРВ. В более тяжелых транспортных средствах с двигателями большей мощности наряду с другими трансмиссиями (механическими, гидротрансформаторами, роботизированными коробками передач) успешно конкурируют (до 28 %) более дорогие клиноцепные вариаторы (КЦВ), управляемые компьютером. Управление КРВ обеспечивают специальные детали нажимных механизмов. Слабым местом КРВ все еще остается

настройка и регулировка его оптимальной работы для различных дорог и стиля езды водителя. В настоящее время предлагаются различные конструкции специальных деталей для настройки: пружины, центробежные грузики, клиновые стаканы ведомых шкивов, как отдельно, так и в сборе (готовые комплекты) (рис. 2).



Рис. 1. Легкие транспортные средства и их силовая установка

Многие пользователи легких транспортных средств с КРВ в большинстве случаев самостоятельно дорабатывают детали шкивов, не покупая готовые комплекты настроенных под определенный стиль езды и специфику дороги из-за большой стоимости и частой смены необходимых комплектов.



Рис. 2. Детали для настройки шкивов КРВ (пружины, центробежные грузики, клиновые стаканы ведомых шкивов) и готовые комплекты ведущего и ведомого шкивов

Самостоятельная настройка КРВ сопровождается, как правило, длительными испытаниями и доводками конструкции специальных деталей до оптимальной. При этом самое сложное в этой работе — невозможность расчета всех параметров деталей КРВ, обеспечивающего положительные результаты с минимальными временными затратами.

Целью проекта являются: 1) разработка конструкции экспериментальной установки КРВ, встроенной в трансмиссию мотовездехода, и проведение дорожных испытаний последнего. Экспериментальная установка оборудована датчиками, позволяющими обеспечить высокую точность регистрации основных параметров работы КРВ; 2) разработка метода для определения основных силовых и скоростных параметров работы КРВ мотовездехода.

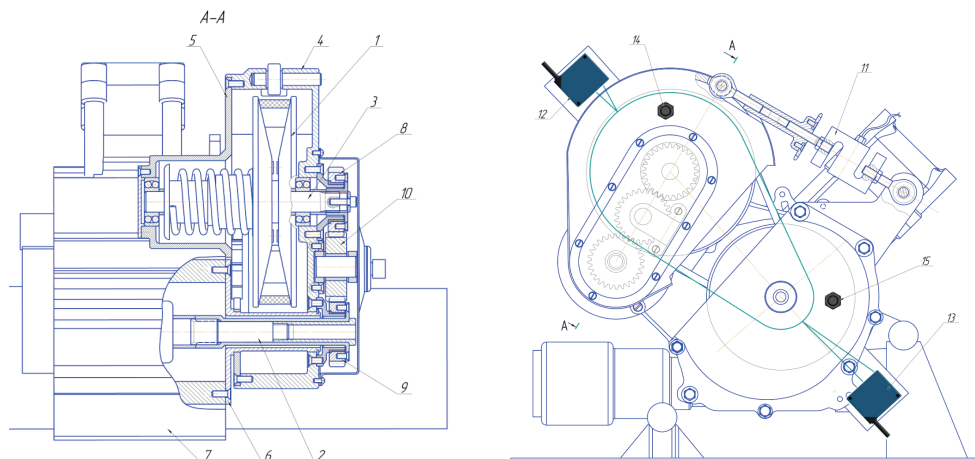
Специфика данной работы состоит в том, чтобы, не изменяя параметров трансмиссии серийного мотовездехода UTV-400, добавить несколько конструктивно встроенных деталей и датчиков, обеспечивающих регистрацию основных параметров

работы КРВ в дорожных испытаниях мотовездехода. При этом используется серийно выпускаемая заводом конструкция без изменений. Результаты дорожных испытаний этого мотовездехода позволяют определить правильность заводских настроек КРВ для данного транспортного средства (рис. 3).



**Рис. 3.** Экспериментальная испытательная силовая установка, встроенная в конструкцию мотовездехода

Особенность экспериментальной установки состоит в том, что все его основные параметры определяются через клиновой ремень вариатора — через натяжения его ветвей, диаметрального положения его на ведущем и ведомом шкиве и скорости вращения последних. Скорость вращения шкивов и диаметр расположения ремня на них может быть определен лазерными и фотодатчиками непосредственно. Усилия в ветвях ремня определить невозможно, так как динамометры нельзя расположить на ветвях ремня. Динамометры, расположенные в силовой установке (рис. 4) показывают только опосредованные параметры работы КРВ.



**Рис. 4.** Экспериментальная испытательная установка, встроенная в конструкцию мотовездехода

Значительно упрощает конструкцию установки расположение динамометра и тензобалки на отдельно спроектированных деталях, на которые в процессе работы КРВ передаются усилия в ветвях ремня. Показания этих датчиков должны быть математически обработаны по специальной методике и только после этого они могут быть использованы в окончательном анализе работы КРВ.

Усилия в ветвях  $F_1$  и  $F_2$  клинового ремня можно найти из схемы взаимодействия ремня со шкивами вариатора, представленной на рис. 5. Ремень взаимодействует со шкивами вариатора на дугах охвата. Свободные от охвата свободные ветви ремня натянуты с силами  $F_1$  и  $F_2$ , которые определяют результирующую силу  $F_a$  между двумя шкивами вариатора. При этом окружная сила  $F_t$  зависит от разности сил  $F_1$  и  $F_2$ . Окружная сила  $F_t$  в свою очередь, приложенная на соответствующем диаметре шкива, определяет его вращающий момент  $T$ .

Результирующая сила  $F_a$  от контура натянутого ремня между ведомым и ведущим шкивами проходит через точки  $C$  и  $B$  (см. рис. 5). Для нахождения этих точек силы натяжения  $F_1$ ,  $F_2$  переносятся на межцентровую ось  $O_1O_2$  в точку  $O$ . При сложении этих сил получаем результирующую силу  $F_a$ , проходящую через точку  $B$  дуги охвата ремня ведущего шкива и точку  $C$  дуги охвата ремня ведомого шкива.

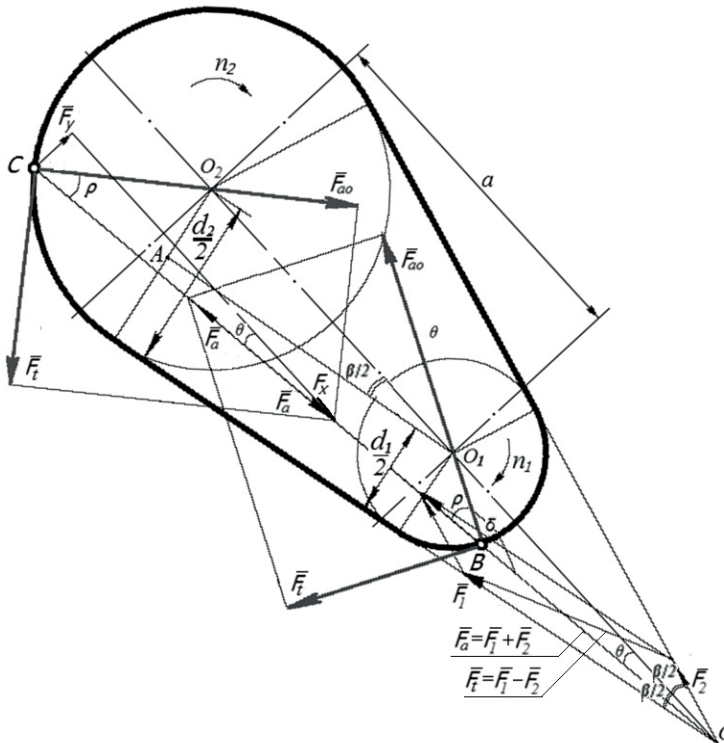


Рис. 5. Схема взаимодействия ремня со шкивами вариатора

Динамометр  $11$  в нашей установке замеряет составляющую  $F_y$ , а тензобалка  $6$  — составляющую  $F_x$ . Динамометр и тензобалка определяют не только направление



(угол  $\theta = \arctg(F_y/F_x)$  к оси  $O_1O_2$ ), но и численное значение результирующей силы (см. рис. 5):

$$F_a = (F_x^2 + F_y^2)^{0,5}.$$

Из прямоугольного треугольника  $O_1AO_2$  с острым углом  $\beta/2$  (см. рис. 5) имеем

$$a = 0,5(d_2 - d_1) \frac{\operatorname{tg} \beta}{2}, \text{ или } \beta = 2 \arctg\left(\frac{0,5(d_2 - d_1)}{a}\right).$$

Согласно рис. 5, угол между силами  $F_2$  и  $F_a$

$$\psi = 0,5\beta + \theta,$$

где  $\theta = \arctg(F_y/F_x)$ .

Из свойств параллелограмма и треугольника  $OKM$ :

$$\gamma + \beta = 180^\circ; \quad \psi + \gamma + \alpha = 180^\circ.$$

Тогда в треугольнике  $OKM$  угол

$$\alpha = 180^\circ - \psi - \gamma = 0,5\beta - \theta.$$

Из теоремы синусов для треугольника  $OKM$  при известных углах  $\psi$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  и гипотенузе  $F_a$  следует:

$$F_1 = F_a \frac{\sin \psi}{\sin \gamma}; \quad F_2 = F_a \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}.$$

Следовательно, при известных  $F_a$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $a$  и всех углах  $\psi$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ , можно найти значения натяжения ведущей  $F_1$  и ведомой  $F_2$  ветви ремня [1–3].

Таким образом, для экспериментальных исследований разработана компактная испытательная установка, встроенная в конструкцию мотовездехода, позволяющая проводить дорожные испытания. Внесенные конструктивные изменения не повлияют на условия нагружения и работу основных устройств мотовездехода. Измерение реакций ведомого шкива на изменяющиеся натяжения ветвей клиноременной передачи позволило более точно отобразить процесс работы АКВ в силовой установке мотовездехода с минимальным количеством датчиков.

## Литература

- [1] Пронин Б.А., Ревков Г.А. *Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы)*. Москва, Машиностроение, 1980, 404 с.
- [2] Лукьянов А.С., Шнырев Р.А. Разработка метода определения силовых и скоростных параметров работы автоматического клиноременной вариатора мотовездехода в дорожных условиях. *Материалы 77-й Междунар. науч.-техн. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров»*. Кн. 1. Москва, Московский государственный технический университет «МАМИ», 2012, с. 105–111.
- [3] Баловнев Н.П., Дмитриева Л.А. Расчет клиноременных передач сельхозмашин с автоматическим натяжением ремня. *Тракторы и сельхозмашины*, 2014, № 9, с. 39–41.

УДК 621.436.038

## Топливный аккумулятор регулируемого объема аккумуляторной системы подачи топлива дизеля

© Субботенко Дмитрий Игоревич, Обозов Александр Алексеевич

Россия, г. Брянск, Брянский государственный технический университет

[Subbotenko.di@yandex.ru](mailto:Subbotenko.di@yandex.ru)

*Разработан топливный аккумулятор регулируемого объема, позволяющий быстро изменять его объем с помощью электромагнитного клапана. Предлагаемый аккумулятор соответствует все предъявляемым к нему требованиям, обеспечивая малый объем аккумулирующей полости на пусковых и переходных режимах для быстроты их протекания и большой объем на установившихся режимах, для уменьшения колебания давления.*

**Ключевые слова:** *дизельный двигатель, топливная аппаратура, аккумуляторная топливная система, топливный аккумулятор.*

В настоящее время наблюдается резкое ужесточение экологических требований, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания. Эффективным способом улучшения экологичности дизельного двигателя является оптимизация процесса топливоподачи, требующей совершенствования топливной аппаратуры.

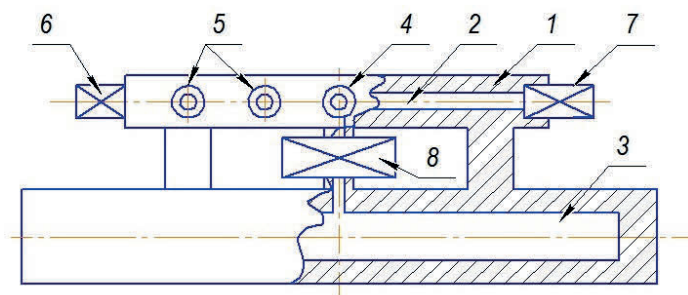
Разработке перспективных топливных систем, обеспечивающих высокие экологические и экономические параметры дизелей, уделяется особое внимание. Исследования этих проблем проводятся в МГТУ им. Н.Э. Баумана, АлтГТУ им. Ползунова, ВЗПИ (г. Коломна), БГТУ (Беларусь, Минск) и в других вузах.

Подачу топлива в цилиндры двигателя необходимо осуществлять под, максимально возможным постоянным давлением. Для этого необходимо уменьшить колебания давления в топливном аккумуляторе, так как от него через трубопроводы высокого давления осуществляется подача топлива к форсункам.

Топливный аккумулятор должен сглаживать колебания от подачи топлива ТНВД и впрыска форсунок. Во всех современных дизелях задается допустимая амплитуда колебаний, для дизелей легковых автомобилей она составляет 50 бар. При выборе объема топливного аккумулятора возникает противоречивая задача: для уменьшения колебаний требуется топливный аккумулятор большого объема чтобы уменьшить их величину, а для быстрого протекания переходных процессов (пуска двигателя и обеспечения быстрого перехода с одного рабочего режима на другой) требуется аккумулятор малого объема.

Задача данной работы — оптимизация выбросов вредных веществ и уменьшения расхода топлива путем регулирования объема топливного аккумулятора системы подачи топлива дизеля.

Для решения данной задачи необходимо сочетание в топливном аккумуляторе малого объема на пусковых и переходных режимах, и одновременно значительно большего объема на установившихся режимах для уменьшения колебаний давления.



**Рис. 1.** Топливный аккумулятор регулируемого объема системы подачи топлива дизеля

В работе предлагается конструкция топливного аккумулятора высокого давления аккумуляторной системы подачи топлива дизеля (рис. 1), состоящая из толстостенного корпуса 1, камеры малого объема 2, камеры большого объема 3, штуцера подвода топлива от топливного насоса высокого давления 4, штуцеров подвода топлива к электрогидравлическим форсункам 5, датчика давления топлива 6, предохранительного клапана 7 и электромагнитного клапана регулирования давления 8.

Топливный аккумулятор позволяет регулировать объем от минимального на режимах пуска (для обеспечения надежного и быстрого пуска) и переходных режимах (для обеспечения быстрого перехода на другой режим) до максимального на установившихся режимах (для поддержания практически постоянного давления и равномерности подачи). Все это позволит оптимизировать процесс сгорания, тем самым снизить не только эмиссию вредных выбросов с отработавшими газами дизелей, но и удельный расход топлива.

Принцип работы топливного аккумулятора состоит в следующем. Топливо от топливного насоса высокого давления через штуцер 4 подается в камеру малого объема 2. На режиме пуска двигателя или переходном режиме электромагнитный клапан 8 закрывается, тем самым препятствуя увеличению объема топливного аккумулятора за счет камеры большого объема 3, позволяя топливному насосу высокого давления быстрее изменить давление в аккумуляторе и осуществить надежный и быстрый пуск двигателя или быстрее пройти переходный режим, характеризующийся плохими экологическими и экономическими параметрами. Если же двигатель вышел на установившийся режим, электромагнитный клапан 8 пульсирующе открывается-закрывается, пока давление в камерах 2 и 3 не стабилизируется и остается открытым для поддержания максимального объема и как следствие практически постоянного давления в топливном аккумуляторе и сглаживания колебания от подачи топлива топливным насосом и впрыскивания электромагнитными форсунками. Для достижения оптимизации объема топливного аккумулятора высокого давления объем камеры 3 должен значительно превосходить объем камеры 2, более чем в 2 раза.

Таким образом, топливный аккумулятор позволяет регулировать объем во всем диапазоне рабочих режимов, в том числе на режимах пуска, тем самым позволяя осуществить надежный и быстрый пуск двигателя и снизить расход топлива и эмиссию вредных веществ, благодаря оптимизации процесса сгорания.

## Литература

- [1] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей*. Москва, Легион-Автодата, 2005, 344 с.
- [2] Обозов А.А., Субботенко Д.И. Электронное управление и система топливоподачи Common Rail как перспективное направления улучшения характеристик дизельного двигателя. *Вестник БГТУ*, 2014, № 4, с. 80–86.
- [3] Субботенко Д.И. *Топливный аккумулятор высокого давления аккумуляторной системы подачи топлива дизеля*. Пат. 151879 Российская Федерация. 2015.

УДК 629.7.036.3: 621.515

## Исследование причин разрушения лопаток статора компрессора высокого давления приводного ГТД

© Тимиргалеев Шамиль Раисович<sup>1</sup>, Такмовцев Владимир Викторович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, Республика Татарстан, г. Казань,  
ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»

<sup>2</sup> Россия, Республика Татарстан, г. Казань,  
Казанский национальный исследовательский технический университет  
имени А.Н. Туполева

[shamil.86bee@mail.ru](mailto:shamil.86bee@mail.ru), [yvt379@rambler.ru](mailto:yvt379@rambler.ru)

*Представлены результаты исследования причин разрушения лопаток статора осевого компрессора высокого давления приводного ГТД, работающего в составе ГПА. Установлены причины снижения запасов по усталостной прочности материала лопаток в зоне выходной кромки, где возникали повышенные значения напряжений, обусловленные некачественной заправкой радиуса выходной кромки. Выполнен анализ мероприятий, направленных на устранение данного дефекта в процессе эксплуатации двигателя.*

**Ключевые слова:** компрессор высокого давления, направляющий аппарат, лопатки, дефект, исследование, этапы доводки.

Газотурбинные установки, используемые для сжатия природного газа, транспортируемого по магистральным трубопроводам, имеют назначенный ресурс 100 000 ч и более. Для обеспечения данного показателя требуется повышение ресурса отдельных деталей и узлов. В данной работе представлены результаты исследования разрушений лопаток направляющего аппарата (НА) статора осевого компрессора высокого давления (КВД) двигателя НК-38СТ в процессе эксплуатации.

В начале 2015 г. при разборке двух двигателей НК-38СТ на ОАО «КМПО», имеющих наработку 1 300 и 5 000 ч, снятых с эксплуатации после аварийного останова с сообщением «Помпаж двигателя» был выявлен дефект — повреждение на рабочих лопатках КВД. Причиной возникновения данного дефекта стал обрыв 2/3 части пера направляющей лопатки 1-й ступени статора КВД, что, в свою очередь,

привело к повреждениям лопаток других ступеней КВД. По результатам анализа причин возникновения дефекта обрыва лопатки НА статора 1-й ступени КВД был разработан алгоритм доводки, направленный на устранение этого дефекта, и содержащий несколько последовательных этапов действий.

Первый этап — измерение частот собственных колебаний (ЧСК) направляющих лопаток 1-й ступени, не имеющих повреждения. Полученные значения ЧСК сравнивались с паспортными данными. Затем проводились замеры ЧСК дефектных лопаток. Установлено, что значения ЧСК дефектных лопаток находились в середине диапазона частот остальных лопаток комплекта.

Второй этап — проведение металлургического исследования разрушенной направляющей лопатки 1-й ступени статора КВД. В процессе исследования установлено, что разрушение лопатки усталостное, многоочаговое, с началом развития трещины от радиуса выходной кромки. Траектория разрушения проходит практически перпендикулярно от кромки до кромки. Поверхность излома окислена до темно-серого цвета. Металлургических дефектов в изломах исследованных трещин обнаружено не было.

Третий этап — по результатам металлургического исследования дополнительно проведено измерение геометрии выходных кромок лопаток. По результатам измерений выявлено наличие отклонений в части занижения радиуса выходной кромки в 3 раза от номинального значения и несоответствие толщины выходных кромок размерам, заданных по чертежу. Фактически в местах излома имеет место уменьшение толщины выходной кромки, а ближе к торцу пера лопатки — ее увеличение.

Четвертый этап — проверка технологической дисциплины при изготовлении лопаток НА КВД. В результате проверки выявлено отсутствие достаточных методов и средств, позволяющих производить достоверный контроль геометрии кромок лопаток компрессора.

Пятый этап — проведение усталостных испытаний лопаток КВД. Выполненные испытания подтвердили, что разрушение направляющей лопатки происходит от выходной кромки в результате занижения геометрии кромок.

Таким образом, внедрение в производство разработанного алгоритма доводки по надежности лопаток осевого компрессора позволило установить, что возникновение дефекта «Обрыв лопатки НА статора первой ступени КВД» вызвано воздействием колебаний, возбуждаемых аэродинамическими силами воздушного потока в условиях работы двигателя. Разрушение произошло в результате снижения запасов по усталостной прочности материала лопатки в зоне выходной кромки, где возникали повышенные значения напряжений, обусловленные некачественной заправкой радиуса выходной кромки. Другими словами, отклонение размеров радиуса выходной кромки от заданных по чертежу являются причиной возникновения в этом месте концентратора повышенных напряжений, вызывающих разрушение направляющей лопатки.

В заключение следует отметить, что рассмотренный в данной работе дефект производственный, носит случайный характер и связан с отсутствием достаточных методов и средств, позволяющих проводить достоверный контроль геометрии кромок лопаток компрессора. Повышение технологической дисциплины при изготовлении лопаток НА КВД за счет внедрения высокоэффективных способов неразрушающего контроля позволит полностью устранить появление данного дефекта в процессе эксплуатации.

## Энергоэффективная модернизация и автоматизация котельных

© Третьяков Сергей Алексеевич<sup>1,2</sup>, Хвостов Вячеслав Алексеевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российская Федерация, г. Брянск,

ООО «Научно-производственное объединение “Электронтехника”»

<sup>2</sup> Российская Федерация, г. Брянск,

Брянский государственный технический университет

[yx-serj@ya.ru](mailto:yx-serj@ya.ru), [et32@et.ru](mailto:et32@et.ru)

*Представлен проект модернизации действующих котельных с использованием энергосберегающих технологий, который позволит достичь экономии электроэнергии на насосных станциях и вентиляторах до 30...35 %, достичь экономии топлива до 15 %, снизить материальные затраты на техническое обслуживание и модернизацию оборудования за счет значительного увеличения его ресурса, исключить динамические и электрические перегрузки при запуске агрегатов котельной, повысить межремонтный срок службы оборудования, снизить влияние человеческого фактора, улучшить экологическую обстановку.*

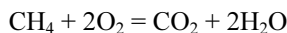
**Ключевые слова:** котельная, устройство автоматического контроля и управления котлоагрегатом, станция управления электронасосом, импульсатор.

В настоящее время только на территории Брянской области работает более 120 котельных, которым требуется модернизация. В большинстве из них системы управления морально и физически устарели. В связи с чем, существует ряд проблем, таких как:

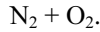
- высокие энергозатраты насосных станций горячего водоснабжения, которые постоянно работают на полную мощность вне зависимости от текущего потребления воды;
- при ручном управлении процессом горения невозможно обеспечить его оптимальный режим в зависимости от давления, разрежения и температур. Для обеспечения качественного горения газа необходимо в достаточном количестве подвести воздух в зону горения и добиться хорошего перемешивания газа с воздухом. Оптимальным считается соотношение 1 : 10, т. е. на одну часть газа приходится десять частей воздуха. Кроме этого необходимо создание нужного температурного режима. Чтобы газ воспламенился необходимо его нагреть до температуры воспламенения и в дальнейшем опускать температуру ниже значения воспламенения.

Полное сгорание газа соответствует формуле

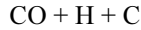
метан + кислород = углекислый газ + вода



Кроме этих газов в атмосферу с горючими газами выходит азот и оставшийся кислород:



Если сгорание газа происходит не полностью, то в атмосферу выбрасываются горючие вещества — угарный газ, водород, сажа:



Неполное сгорание газа приводит к ухудшению экологической обстановки:

- образующаяся сажа оседает на стенках котлов, ухудшая тем самым передачу тепла теплоносителю, снижает эффективность работы котельной;
- существенное влияние человеческого фактора на технологический процесс. Вручную невозможно оптимально сбалансировать все параметры процесса горения;
- образование накипи в трубопроводе теплообменника и как следствие снижение теплопередачи.

Строительство и ввод в эксплуатацию новых котельных требует больших финансовых затрат.

Проект предусматривает модернизацию действующих котельных с использованием энергосберегающих технологий и осуществляется с применением системы автоматизации котлоагрегата, промышленного контроллера и разработкой современных алгоритмов управления. Система автоматизации котлоагрегата включает в себя:

1) *устройство контроля и управления работой котлоагрегата в автоматическом режиме*, позволяющее достичь экономии топлива и повысить КПД котлоагрегата.

КПД котлоагрегата учитывает степень использования тепла топлива в котлоагрегате и представляет собой отношение количества полезно выработанного к затраченному:

$$\eta_{\text{к.а}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{затр}}} \cdot 100 \%,$$

или

$$\eta_{\text{к.а}} = \frac{D_{\text{п.п}}(i_{\text{п.п}} - i_{\text{п.в}}) + D(i_{\text{п}} - i_{\text{п.в}}) + G_{\text{пр}}(i_{\text{к.в}} - i_{\text{п.в}})}{BQ_{\text{н}}^{\text{P}}} \cdot 100 \%,$$

где  $D_{\text{п.п}}$  — расход выработанного котлоагрегатом перегретого пара, т/ч;  $D$  — расход насыщенного пара из барабана котла, т/ч;  $G_{\text{пр}}$  — расход продувочной воды, учитываемый при значении продувки более 2 % паропроизводительности котлоагрегата, т/ч;  $i_{\text{п.п}}$  — энтальпия (теплосодержание) перегретого пара, ккал/кг;  $i_{\text{п.в}}$  — энтальпия питательной воды, являющейся смесью возвращаемого от потребителей конденсата и химически очищенной воды, ккал/кг;  $i_{\text{п}}$  — энтальпия насыщенного пара, ккал/кг;  $i_{\text{к.в}}$  — энтальпия котловой воды, ккал/кг;  $B$  — расход топлива на котлоагрегате, т/ч или тыс. м<sup>3</sup>/ч;  $Q_{\text{н}}^{\text{P}}$  — низшая теплота сгорания топлива, ккал/кг или ккал/м<sup>3</sup>.

Как следует из формулы, уменьшая расход топлива на котлоагрегате, повышается его КПД.

Устройство автоматического контроля и управления котлоагрегатом включает контроллер и связанные с ним в виде частотных преобразователей системы управления подачи топлива, воздуха и удаления продуктов сгорания, а также датчики тягодутьевых параметров котлоагрегата. Устройство выполнено с возможностью обеспечения оптимальных условий функционирования котлоагрегата посредством автоматического управления подачей топлива, воздуха и удаления продуктов сгорания при помощи заранее заданных значений параметров температурного графика, формируемых с отдельного пульта управления, с учетом текущих контролируемых

значений тягодутьевых параметров и дополнительно оборудовано блоками розжига топочного устройства котлоагрегата, аварийной сигнализации, резервного ручного управления.

Устройство работает следующим образом. По команде запуска устройство автоматически розжигает котлоагрегата по определенному алгоритму розжига котла, включающему три основных этапа:

- 1) вентиляцию котлоагрегата;
- 2) автоматический розжиг;
- 3) регулирование температуры в трубопроводе прямой и обратной подачи воды котлоагрегата согласно заданному температурному графику.

С пульта управления задается температурный график работы, параметры которого поступают в контроллер. Сюда же передаются текущие контролируемые значения температуры наружного воздуха и скорости ветра с соответствующих датчиков, а также значения с датчиков температуры воды в трубопроводе прямой и обратной подачи воды с датчиков температуры, значения оксидов дымовых газов с кислородного датчика и газоанализатора оксида углерода. На основе результатов сравнения контроллер обеспечивает формирование управляющих воздействий на частотные преобразователи. Преобразователи частоты управляют асинхронными двигателями исполнительных механизмов вентилятора подачи воздуха в топку котлоагрегата и вентилятора дымососа. При этом контроллер регулирует температуру нагрева воды в трубопроводе прямой и обратной подачи котлоагрегата, уменьшая или увеличивая подачу топлива с помощью системы подачи топлива. Также он одновременно регулирует количество подаваемого в камеру сгорания воздуха с помощью системы подачи воздуха и разрежение в дымовом тракте с помощью системы удаления продуктов сгорания для обеспечения оптимальных условий горения. Таким образом достигаются оптимальные условия функционирования котлоагрегата.

При выходе из строя любого датчика, участвующего в процессе регулирования, контроллер может управлять процессом горения по другим алгоритмам:

- режим 1 — только по предварительным замерам. При измерении расхода газового топлива контроллер по заложенному в нем соотношению изменяет расход воздуха;
- режим 2 — по предварительно замеренным расходам воздуха и газового топлива и по СО контроллер корректирует воздух для полного сгорания;
- режим 3 — по предварительно замеренному соотношению расхода воздуха и по выходу кислорода корректирует расход воздуха до минимума кислорода в отходящих газах.
- режим 4 — по выходу датчиков по СО и по  $O_2$  контроллер корректирует расход воздуха до  $CO \approx 0,1 \dots 0,2\%$  и  $O_2 = 0$ , который обеспечивает максимальный КПД котла.

В случае отказа любого блока, либо при возникновении аварийных ситуаций контроллер выдает команду на включение аварийной сигнализации, оповещающей обслуживающий персонал.

На данное устройство подана заявка о выдаче патента на полезную модель;

2) *система автоматического поддержания заданного давления в контуре горячего водоснабжения*, которая управляет производительностью насоса в зависимости от текущего водопотребления. Основой этой системы является станция управления электронасосом СУ-ЭН. Она применяется в системах горячего и холодного водоснабжения для автоматического регулирования частоты вращения электродвигателя насоса по обратной связи от датчика давления в зависимости от задания оператора или системы управления. Типовые насосные агрегаты функционируют без учета из-



меняющегося расхода воды. При этом известно, что существуют пики «разбора» воды, и, если не использовать регулирование, то бесполезно расходуются значительное количество электроэнергии (рис. 1);



Рис. 1. Суточный график расхода электроэнергии электронасоса мощностью 55 кВт при различных способах управления

3) *импульсатор, предотвращающий образование накипи на стенках труб теплообменника*. Импульсатор за счет подачи электромагнитных импульсов на входные и выходные трубы теплообменника создает эффект магнитострикции. Вследствие колебаний воды в трубах происходит очистка труб от солей и отложений, которые поступают в отстойник.

По данным всероссийского научно-исследовательского теплотехнического института им. Дзержинского, при наличии накипи толщиной 4...5 мм, котел перерасходует топлива, в среднем, до 8...10 % (рис. 2).

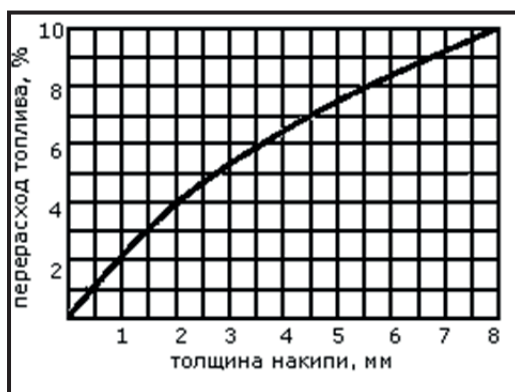


Рис. 2. Зависимость перерасхода топлива от толщины накипи на стенках теплообменника

Части элементов данной системы автоматизации сейчас уже разработаны и введены в эксплуатацию на котельных г. Брянска.

В целом данная система позволяет:

- достичь экономии электроэнергии по насосным станциям и вентиляторам до 30...35 %;
- достичь экономии топлива до 15%;
- сократить материальные затраты на техническое обслуживание и модернизацию оборудования за счет значительного увеличения его ресурса;
- исключить динамические и электрические перегрузки при запуске агрегатов котельной;
- повысить межремонтный срок службы оборудования;
- уменьшить влияние человеческого фактора;
- улучшить экологическую обстановку;
- снизить рост тарифов ЖКХ.

Срок окупаемости затрат по одной котельной составляет 6–8 месяцев.

### Литература

- [1] Деменков Н.П. Языки программирования промышленных контроллеров. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 172 с.
- [2] Соколов Б.А. *Котельные установки и их эксплуатация*. Москва, Академия, 2007, с. 432.
- [3] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Москва, Академия, 2008, 272 с.

УДК 621.45.01:004.942

## **Исследование и прогнозирование теоретической максимальной эффективности ГТД традиционных схем на основе методов численного моделирования**

**© Филинов Евгений Павлович, Остапюк Ярослав Анатольевич,  
Крупенич Илья Николаевич**

Россия, г. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

[filinov.evg@gmail.com](mailto:filinov.evg@gmail.com), [oya92@mail.ru](mailto:oya92@mail.ru)

*Проведено исследование и прогнозирование теоретической максимальной эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) традиционных схем на основе методов численного моделирования в САЕ — системе АСТРА. Актуальность исследования обусловлена необходимостью определения максимально достижимой эффективности ГТД и целесообразности перехода на принципиально новые варианты силовых установок летательных аппаратов. По результатам моделирования повышения эффективности термодинамического цикла сделаны комплексные выводы.*

**Ключевые слова:** эффективность ГТД, термодинамический цикл, метод численного моделирования.

В настоящее время в области авиационного двигателестроения существует мнение, что ГТД традиционных схем морально устарели и необходимо двигаться в принципиально новом направлении, чтобы получить значительный прирост эффективности силовой установки. В данной работе исследована теоретическая максимальная эффективность ГТД традиционных схем.

Анализ доступных в открытой печати источников показывает, что пути дальнейшего совершенствования ГТД традиционных схем можно условно разделить на три группы:

- 1) снижение потерь в элементах двигателя и расхода охлаждающего воздуха;
- 2) повышение эффективности термодинамического цикла;
- 3) повышение эффективности силовой установки как движителя.

Рассмотрим, каковы предельные возможности повышения эффективности ГТД традиционных схем для одного из этих направлений на основе численного моделирования двухконтурного турбореактивного двигателя с использованием автоматизированной системы термогазодинамического расчета и анализа АСТРА.

Моделирование будем производить для условий длительного крейсерского полета на высоте  $H = 11$  км, при скорости полета  $M_n = 0,8$  ( $V_n \approx 850$  км/ч). В качестве базового варианта двигателя, характеризующего текущий уровень развития авиационной техники, рассматривался трехвальный ТРДД с отдельным истечением потоков, основные параметры которого приведены ниже:

Коэффициент восстановления полного давления во входном устройстве .....	1,0
Степень двухконтурности .....	11
Степень повышения давления в наружном контуре вентилятора .....	1,54
КПД наружного контура вентилятора .....	0,93
КПД внутреннего контура вентилятора .....	0,91
КПД компрессора СД .....	0,91
КПД компрессора ВД .....	0,9
Суммарная степень повышения давления компрессора .....	56
Температура газа на входе в турбину ВД, К .....	1500
Коэффициент полноты сгорания топлива .....	0,995
Коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания .....	0,955
Относительный отбор воздуха на охлаждение турбины ВД .....	0,08
КПД турбины ВД .....	0,925
Относительный отбор воздуха на охлаждение турбины СД .....	0,05
КПД турбины СД .....	0,92
Относительный отбор воздуха на охлаждение турбины НД .....	0,02
КПД турбины НД .....	0,93
Коэффициент восстановления полного давления в канале наружного контура ....	1,0
Коэффициент скорости сопла внутреннего контура .....	0,99
Коэффициент скорости сопла наружного контура .....	0,99

При моделировании ТРДД в условиях длительного крейсерского полета изменились параметры цикла основного контура в широких пределах: температуры газа перед турбиной  $T_r^* = 1\ 500 \dots 2\ 500$  К и  $\pi_{к\Sigma}^* = 40 \dots 1\ 200$ . Параметры силовой установки как движителя сохранялись идентично базовому варианту: степень двухконтурности  $m = 11$ , а степень повышения давления в наружном контуре вентилятора (определя-

ющая распределение энергии между контурами ТРДД) оптимизировалась из условия минимизации удельного расхода топлива  $\pi_{\text{вп}}^* \rightarrow \text{opt}$ . Полученные результаты приведены на рис. 1. При изменении  $T_{\text{г}}^*$  от 1 500 до 2 500 К оптимальное значение  $\pi_{\text{вп}}^*$  изменяется в диапазоне от 1,4 до 1,85.

Эффективность базового варианта ТРДД характеризуется величиной удельного расхода топлива, равной 48,47 кг/(кН·ч).

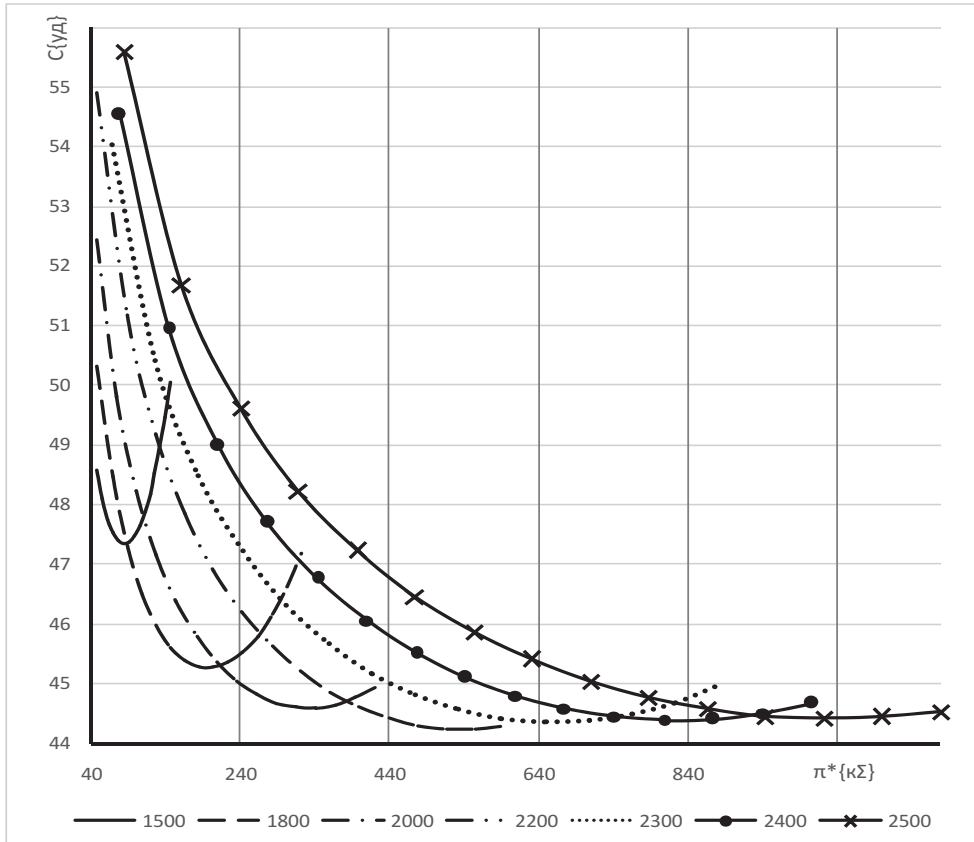


Рис. 1. Зависимость эффективности ТРДД от параметров рабочего процесса основного контура

Как видно на рис. 1, минимум удельного расхода топлива наблюдается как по суммарной степени повышения давления (противоположное влияние снижения подвода тепла к рабочему телу и роста термического КПД двигателя), так и по температуре газа перед турбиной (противоположное влияние снижения доли потерь в величине располагаемой химической энергии топлива и повышения потерь кинетической энергии).

Необходимо подчеркнуть, что степень двухконтурности сохранялась постоянной, а исследовалось обособленное влияние параметров рабочего процесса основного контура ТРДД (тепловой машины). По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1) оптимум по двум рассматриваемым параметрам рабочего процесса основного контура достигается при температуре газа ~ 2200 К и соответствующей степени повышения давления в компрессоре около 530:

$T_r^*$ , К	1 500	1 500	1 800	2 000	2 200	2 300	2 400	2 500
$\pi_{к\sigma}^*$	56	84	200	340	530	650	800	1 020
$C_{уд}$ , кг/(кН · ч)	48,1	47,35	45,27	44,59	44,24	44,35	44,39	44,42
$\delta C_{уд}$ , %	—	-1,6	-5,9	-7,3	-8,0	-7,8	-7,7	-7,7

Предельное повышение эффективности ТРДД при повышении параметров рабочего процесса основного контура составляет около 8 %;

2) повышение температуры газа перед турбиной до 2 200 К возможно в ближайшем будущем (5–10 лет); однако обеспечение суммарной степени повышения давления в компрессоре до значения 500 представляет существенные сложности (особенно с учетом обеспечения высоких КПД лопаточных машин и их газодинамической устойчивости при работе на различных режимах и в условиях переходных процессов, что является темой для отдельного исследования). Суммарная степень повышения давления, необходимая лишь для сохранения удельного расхода топлива на базовом уровне при  $T_r^* = 2 200$  К, достигает ~ 160. Достижение и этого уровня суммарной степени повышения давления в ближайшей перспективе представляет существенные сложности;

3) оптимальная суммарная степень повышения давления, соответствующая  $T_r^* = 1 500$  К (базового двигателя), составляет около 90 (выше в 1,6 раз). Достижение такого значения  $\pi_{к\sigma}^*$  обеспечит снижение удельного расхода топлива примерно на 1,5 %; это возможно уже в краткосрочной перспективе;

4) при отклонении величины  $\pi_{к\sigma}^*$  от оптимального значения в 1,3 раза в сторону как меньших, так и больших значений удельный расход топлива меняется менее чем на 1 %.

## Литература

- [1] Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Рыбаков В.Н. Формирование виртуальной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя в САЕ системе АСТРА. *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 2013, № 67, 15 с.
- [2] Кулагин В.В. *Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: В 2 кн. Кн. 1: Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн. 2: Основы теории ГТД. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики*. Москва, Машиностроение, 2003, 615 с.
- [3] Кулагин В.В., Бочкарев С.К., Горюнов И.М. и др. *Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Кн. 3: Основные проблемы: начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД*. Москва, Машиностроение, 2005, 464 с.
- [4] Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н., Остапюк Я.А., Филинов Е.П. Имитационное моделирование рабочих процессов газотурбинных двигателей. *Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докл. Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 25–27 июня 2014 г.* Самара, СГАУ, 2014, ч. 1, с. 232–234. URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/c28/c28cebd188b7e5afafe2f3c5b5444af2.pdf> (дата обращения 12.03.2015).

## Разработка гибридного мотоцикла

© Филькин Евгений Михайлович, Гайтова Тамара Борисовна

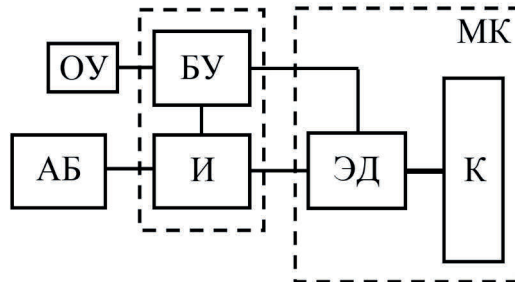
Россия, г. Москва, Московский государственный  
машиностроительный университет (МАМИ)

[filkinem@yandex.ru](mailto:filkinem@yandex.ru)

*Описана разработка гибридного мотоцикла небольшой мощности. Гибридная силовая установка данного мотоцикла основана на параллельной работе двигателя внутреннего сгорания объемом 49,9 см<sup>3</sup> и синхронного электродвигателя мощностью 3 кВт. Приведены результаты расчета запаса хода мотоцикла, движущегося от электрической тяги и результаты расчета путевого расхода топлива.*

**Ключевые слова:** гибридный мотоцикл, гибридная силовая установка, электрический мотоцикл, электропривод, двигатель внутреннего сгорания.

В процессе создания гибридного мотоцикла был рассчитан и разработан тяговый электропривод. Блок-схема электропривода представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Блок-схема электропривода:

ОУ — органы управления (информационный дисплей, ручки газа и тормоза); БУ — блок управления; АБ — аккумуляторные батареи; И — инвертор; ЭД — электродвигатель; К — колесо; МК — мотор-колесо

На схеме представлены основные элементы, обеспечивающие работу электропривода в режимах тяги и торможения. В режиме разгона инвертор подает на электродвигатель 3-фазное напряжение и переключает фазы по сигналам датчиков положения ротора (расположенных в электродвигателе). Представленная схема в режиме торможения обеспечивает рекуперацию. При торможении инвертор работает в качестве выпрямителя за счет входящих в него, обратных диодов.

Блок-схема электропривода, приведенная на рис. 1, взята за основу для создания электрического мотоцикла (рис. 2). Электропривод этого мотоцикла состоит из следующих узлов и компонентов:

- инвертор, реализованный на силовых N-канальных транзисторах irfp4468;
- блок управления, основанный на микроконтроллере и размещенный в одном корпусе с инвертором;
- аккумуляторные батареи LiFePO емкостью 60 А · ч;
- синхронный электродвигатель (мотор — колесо) мощностью 3 кВт.



Рис. 2. Экспериментальная модель электрического мотоцикла

Номинальное напряжение электрического привода составляет 48 В. Электродвигатель мощностью 3 кВт позволяет электрическому мотоциклу массой 160 кг (с учетом водителя) разогнаться до максимальной скорости 60 км/ч. Запас хода данного электрического мотоцикла, рассчитанный по циклу НАМИ (рис. 3), составляет 90 км. При выполнении расчета учитывалась энергия, полученная от рекуперативного торможения.

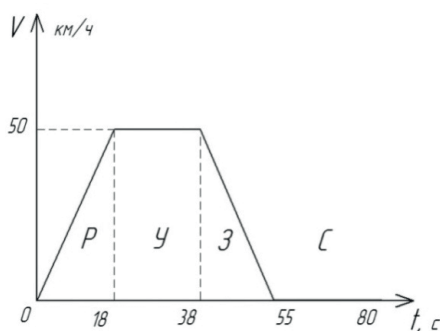


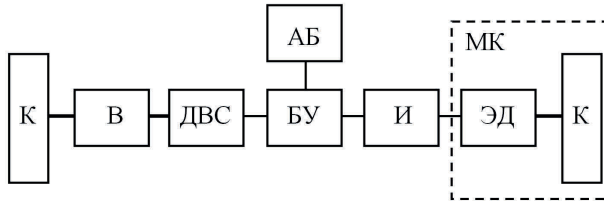
Рис. 3. Городской цикл НАМИ

Исходные данные, по которым проводился расчет:

- масса транспортного средства  $m_{т.с} = 160$  кг;
- установившаяся скорость  $V_y = 50$  км/ч;

- время разгона  $t_{\text{раз}} = 18$  с;
- время движения на установившейся скорости  $t_{\text{уст}} = 20$  с;
- время замедления  $t_{\text{зам}} = 17$  с;
- время стоянки  $t_{\text{ст}} = 25$  с.

Следующим этапом создания гибридного мотоцикла была разработка схемы передачи мощности и выбор ее основных узлов. Схема передачи мощности для гибридного транспортного средства представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Схема передачи мощности гибридного транспортного средства:

К — колесо; В — вариатор; ДВС — двигатель внутреннего сгорания; АБ — аккумуляторные батареи; БУ — блок управления; И — инвертор; ЭД — электродвигатель; МК — мотор-колесо

Данная схема основана на параллельной схеме гибридной силовой установки, в которой электродвигатель работает в переходных режимах (старт, ускорение), параллельно двигателю внутреннего сгорания, а при торможении запасает рекуперативную энергию. В качестве трансмиссии в данной схеме использован вариатор. Такая схема позволяет двигаться мотоциклу при выключенном ДВС с помощью электродвигателя.

Технические характеристики ДВС, установленного на гибридном транспортном средстве:

- 1 цилиндр, 4 такта.
- объем 49,9 см<sup>3</sup>.
- максимальная мощность при  $n_b = 7\,500$  об/мин — 3,3 кВт (4,5 л.с.).
- максимальный крутящий момент при  $n_b = 5\,000$  об/мин — 4,4 Н·м.
- крутящий момент в экономичном режиме — 4 Н·м.

Расчет путевого расхода топлива при движении в городском цикле НАМИ (см. рис. 3) показал, что разрабатываемое гибридное транспортное средство экономичней обычного такой же мощности и составляет 1,1 л на 100 км пути [1–3].

## Литература

- [1] Златин П.А., Кеменов В.А., Ксенович И.П. *Электромобили и гибридные автомобили*. Москва, Агроконсалт, 2004, 416 с.
- [2] Филькин Е.М. Легковой автомобиль с последовательным гибридным приводом. *63-я Открытая студ. науч.-техн. конф. (СНТК Университет машиностроения 2013)*. Москва, МГМУ «МАМИ», 2013.
- [3] Токмаков Н.М. Гибридный автомобиль. URL: <http://samodelkin.komi.ru/articles/gibrid01.html> (дата обращения 28.06.2015).



УДК 621.452.3

## Оптимизация облика двигателя в составе силовой установки истребителя «легкого» класса

© Фокин Даниил Борисович, Исянов Алик Миннахметович

Россия, г. Москва, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова

[Nik\\_of@ciam.ru](mailto:Nik_of@ciam.ru), [iam@ciam.ru](mailto:iam@ciam.ru)

*Представлены исследования по формированию облика силовой установки перспективного легкого фронтового истребителя (ЛФИ) на основании анализа передовых разработок, ведущихся в этой области в мире. Приведена структура основных блоков программного комплекса, используемого при расчете характеристик ЛФИ. Выполнена многокритериальная многофакторная оптимизация проектных параметров двигателя и самолета для нахождения Парето-оптимальных вариантов ЛФИ.*

**Ключевые слова:** *легкий фронтовой истребитель, силовая установка, многокритериальная многофакторная оптимизация, внутренние и эффективные характеристики.*

Анализ произведенных во всем мире за последние 30 лет истребителей поколения 4 и 4+ и планируемых к выпуску до 2020 г. показывает, что основную массу (~ 80 %) составляют истребители «легкого» класса — с взлетной массой до 17...18 т.

В настоящее время лидерами по количеству выпущенных легких фронтовых истребителей (ЛФИ) являются США (одномоторный самолет F-16 и двухдвигательный F-18), Россия (двухдвигательный МиГ-29), Франция (двухдвигательный Rafale), Швеция (одномоторный JAS-39) и Западноевропейский консорциум (двухдвигательный Eurofighter Typhoon). Однако на международном рынке легких боевых самолетов эти страны начинают теснить Китай (самолеты FC-1 и J-10).

В то время как зарубежные самолеты 5-го поколения: F-35 (США) и J-31 (Китай) уже проходят испытания и планируются к серийной поставке в ближайшие годы, в нашей стране осуществляется модернизация, относящихся к 4-му поколению самолетов МиГ-29. На его базе созданы истребитель МиГ-35 поколения 4++ и палубный истребитель МиГ-29КУБ. Однако недостаточные объемы выпуска этих самолетов, а также неудачи в ряде зарубежных тендеров требуют активизации в направлении создания отечественного легкого фронтового истребителя (ЛФИ) нового поколения.

Требования, предъявляемые к силовым установкам летательных аппаратов, формируются, исходя из задач, решаемых этими самолетами, к которым относятся режимы маневрирования, дальности полета в широком диапазоне высот и скоростей полета, динамические характеристики и др. На этапе выбора проектных параметров двигателя и самолета эта многорежимность задается комплексом потребных летно-технических характеристик (ЛТХ), включающих более десятка противоречивых показателей.

В работе проанализировано влияние проектных параметров двигателя и самолета, таких как степень двухконтурности, взлетная тяга, температура газа перед турби-

ной, суммарная степень повышения давления ТРДДФ и площадь крыла на протекание ЛТХ ЛФИ.

Для решения данной задачи использовалась математическая модель (ММ), разработанная в ЦИАМ. Упрощенная блок-схема ММ показана на рис. 1.

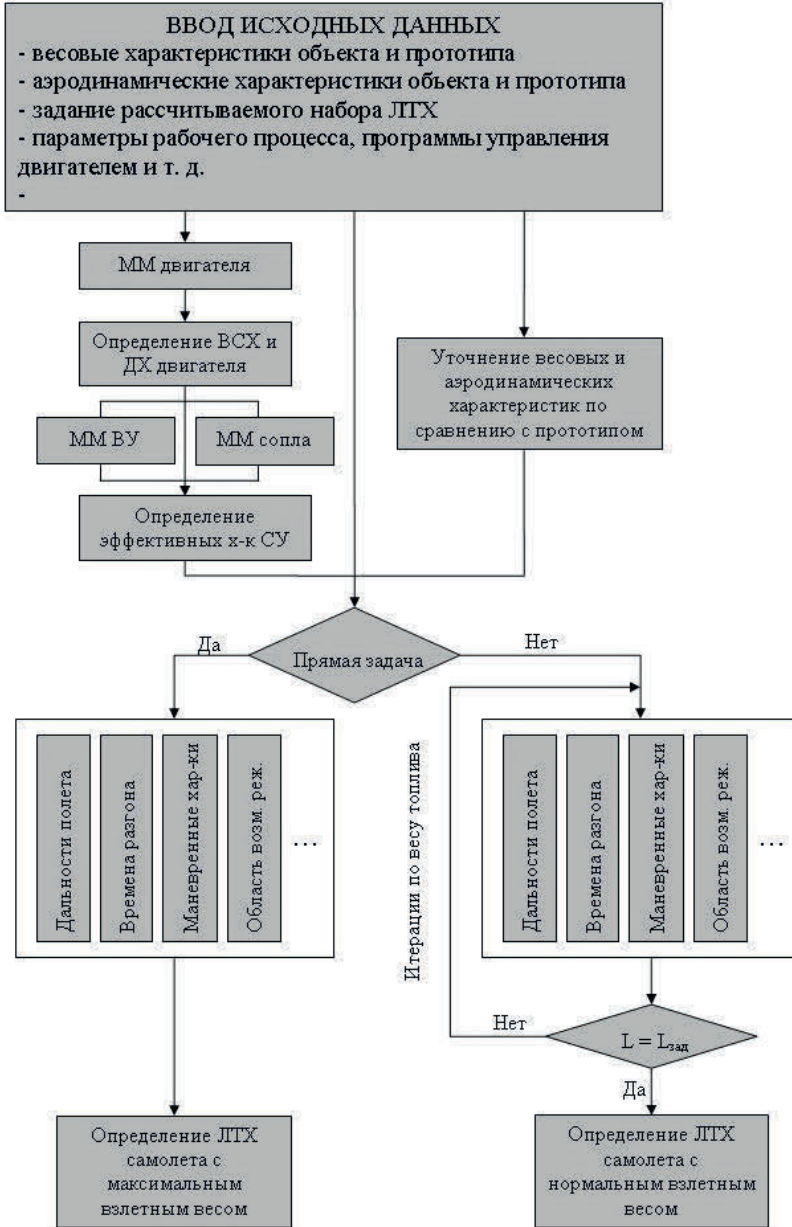


Рис. 1. Блок-схема ММ расчета ЛТХ летательного аппарата

Конечной целью математического моделирования при проектировании самолета и его силовой установки является получение оптимальных значений проектных параметров и оптимальных программ управления. Для силовой установки многорежимного самолета эта задача усложняется большим числом параметров, влияющих на целевые функции, а также наличием множества критериев оценки эффективности подобных систем.

Решение многокритериальных задач на начальных этапах проектирования целесообразно осуществлять в соответствии с известным принципом Парето, согласно которому в пространстве аргументов должна быть выявлена область, в пределах которой нельзя добиться увеличения ни одного частного критерия без уменьшения других. В качестве критериев для ЛФИ могут выступать дальности полета на различных режимах, взлетный вес самолета, перегрузки установившегося виража, время разгона и др.

### Литература

- [1] Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М., Котовский В.Н., Полев А.С. *Теория авиационных двигателей*. Ч. 2. Москва, Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006, 448 с.
- [2] Новиков А.С. *Состояние наукоемких отраслей промышленности России на современном этапе и возможные варианты их развития после мирового экономического кризиса 2008 г.* Москва, Бедретдинов и Ко, 2012, 536 с.
- [3] Югов О.К., Селиванов О.Д. *Основы интеграции самолета и двигателя*. Москва, Машиностроение, 1989, 304. с.

УДК 536.24

### Исследование интенсификации теплоотдачи и гидросопротивления структурированных поверхностей полученных методом деформирующего резания

© Аксянов Рустем Айдарович, Щелчков Алексей Валентинович,  
Попов Игорь Александрович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный  
исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

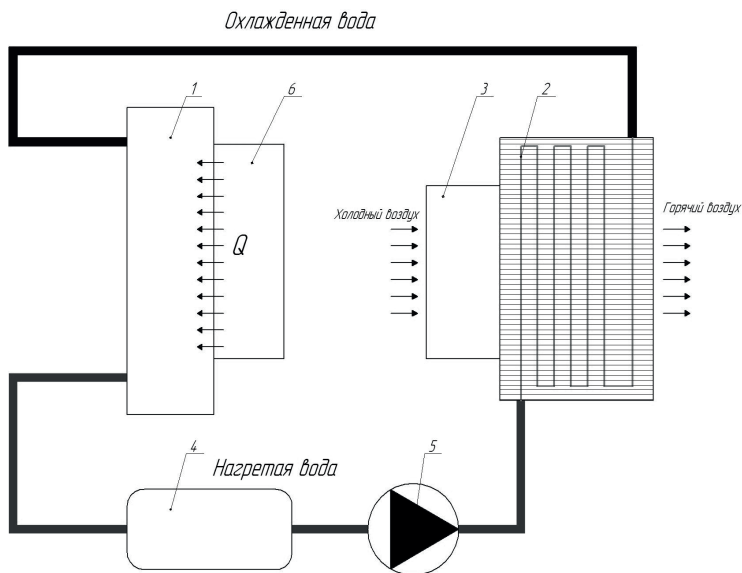
[5277624@gmail.com](mailto:5277624@gmail.com)

*Приведена принципиальная схема высокоэффективной микросистемы охлаждения микропроцессорного и электронного оборудования. Описано устройство, принцип работы экспериментально-исследовательского стенда, а также планируемые эксперименты для исследования тепловых и гидравлических характеристик различных структурированных металлических пластин, на поверхности которых размещены интенсификаторы теплообмена, полученные методом деформирующего резания при протекании однофазного и двухфазного потока жидкости.*

**Ключевые слова:** исследование теплоотдачи, гидросопротивление, теплообмен, микросистема охлаждения, метод деформирующего резания.

В настоящее время стоит проблема высокоэффективного и в то же время компактного охлаждения высокотехнологичных систем электронного оборудования во всех отраслях жизнедеятельности человека от ВПК до обычных персональных компьютеров. Одним из путей решения этой проблемы могут стать жидкостные микросистемы охлаждения.

В состав системы охлаждения, представленной на рис.1, входят водоблок 1, с использованием в качестве интенсификаторов теплообмена структурированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания; пластинчато-ребристый водо-воздушный теплообменный аппарат 2; кулер теплообменного аппарата 3; бак ресивера 4; насос 5; источник тепла 6.



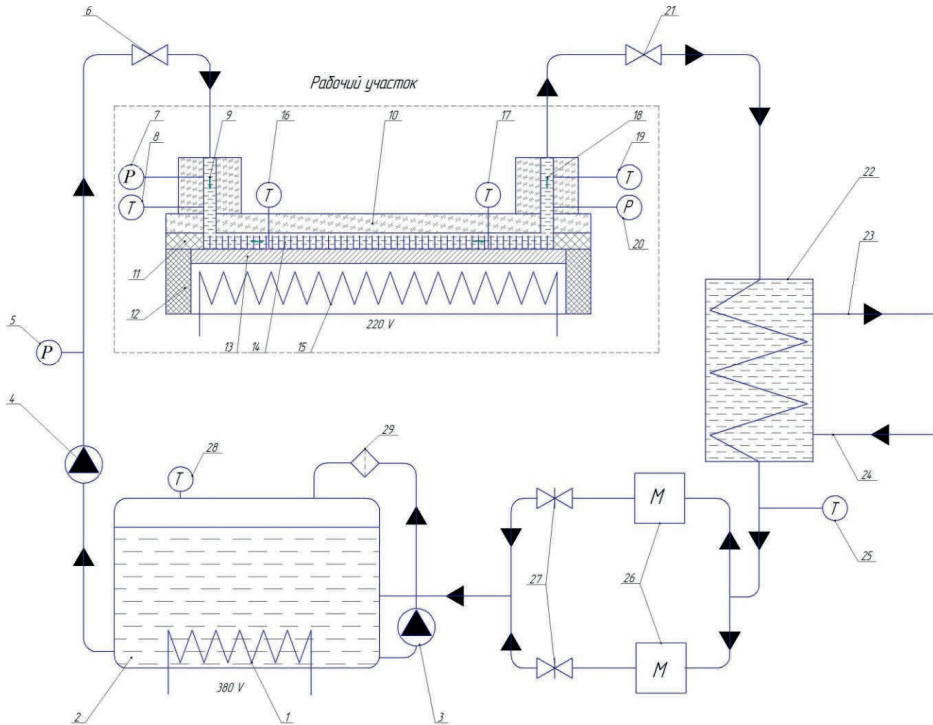
**Рис. 1.** Система охлаждения:  
 1 — водоблок; 2 — теплообменный аппарат; 3 — кулер теплообменного аппарата;  
 4 — бак ресивера; 5 — насос; 6 — источник тепла

Тепловой поток от источника тепла снимается холодной водой с помощью водоблока 1. Нагретая вода проходит через ресивер 4 и с помощью насоса 5 подается на теплообменный аппарат 2. Нагретая вода в теплообменном аппарате охлаждается нагнетаемым кулером 3 воздухом и подается обратно в водоблок.

Наиболее важным в данной системе является эффективный съем тепла от источника тепла. Для повышения эффективности необходимо исследовать теплогидравлических характеристик поверхностей теплосъема.

Для исследования теплогидравлических характеристик структурированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания, в плоских каналах систем охлаждения радиоэлектронного оборудования при вынужденном течении одно- и двухфазного теплоносителя спроектирован и создан экспериментальный стенд. Принципиальная схема стенда представлена на рис. 2.

При однофазном течении воды на рабочем участке вода комнатной температуры, из бака 2 подается с разными расходами (от 30 до 300 л/ч) на рабочий участок с помощью насоса 4. На тангенсальных входе 9 и выходе 18 рабочего участка замеряется перепад давления с целью получения коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  с помощью датчиков давления 7, 20 и температуры термометрами 8, 19. К теплоизолированной металлической пластине 13 с интенсификаторами теплообмена 14 подводится тепловой поток с помощью нихромового спирального электрического нагревателя 15, мощностью 1,8 кВт. С целью определения средних коэффициентов теплоотдачи на металлической пластине в шести точках замеряется температура. После выхода воды из рабочего участка замеряется расход воды с помощью магнитных расходомеров 26. За расходомерами для обеспечения требуемого расхода воды стоят регулируемые задвижки 27, после которых вода возвращается в бак 2. Фильтрация воды осуществляется с помощью перепускного насоса 3 и фильтра 29.



**Рис. 2.** Принципиальная схема экспериментальной установки:

1, 15 — электрический нагреватель; 2 — бак; 3 — перепускной насос; 4 — насос; 5, 7, 20 — датчик давления; 6, 21 — запорные краны; 8 — датчик температуры; 9 — тангенсальный вход; 10 — крышка; 11 — прокладка; 12 — ванна; 13 — металлическая пластина; 14 — интенсификаторы теплообмена на пластине; 16, 17, 19, 25, 28 — датчик температуры; 18 — тангенсальный выход; 22 — теплообменник охладитель; 23 — отвод охлаждающей жидкости; 24 — подвод охлаждающей жидкости; 26 — магнитные расходомеры; 27 — регулируемые задвижки; 29 — фильтр

При двухфазном течении воды на рабочем участке вода подогревается в баке 2 до температуры, близкой к температуре насыщения  $T_s$ , с помощью электрического нагревателя 1 и подается с различными расходами (30...300 л/ч) с помощью насоса 4. На тангенсальных входе 9 и выходе 18 рабочего участка замеряется перепад давления для определения коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  с помощью датчиков давления 7, 20 и температуры термометрами 8, 19. К теплоизолированной металлической пластине 13 с интенсификаторами теплообмена 14 подводится тепловой поток с помощью нихромового спирального электрического нагревателя 15, мощностью 1,8 кВт. Таким образом достигается кипение воды на поверхности пластины рабочего участка. Паросодержание  $X$  и средние коэффициенты теплоотдачи определяются с помощью установленных на поверхности пластины в шести точках, термометров. После выхода из рабочего участка вода поступает на кожухотрубный теплообменник охладитель 22, где она охлаждается до исходной температуры воды в баке 2 для исключения излишней тепловой нагрузки на расходомеры и регулируемые задвижки и поддержания постоянной температуры воды в баке. После охлаждения в теплообменнике вода подается на магнитные расходомеры 26, которые замеряют

расход воды в системе. Для обеспечения требуемого расхода воды за расходомерами стоят регулируемые задвижки 27. Затем чего вода возвращается в бак 2. Фильтрация воды осуществляется с помощью перепускного насоса 3 и фильтра 29.

На основе результатов проведенных опытов планируется получить графические зависимости для однофазного потока: средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi$  от числа Рейнольдса, а для двухфазного потока — средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi$  от числа Рейнольдса  $Re$  и Нуссельта  $Nu$ .

### Литература

- [1] Popov I.A., Shchelchkov A.V. Boiling of various liquids on microstructured surfaces. *J of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no 6, pp. 1420–1432.
- [2] Popov I.A., Zubkov N.N., Kas'kov S.I., Shchelchkov A.V. Heat Transfer during the Boiling of Liquid on Microstructured Surfaces. Part 1: Heat Transfer during the Boiling of Water. *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, no 3, pp. 157–165.
- [3] Popov I.A., Zubkov N.N., Kas'kov S.I., Shchelchkov A.V. Heat Transfer during the Boiling of Liquid on Microstructured Surfaces. Part 2: Visualization of Boiling and Critical Heat Fluxes. *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, no 4, pp. 285–294.

УДК 66.049.2

## Определение толщины зоны градиента концентрации и ее влияния на скорость испарения жидкости

© Борисов Юрий Александрович, Чернышев Андрей Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[boricovyu@gmail.com](mailto:boricovyu@gmail.com)

*Рассмотрено влияние на скорость испарения из пробирок толщины зоны градиента концентрации. Описан алгоритм определения величины этого параметра и применяемые для этого методы. Приведены основные зависимости, используемые для создания математической модели рабочих процессов концентрирования растворов. Представлены результаты численного исследования влияния перепада давления на границах расчетной области на толщину зоны градиента концентрации.*

**Ключевые слова:** концентрирование, испарение, градиент концентрации, межфазная граница, численные методы.

В настоящее время существует большая потребность в определении состава различных образцов. В таких областях, как медицина, криминалистика, археология и многих других. После взятия пробы для исследования производится ее очистка, разделение и дальнейшая транспортировка в специализированную исследовательскую

лабораторию. Полученная в результате этих операций проба представляет собой раствор исследуемого вещества (ДНК, РНК, высокомолекулярных соединений и др.) в растворителе, в качестве которого может применяться, как вода, так и агрессивные жидкости (этанол, хлороформ, аммиак, кислоты). Содержание вещества, представляющего интерес для дальнейших исследований, в общем объеме пробы менее 2 мл не превышает 0,5 %. Для того чтобы данная проба стала пригодной для исследований, необходимо значительно повысить концентрацию исследуемого вещества (до 80, а иногда и 100 %).

После обзора существующих концентраторов жидкостей и анализа теории и методов расчета процессов, протекающих в них, были выявлены основные параметры, влияющие на скорость испарения жидкости: давление насыщенных паров жидкости, концентрация жидкости в рабочем газе, коэффициент диффузии, температура жидкости и толщина зоны градиента концентрации. Следует отметить, что диапазон изменения большинства этих параметров ограничен требованиями, связанными с безопасностью концентрирования образцов. Только толщина зоны градиента концентрации может существенно изменяться, тем самым значительно влияя на скорость испарения жидкости из пробирок.

Для определения этого параметра была разработана математическая модель течения рабочего газа в пневмовакuumном концентраторе при взаимодействии с парами испаряемой жидкости. Основными уравнениями математической модели являются [1, 2]:

- уравнение Навье — Стокса в стационарной постановке

$$\begin{cases} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} v_x); \\ v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} v_y); \\ v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad} v_z); \end{cases}$$

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} = 0;$$

- уравнение диффузии

$$\rho_1 \left( v_{1x} \frac{dc_1}{dx} + v_{1y} \frac{dc_1}{dy} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho_1 D \frac{dc_1}{dy} \right),$$

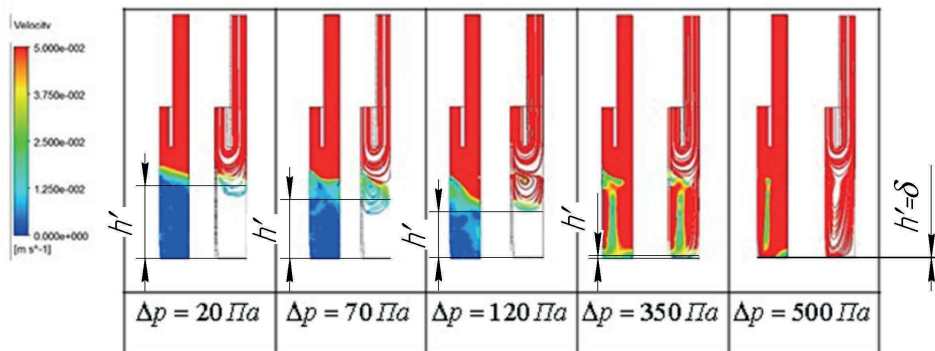
где параметры без индекса относятся к рабочему газу, а параметры с индексом «1» — к испаряемой жидкости;  $v$  — скорость, м/с;  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  — концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Аналитическое решение данной системы уравнений для расчетной схемы рабочей ячейки получить невозможно, поэтому для их решения используются численные методы. Вся расчетная область разбивается на множество маленьких объемов, для каждого из которых система дифференциальных уравнений, описанных выше, заменяется линейными. Для сокращения машинного времени при численном исследова-



нии рассматривалась только сегмент расчетной области, что не влияет на точность решения задачи вследствие ее осесимметричности.

В результате расчета были получены параметры течения газа в рабочей области и определена толщина зоны градиента концентрации, которая определяет значение массового потока пара. На рис. 1 видно, что при увеличении перепада давления на границах расчетной области, поток рабочего газа приближается к межфазной границе.



**Рис. 1.** Распределение скоростей в расчетной области при различных перепадах давления на ее границах

При больших перепадах давления толщина зоны градиента концентрации становится равной толщине диффузионного пограничного слоя. Для определения полного потока массы, испаряющейся с межфазной границы, необходимо воспользоваться формулой Стефана [3]:

$$I = D \frac{p_1 M_1}{RT_1 h'} \ln \left( \frac{p_\Sigma - p_1(\Phi)}{p_\Sigma - p_{1н}} \right).$$

При проектировании нового оборудования для концентрирования растворов важной задачей является определение зависимости толщины зоны градиента концентраций от параметров потока рабочего газа. Правильный выбор давления и скорости рабочего газа позволит многократно увеличить скорость испарения жидкости из пробинок, при этом исключив вероятность потерь исследуемого вещества.

### Литература

- [1] Борисов Ю.А., Чернышев А.В., Друца В.Л. Исследование и математическое моделирование рабочих процессов вакуумного концентрирования реакционных смесей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. Машиностроение*, 2012, спецвыпуск № 4, с. 45–54.
- [2] Дейч М.Е. *Техническая газодинамика*. Москва — Ленинград, Госэнергоиздат, 1961, 674 с.
- [3] Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. *Тепломассообмен*. Москва, МЭИ, 2005, 549 с.

## Применение численных методов для расчета рабочих процессов в пневмогидравлических устройствах

© Васильева Вера Александровна, Борисов Юрий Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[vasilieva\\_vera@mail.ru](mailto:vasilieva_vera@mail.ru), [boricovyu@gmail.com](mailto:boricovyu@gmail.com)

*Рассмотрены вопросы определения параметров рабочей среды внутри газовой полости и нагрузки, действующей на регулирующий элемент регулятора давления. Проанализированы преимущества и недостатки различных подходов к описанию рабочих процессов в регуляторах давления. Дана оценка границ применимости методов описания рабочих процессов в приближении сосредоточенных и распределенных термодинамических параметров состояния рабочей среды. Предложен комбинированный метод расчета рабочих процессов и представлены этапы создания обобщенной математической модели рабочих процессов в регуляторе давления.*

**Ключевые слова:** пневмогидравлические системы, регулятор давления, клапан, коэффициент подъемной силы, распределенные термодинамические параметры состояния, сосредоточенные термодинамические параметры состояния.

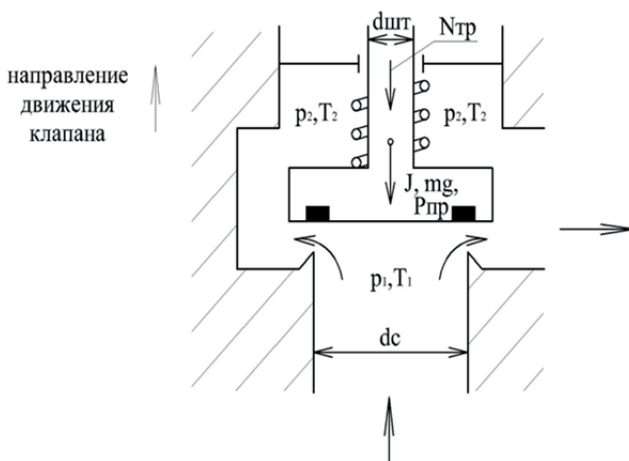
Пневмогидравлические системы (ПГС) применяются практически во всех отраслях деятельности человека (бытовое газораспределение, системы вентиляции, жизнеобеспечения и пожаротушения, пневматический инструмент и т. д.) и являются неотъемлемой частью современной жизни. При работе любой ПГС важны ее безопасность, точность и надежность. Соблюдение этих требований определяется главным образом надлежащей работой входящих в состав ПГС запорно-регулирующих устройств (клапаны, задвижки, регуляторы давления, регуляторы расхода и др.).

При проектировании пневмогидравлической системы важной задачей является предварительная оценка режимов и характера работы запорно-регулирующей арматуры (ЗРА). С этой целью при разработке новых устройств проводятся предварительные расчеты.

Большинство ЗРА имеет в своем составе клапанный узел и при расчетах основная сложность заключается в определении действующих на клапан в процессе работы усилий. Задача еще больше усложняется, если рабочей средой является газ, поскольку вопросы истечения газа и распределения давления газа в дроссельном сечении клапана до сих пор мало изучены.

Схема нагружения регулирующего элемента клапана показана на рис. 1. На клапан действуют: сила  $Q_{r1}$  со стороны высокого давления  $p_1$  и  $Q_{r2}$  низкого давления  $p_2$ ; сила тяжести подвижных частей клапана  $mg$ , сила инерции подвижных частей клапана  $J$  и сила трения  $N_{тр}$ . Все нагрузки, кроме силы тяжести, носят переменный характер и зависят от высоты подъема клапана, которая в свою очередь зависит от величины действующих на клапан усилий. Кроме того, действительная газовая сила

$Q_r = Q_{r1} - Q_{r2}$  в общем случае имеет статическую и динамическую составляющую. Для ее численного определения необходимо знать распределение давления рабочей среды (газа) в устройстве.



**Рис. 1.** Силы, действующие на регулирующий элемент клапана при движении

В настоящее время существуют две группы методов исследования параметров потока рабочей среды: экспериментальные и численные. Обзор работ, посвященных проблеме определения газовых сил, показывает, что для решения этих задач до настоящего времени в основном использовались экспериментальные методы [1]. Экспериментальным изучением вопроса занимались В.Ф. Бугаенко, D.H. Tsai, E.C. Cassidy, И.Ф. Ляковский, Б.С. Плюгин, Т.Ф. Кондратьева [2–4]. Их работы были направлены на исследование действующих на клапаны различных конфигураций газовых сил и определение коэффициента подъемной силы  $\varphi = Q_r / Q_{r,ст}$ , который учитывает наличие аэродинамической составляющей нагрузки и неравномерность распределения давления по тарели клапана. Результаты проведенных исследований показали зависимость коэффициента подъемной силы от большого количества факторов: формы тарели клапана, высоты подъема клапана, отношения давления перед и после устройства, диаметра седла и др. При этом полученные в определенных условиях для определенного клапана данные не могут быть аппроксимированы на другие режимы работы устройства, а также клапаны с отличной геометрией. Поэтому для проектирования новых конструкций или использования существующего устройства в новых условиях работы необходимо заново проводить трудоемкие и дорогостоящие эксперименты с целью определения действующих на клапан в процессе работы усилий.

Чтобы сократить затраты на усовершенствование и/или разработку ЗРА в настоящее время все чаще используют численные методы [5–7]. Для исследования термодинамических параметров рабочей среды можно выделить два подхода к описанию рабочих процессов:

1) в приближении сосредоточенных термодинамических параметров состояния (параметры состояния изменяются одинаково во всем контрольном объеме и не зависят от координаты рассматриваемой точки внутри этого объема);

2) описание рабочих процессов в приближении распределенных термодинамических параметров состояния (параметры состояния газа зависят от координаты рассматриваемой точки внутри контрольного объема).

Каждый подход имеет свои преимущества и недостатки. Описание рабочих процессов в приближении сосредоточенных термодинамических параметров состояния легко реализуется и не требует больших затрат вычислительных мощностей. Однако он не позволяет учесть неравномерность параметров рабочей среды внутри рассматриваемого объема и, как следствие, определить коэффициент подъемной силы. Описание рабочих процессов в приближении распределенных термодинамических параметров состояния позволяет учесть неравномерность параметров внутри рассматриваемой емкости и рассчитать коэффициент подъемной силы, однако требует значительных вычислительных мощностей. Для сложных пневмогидравлических систем реализовать этот подход практически невозможно.

В данной работе рассматривается возможность создания обобщенной математической модели, совмещающей в себе преимущества методов описания рабочих процессов в приближении сосредоточенных и распределенных термодинамических параметров состояния рабочей среды. Построение обобщенной математической модели осуществляется последовательно в три этапа:

1) разработка модели динамики работы всего устройства ЗРА в приближении сосредоточенных термодинамических параметров состояния без учета коэффициента подъемной силы;

2) описание рабочих процессов в проточной части клапанного узла ЗРА в приближении распределенных термодинамических параметров состояния и определение коэффициента подъемной силы на базе полученного распределения давления;

3) уточнение модели динамики ЗРА, разработанной на первом этапе, полученным на втором этапе значением коэффициента подъемной силы.

На первом этапе пневмогидравлическая система разбивается на газовые емкости постоянного и переменного объема, соединенные между собой каналами постоянного и переменного сечения. Процессы, протекающие в каждой емкости, можно описать законами сохранения энергии и массы рабочего тела, уравнением состояния газа, расхода газа Сен-Венана — Ванцеля. Дополнительным уравнением является уравнение движения подвижных частей ЗРУ. Решение полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка с учетом начальных и граничных условий проводится методом Эйлера.

На втором этапе весь диапазон движения клапана заменяется рядом фиксированных последовательных положений. Для каждого положения клапана записываются уравнения неразрывности, движения и энергии. Система уравнений, дополненная начальными и граничными условиями, решается с помощью метода контрольных объемов.

На основе полученного распределения давлений в проточной полости клапанного узла (рис. 2) определяется действительная газовая сила путем интегрирования давления рабочей среды по поверхности клапана  $Q_r = \int_S p(x, y, z) ds$ . Коэффициент подъемной силы рассчитывается по формуле  $\varphi = Q_r / Q_{r,ст}$  для всего ряда последовательных положений клапана.

На третьем этапе модель динамики устройства уточняется рассчитанным значением коэффициента подъемной силы.

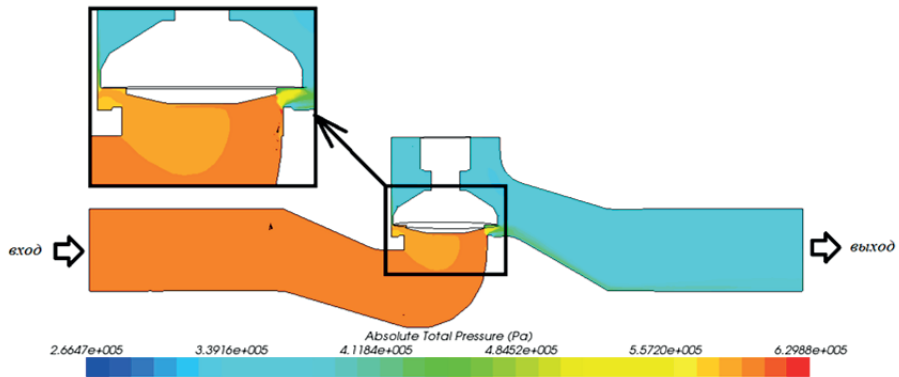


Рис. 2. Распределение давления в проточной части клапана при одном из положений

Проведение исследований с помощью обобщенной математической модели рабочих процессов значительно сокращает временные затраты по сравнению с проведением эксперимента. Точность результатов, полученных с помощью обобщенной математической модели выше по сравнению с моделью динамики работы устройства в приближении сосредоточенных термодинамических параметров состояния, что подтверждено экспериментально. Разработанный метод расчета и обобщенная математическая модель позволят моделировать рабочие процессы в новых устройствах и добиваться требуемых характеристик системы путем подбора элементов конструкции без применения экспериментальных исследований.

### Литература

- [1] Чернышев А.В., Васильева В.А., Крутиков А.А., Коленко Н.Н. Исследование динамической нагрузки, действующей на рабочий орган пневматического регулирующего исполнительного устройства. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. Машиностроение*, 2011, с. 150–166.
- [2] Бугаенко В.Ф. *Пневмоавтоматика ракетно-космических систем*. Москва, Машиностроение, 1979, с.168.
- [3] Кармугин Б.В., Кисель В.Л., Лазебник А.Г. *Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры*. Киев, Техника, 1980, 295 с.
- [4] Кондратьева Т.Ф. *Предохранительные клапаны*. Ленинград, Машиностроение, 1976, 232 с.
- [5] Чернышев А.В., Крутиков А.А. Моделирование рабочих процессов в элементах пневматических устройств с учетом распределенных параметров. *Конверсия в машиностроении*, 2007, № 4–5, с. 94–98.
- [6] Чернышев А.В., Васильева В.А., Петропавлов П.И. Математическое моделирование рабочих процессов регулятора давления с учетом диссипации энергии. *Компрессорная техника и пневматика*, 2012, с. 24–31.
- [7] Крутиков А.А. *Создание метода и разработка пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2008, 127 с.
- [8] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. Москва, Дрофа, 2003, 840 с.

УДК:66.045.53, 66.021.3, 66.069.833

## Особенности контактного теплообмена в щелевых каналах поперечноточных градирен

© Городилов Александр Андреевич, Беренгартен Михаил Георгиевич

Россия, г. Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

[gorodilov-a-a-90@yandex.ru](mailto:gorodilov-a-a-90@yandex.ru)

*Представлены результаты экспериментального исследования процесса теплообмена при испарительном охлаждении воды в поперечноточной градирне. проанализировано влияние скорости воздуха и плотности орошения на интенсивность процесса контактного теплообмена на гофрировано-просечной насадке. Отмечено, что исследование теплообмена при перекрестном течении теплоносителей осложняется сносом жидкости с насадки. Установлено, что градирня с экспериментальной насадкой обладает более высокой эффективностью, чем градирня с плоскопараллельной насадкой.*

**Ключевые слова:** поперечноточная градирня, перекрестный ток, испарительное охлаждение, насадка, массообмен, теплообмен, контактный теплообмен.

Градирни нашли широкое распространение в промышленности и в энергетике для охлаждения оборотной воды атмосферным воздухом. Основным узлом градирни, определяющим характер межфазного взаимодействия воды и воздуха, является насадка (ороситель).

Важное условие глубокого охлаждения воды в градирне при минимальном гидравлическом сопротивлении — полное смачивание насадки орошающей жидкостью (водой). Если распределение воды по насадке неравномерное и лишь часть поверхности насадки покрыта водой, то это не позволяет в полном объеме использовать насадочную часть градирни и обуславливает снижение разности температур между горячей и охлажденной водой. Наиболее полного смачивания насадки можно добиться в перекрестноточных (поперечноточных) контактных аппаратах за счет того, что сечение для прохода газа не равно сечению для прохода жидкости. При этом путем компоновки блока насадки тем или иным образом (изменяя соотношение длины, ширины и высоты блока насадки), можно добиться высокой плотности орошения [1] и как следствие — полного смачивания насадки.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса охлаждения воды в перекрестноточном контактном аппарате атмосферным воздухом по методике испарительного охлаждения. В качестве объекта исследования была выбрана гофрировано-просечная насадка (ГПН). Описание конструкции насадки представлено в работе [2], а основные геометрические характеристики насадки — в работе [3]. Кроме того, была проведена аналогичная серия экспериментов на плоскопараллельной насадке (ППН) аналогичных размеров и конфигурации блока насадки. Длина блока насадки в обоих случаях составляла 100 мм, высота 437 мм. Блок насадки состоял из 11 единичных элементов насадки, установленных с зазором 14 мм друг относительно друга. Толщина каждого элемента насадки составляла 3 мм.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1 в виде зависимости критерия Шервуда (диффузионный критерий Нуссельта) от критерия Рейнольдса газа, результаты серии экспериментов в виде зависимости критерия Шервуда (диффузионный критерий Нуссельта) от пленочного числа Рейнольдса — на рис. 2.

На рисунках видно, что с увеличением скорости газа до значений числа Рейнольдса газа  $\sim 2\,500$ , расход жидкости практически не влияет на интенсивность массообмена на исследуемой насадке. При больших значениях критерия Рейнольдса газа наблюдается сложная картина зависимости коэффициента массоотдачи на исследуемой насадке от расходов теплоносителей. Увеличение интенсивности тепломассообмена за счет возникновения турбулентности в газовом потоке сопровождается уменьшением коэффициента массоотдачи за счет сноса жидкости с поверхности элементов насадки потоком газа. Это приводит к обнажению сухих пятен на насадке и, как следствие, к уменьшению активной поверхности межфазного взаимодействия.

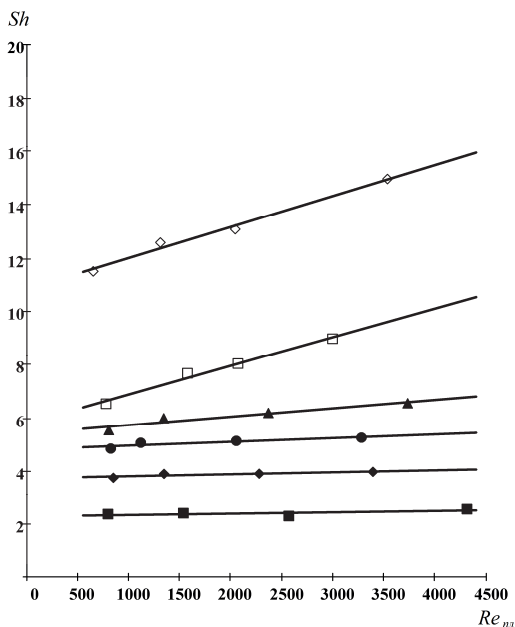
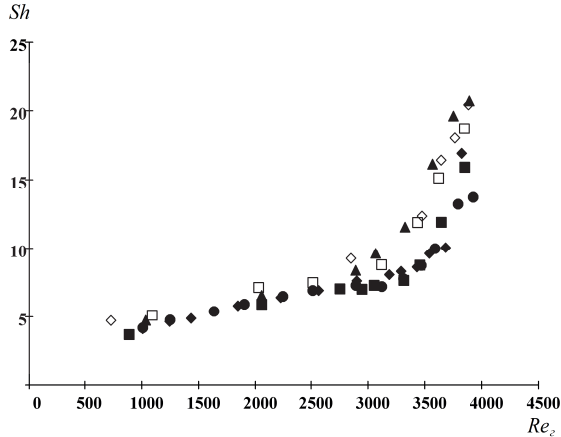


Рис. 1. Зависимость критерия Шервуда от критерия Рейнольдса газа:

■ —  $Re_{пл} = 321, q = 19 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; ◆ —  $Re_{пл} = 683, q = 40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; ● —  $Re_{пл} = 1037, q = 60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; ▲ —  $Re_{пл} = 1566, q = 92 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; □ —  $Re_{пл} = 1917, q = 112 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; ◇ —  $Re_{пл} = 3321, q = 194 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

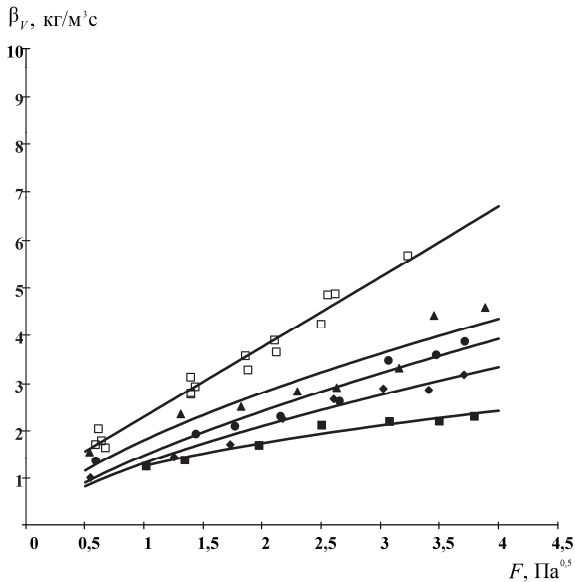
Результаты экспериментов на ППН насадке представлены в виде зависимости объемного коэффициента массоотдачи от  $F$ -фактора (рис. 3). Из анализа рис. 3 следует вывод, что ГПН насадка обладает более высокой эффективностью по сравнению с ППН насадкой, а также лучше смачивается водой. Это обусловлено значительным влиянием плотности орошения на коэффициент массоотдачи. Кроме того, ГПН насадка обладает более высокой удерживающей способностью по жидкости. Это означает, что с увеличением скорости газа до значений, соответствующих  $F$ -фактору  $3 \text{ Па}^{0.5}$  ( $w \approx 3 \text{ м/с}$ ), наблюдается равномерный линейный рост критерия Шервуда (см.

рис. 3). В это же время на ППН насадке с увеличением скорости газа из-за сноса жидкости интенсивность процесса тепломассообмена возрастает по степенной зависимости, причем показатель степени составляет менее 1.



**Рис. 2.** Зависимость критерия Шервуда от пленочного числа Рейнольдса:

■ —  $Re_r = 510$ ,  $w = 0,51$  м/с; ◆ —  $Re_r = 1289$ ,  $w = 1,3$  м/с;  
 ● —  $Re_r = 1947$ ,  $w = 1,96$  м/с; ▲ —  $Re_r = 2645$ ,  $w = 2,66$  м/с;  
 □ —  $Re_r = 3178$ ,  $w = 3,19$  м/с; ◇ —  $Re_r = 3646$ ,  $w = 3,63$  м/с



**Рис. 3.** Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от  $F$ -фактора на ППН насадке:

■ —  $Re_{пл} = 410$ ,  $q = 28$  м³/(м²·ч); ◆ —  $Re_{пл} = 866$ ,  $q = 59$  м³/(м²·ч); ● —  $Re_{пл} = 1374$ ,  $q = 94$  м³/(м²·ч); ▲ —  $Re_{пл} = 1606$ ,  $q = 110$  м³/(м²·ч); □ — ГПН насадка,  $880 < Re_{пл} < 2400$



По результатам проведенных экспериментов было установлено, что характер тепломассообменных процессов на исследованных насадках в перекрестном токе осложнен сносом жидкости. Появление сноса жидкости в перекрестноточных аппаратах происходит при меньших относительных расходах теплоносителей, чем унос жидкости газовым потоком в противоточных аппаратах. Также было установлено, что в условиях перекрестного тока значительное влияние на процесс тепломассообмена в градириях могут оказывать форма поверхности насадки: ГПН-насадка обладает более высокой эффективностью, причем коэффициент массоотдачи не зависит от расхода жидкости, при скоростях газа менее 2,5 м/с в исследованном диапазоне изменения  $Re_{пл}$ .

### Литература

- [1] Чуракова С.К. *Разработка энергосберегающих технологий нефтегазопереработки на основе перекрестноточных насадочных контактных устройств*. Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. Уфа, УГНТУ, 2014.
- [2] Городилов А.А. Влияние перфорации насадок для градириен на активную поверхность тепломассообмена. *Седьмая Всерос. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сб. тр.* [Электрон. ресурс]. Москва, 2014. 1 CD-ROM.
- [3] Беренгартен М.Г., Витковская Р.Ф., Городилов А.А., Пушнов А.С. *Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Насадочные скрубберы для контактного теплообмена*. Санкт-Петербург, ФГБОУВПО «СПГУТД», 2014, 82 с.

УДК 62-541.46

## Разработка математической модели позиционного электропневматического привода

© Зеленев Михаил Сергеевич, Чернышев Андрей Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[mszelenov@gmail.com](mailto:mszelenov@gmail.com)

*Рассмотрена область применения электропневматических позиционных приводов. Обосновано использование методов математического моделирования процессов для разработки математической модели рабочих процессов, протекающих в приводе. Для формирования системы управления был выбран нейросетевой алгоритм с обучением на основании вычислительного эксперимента на базе разработанной математической модели. В соответствии с алгоритмом генерированы сигналы для управляющих клапанов, изменяющие потоки сжатого воздуха, подаваемые в полости привода.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, пневматический привод, позиционное управление, нейросетевой регулятор, пневмоуправление.

Развитие электромеханических приводов привело к вытеснению пневматических приводов. Однако пневматика остается востребованной в ряде областей благодаря своим характерным особенностям:

- высокой удельной мощности;
- доступности рабочей среды без необходимости специальных добавок (например, антикоррозионных);
- нечувствительности к магнитным полям и радиационному излучению;
- пожаро- и взрывобезопасности;
- высокому быстродействию.

Данные преимущества могут быть успешно использованы в работе таких технических устройств, как хирургические роботизированные комплексы с пневматическими позиционными приводами [1]. Разработка подобных систем требует решения проблем, обусловленных нелинейными процессами, протекающими в пневматических устройствах. Наиболее ощутимое влияние на точное позиционирование выходного звена оказывают сжимаемость рабочей среды, нелинейное изменение расхода рабочей среды между полостями пневматического привода и питающими емкостями, а также сила трения, зависящая от множества факторов [2].

Для решения этих проблем широко применяют методы математического моделирования и управления. В связи с высокой нелинейностью протекающих процессов традиционные методы теории управления часто не применимы, и для управления используют адаптивные алгоритмы, строящиеся либо в непосредственном контакте с объектом управления, либо в комплексе с высокоточной математической моделью объекта управления. Одним из таких алгоритмов является нейросетевое управление, при котором законы регулирования формируются в пошаговом процессе оптимизационного поиска.

Принципиальная схема электропневматического позиционного привода, включающего в себя пневматический цилиндр двойного действия Ц, пропорциональные пневмоклапаны  $K_1$ – $K_4$  и систему подачи сжатого воздуха, состоящую из компрессора КМ, охладитель АТ, влагомаслоотделитель ВД, ресивер РС, манометр МН, регулятор давления РД и фильтр Ф, представлена на рис. 1.

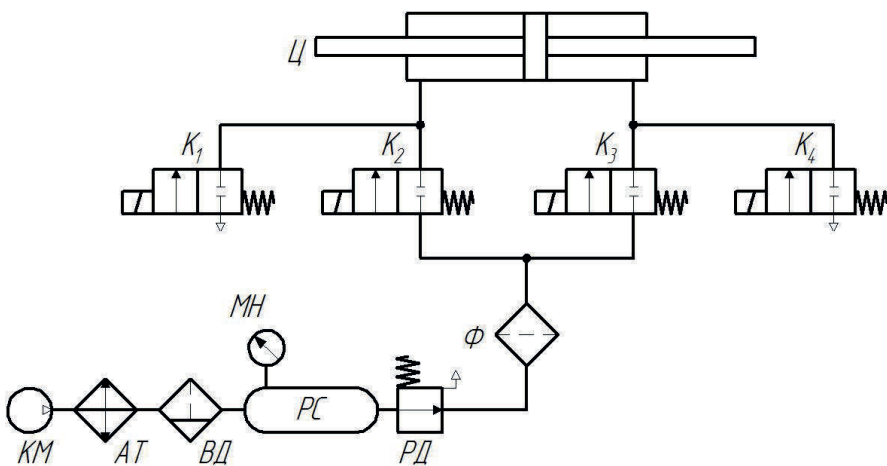


Рис. 1. Принципиальная схема электропневматического привода

При проектировании позиционного пневматического привода был построен комплекс математических моделей, описывающих рабочие процессы, протекающие в электропневматическом приводе. Данный комплекс включает в себя математическую модель динамики движения рабочего органа [3, 4] с учетом сил трения, эффекта отскока поршня и возможности оценочного учета явлений теплообмена между рабочим телом и окружающей средой. Управление приводом осуществляется с помощью четырех клапанов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$  — по два на каждую полость, связывающих полости с атмосферой и ресивером. Для описания подачи сжатого воздуха была использована математическая модель, основанная на уравнении Сен-Венана и Ванцеля. При этом открытие проходных сечений регулируется в соответствии с сигналами, формируемыми нейросетевым регулятором. В качестве входных сигналов для системы управления отслеживаются текущая скорость и положение поршня пневматического цилиндра.

На базе комплекса математических моделей рабочих процессов был разработан виртуальный стенд в среде программирования LabVIEW [5]. Нейросетевой алгоритм реализован в среде MatLab и подключен к виртуальному стенду.

### Литература

- [1] Fischer G.S. *Enabling Technologies for MRI Guided Interventional Procedures*. PhD dissertation. The Johns Hopkins University, 2009, p. 104.
- [2] Зеленев М.С., Чернышев А.В. Расчетно-теоретическое исследование рабочих процессов в микродозировочном модуле при дискретном раскапывании жидкости. *16-я науч.-иссл. конф. «МЕДТЕХ-2014»*. Сб. тр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, с. 230–232.
- [3] Зеленев М.С. Разработка микродозировочного модуля для автоматизированного комплекса пробоподготовки. *Молодежный научно-технический вестник*, 2013, № 3. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/562204.html> (Дата обращения 29.06.2015).
- [4] Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И., Чуканов К.П. *Математические модели систем пневмоавтоматики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 296 с.
- [5] Жуков К.Г. *Модельное проектирование встраиваемых систем в LabVIEW*. Москва, ДМК Пресс, 2011, 688 с.

УДК 536.2

## Исследование термогидродинамических процессов при термостатировании биологических объектов

© Левчук Мартин Андреевич Зеленев Михаил Сергеевич,  
Чернышев Андрей Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[mszelenov@gmail.com](mailto:mszelenov@gmail.com)

*Исследованы физические процессы безопасного хранения биологических объектов в условиях их термостатирования при высоких требованиях к точности поддержания температуры и равномерности температуры по объему. В результате прове-*

денного исследования получены зависимости изменения температуры тромбоцитного концентрата при хранении для четырех характерных режимов. Проанализирована длительность термостабилизации, ко которой можно оценить возможность безопасного хранения тромбоцитного концентрата в поставленных условиях.

**Ключевые слова:** термогидродинамические процессы, биологические объекты, термостабилизация, термостатирование.

В медицинской практике существует задача хранения тромбоцитов свыше 24 ч. Для этого используют замкнутую систему пакетов, оптимальная температура хранения составляет  $t_{\text{xp}} = (22 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$

Для проектирования устройств безопасного хранения тромбоцитосодержащих сред необходимы исследования физических процессов безопасного хранения биологических объектов в условиях их термостатирования при высоких требованиях к точности поддержания температуры и равномерности температуры по объему.

Цель исследования — определение длительности переходного процесса стабилизации температуры тромбоцитного концентрата, находящегося внутри пакета. Для достижения этой цели были определены четыре характерных режима, различающиеся начальными условиями процесса:

- 1) температура концентрата —  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура воздуха в устройстве хранения —  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 2) температура концентрата —  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура воздуха в устройстве хранения —  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 3) температура концентрата —  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура воздуха в устройстве хранения —  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 4) температура концентрата —  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура воздуха в устройстве хранения —  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В соответствии с выбранными режимами исследования были составлены расчетная схема объекта исследования и математическая модель физических процессов, протекающих при хранении тромбоцитного концентрата, описаны принятые допущения и граничные и начальные условия.

Так как в общем случае система уравнения, описывающая математическую модель процесса, не имеет аналитического решения, для получения приближенного решения был использован метод конечных объемов, реализованный в программном пакете ANSYS Fluent.

В результате проведенного исследования получены зависимости изменения температуры тромбоцитного концентрата при хранении для четырех характерных режимов, оценена длительность термостабилизации, что позволяет судить о возможности безопасного хранения тромбоцитного концентрата в поставленных условиях.

## Литература

- [1] ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT 13.0. Theory Guide. 2011.
- [2] Белова О.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 5 (17), с. 45.
- [3] Борисов Ю.А., Васильева В.А., Чернышев А.В. Применение численных методов для расчета процессов, протекающих в вакуумных и пневмогидравлических системах. *Инженерный вестник*, 2014, № 11, с. 14.

- [4] Крутиков А.А. *Создание метода расчета и разработка пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2008, 128 с.
- [5] Остроумов Г.А. *Свободная тепловая конвекция в условиях внутренней задачи*. Москва, Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952, 286 с.
- [6] *Руководство Совета Европы по приготовлению, использованию и обеспечению качества компонентов крови*. Москва, СИ-ЛАБ Фертрибстез.м.б.х., 1996.

УДК 621.565

## **Кондиционер транспортного средства**

**© Макаров Анатолий Николаевич, Макарова Лия Алексеевна**

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[riidiik91@mail.ru](mailto:riidiik91@mail.ru), [LAMakarova@kai.ru](mailto:LAMakarova@kai.ru)

*Представлена разработка автомобильного кондиционера, работающего по принципу сорбции, который позволяет кондиционировать салон автомобиля без потребления мощности двигателя. Для работы кондиционера используется бросовое тепло работы двигателя, что позволяет экономить топливо и сохранять окружающую среду, благодаря отказу от озоноразрушающих фреонов и уменьшения количества выхлопных газов.*

**Ключевые слова:** *холодильная техника, кондиционер транспортного средства, сорбционный кондиционер, дефлегматор.*

В настоящее время в автомобилестроении широко применяются автомобильные кондиционеры компрессионного типа, работающие от двигателя. Недостатком этих кондиционеров является высокое энергопотребление до 10 % мощности отбираемой с вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Более высокой эффективностью с точки зрения потребления энергии характеризуется сорбционный кондиционер, содержащий последовательно соединенные трубопроводами в контур циркуляции рабочего вещества генератор, отделитель жидкости — дефлегматор, охладитель — конденсатор газообразного компонента, охладитель жидкого компонента, смеситель, и перекачивающий электронасос. Компонентная схема представлена на рис. 1.

Внутри экспериментального сорбционного автомобильного кондиционера находится рабочее вещество — смесь жидкостей имеющие разные температуры кипения. Процесс смешения этих жидкостей сопровождается эндотермическим эффектом, например, смесь бутанола с ацетоном в соотношении 50 : 50.

Экспериментальный сорбционный автомобильный кондиционер работает следующим образом: при подводе теплоты тосола ДВС в генераторе при температуре на 15...30 °С выше температуры охлаждающей среды выпаривается ацетон. В трубопроводе на выходе из генератора образуется столб парожидкостной смеси, а на входе — столб рабочего раствора в жидком состоянии. За счет разности плотностей смесь па-

ра и жидкости выдавливается в дефлегматор — отделитель жидкости, из которого горячий спирт попадает в теплообменник жидкого компонента, охлаждаемого наружным воздухом, и в смеситель кондиционера.

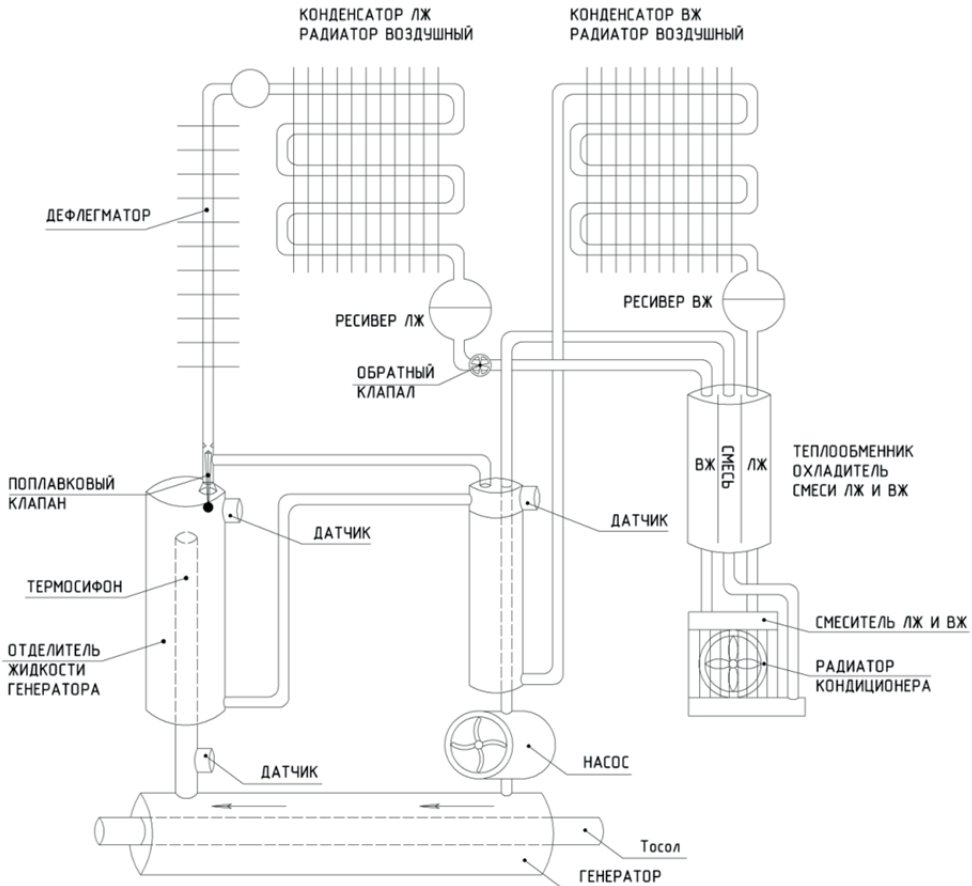


Рис. 1. Компоновочная схема сорбционного кондиционера

В дефлегматоре пары ацетона очищаются от спирта и попадают в охладитель-конденсатор газообразного компонента, охлаждаемый наружным воздухом, затем они подаются в смеситель. При смешении поглощается теплота образующегося раствора в количестве до 40 кДж/кг, температура смесителя понижается, он начинает охлаждать воздух в теплообменнике кондиционера, обдуваемого вентилятором и подающего охлажденный воздух в систему кондиционирования кабины автомобиля. Образовавшееся рабочее вещество вновь поступает в генератор при помощи электрического вспомогательного насоса, предназначенного в основном для регулирования скорости потока рабочей жидкости.

Результаты тепловых расчетов представлены на рис. 2.

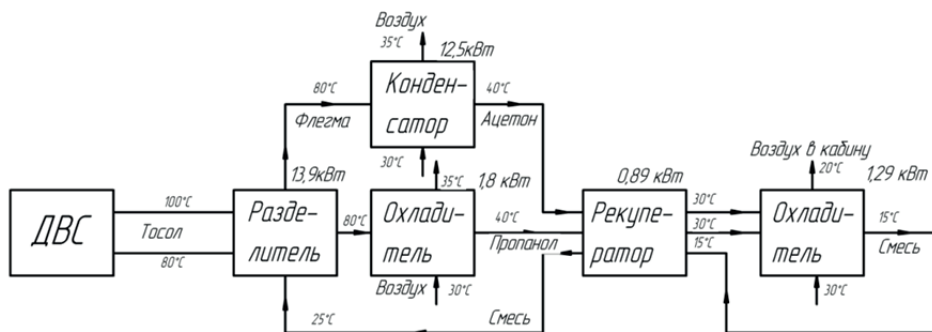


Рис. 2. Тепловой баланс, рассчитанный для рабочих тел ацетон — бутанол

### Литература

- [1] Дрейцер Г.А. *Компактные теплообменные аппараты*. Москва, МАИ, 1986, 74 с.
- [2] Кейс В.М., Лондон А.Л. *Компактные теплообменники*. Москва, Энергия, 1967, 224 с.
- [3] Мигай В.К., Назаренко В.С., Новожилов И.Ф. *Регенеративные вращающиеся воздухонагреватели*. Ленинград, Энергия, 1971, 168 с.
- [4] Данилова Г.Н., Богданов С.Н., Иванов О.П., Медникова Н.М., Крамской Э.И. *Теплообменные аппараты холодильных установок*. Ленинград, Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986, 303 с.
- [5] Кошкин В.К., Калинин Э.К. *Теплообменные аппараты и теплоносители*. Москва, Машиностроение, 1986, 303 с.

УДК 629.7.048.3

## Формирование требований к электроприводному компрессору системы кондиционирования воздуха полностью электрического самолета

© Никулин Андрей Викторович, Меркулов Владислав Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный машиностроительный университет «МАМИ»; АО Технодинамика

[andreinikylin@mail.ru](mailto:andreinikylin@mail.ru)

*Рассмотрены отличия между традиционными и перспективными системами кондиционирования воздуха (СКВ) летательных аппаратов. Проанализированы достоинства и недостатки безотборной схемы СКВ, проведено сравнение с зарубежными аналогами. По результатам анализа сформированы требования к электроприводному компрессору СКВ полностью электрического самолета. Предложен вариант схемного решения безотборной схемы СКВ, заявлена реализуемость и целесообразность продолжения работ по разработке электроприводного компрессора СКВ полностью электрического самолета.*

**Ключевые слова:** система кондиционирования воздуха; система отбора воздуха; электрический самолет; электроприводной компрессор.

Сложившаяся на настоящее время проектная практика создания пассажирских самолетов сформировала функциональные требования и облик традиционной системы подготовки воздуха для системы кондиционирования воздуха (СКВ). Традиционно основное назначение системы подготовки воздуха — обеспечить отбор сжатого воздуха от выбранного источника: компрессоров маршевого двигателя (МДУ) или служебного компрессора вспомогательной силовой установки (ВСУ). Кроме того, может предусматриваться возможность отбора сжатого воздуха от наземной установки высокого давления.

Традиционные пневматические системы обычно используют большее количество энергии, чем это требуется для большинства режимов эксплуатации, обуславливая большие потери энергии. Для распределения сжатого воздуха в самолете используются трубопроводы с обратными клапанами и предварительными теплообменниками, изготовленные из стали, что значительно увеличивает вес самолета.

В безотборной концепции электроприводные компрессоры поз. 7.2 (рис. 1) обеспечивают функцию наддува кабин свежим заборным воздухом, поступающим через специальные воздухозаборники с коэффициентом восстановления давления не ниже 0,98. Этот способ значительно эффективнее традиционных СКВ с системой отбора, поскольку он позволяет избежать лишних энергозатрат, связанных с потерями на предварительное охлаждение и регулирующую арматуру. При этом не нужно снижать давление отбираемого сжатого воздуха. Вместо этого сжатый воздух производится управляемыми компрессорами с заданным давлением без существенных потерь энергии. В результате достигается значительное снижение расхода топлива.

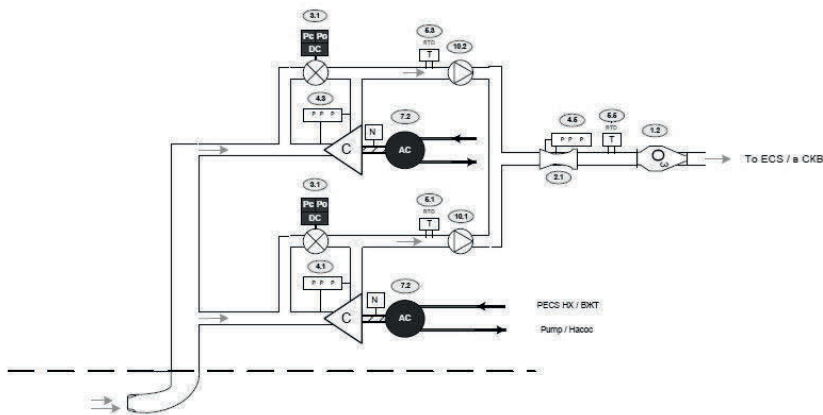


Рис. 1. Схема СКВ

Концепция безотборной системы на Boeing 787 позволяет двигателю повысить производимую тягу, поскольку весь воздух сжимаемый в двигателе используется для создания тяги.

Реализация такой системы обладает рядом существенных преимуществ:

- автономный нагнетатель обеспечивает на входе в систему кондиционирования параметры, потребные для каждого режима работы системы, что исключает необхо-



димось дросселирования рабочего воздуха, характерное для традиционных систем с отбором воздуха от МДУ. Это обстоятельство позволяет минимизировать работу сжатия рабочего воздуха;

- давление сжатого воздуха никогда не превышает рабочие параметры, т. е. в охлаждающем тракте СКВ отсутствуют выбросы давления, при которых давление достигает предельных значений, что повышает долговечность трубопроводов и агрегатов системы при снижении их массы.

Однако реализация этих преимуществ требует взамен системы отбора воздуха с агрегатами и трубопроводами разработки электрокомпрессора с большим диапазоном регулирования по  $\pi_k$ . При полете на крейсерском режиме значение  $\pi_k$  должно составлять 8...10 единиц при расходе воздуха 2 000 кг/ч, что потребует отбора мощности от двигателя 260 кВт·А.

Электропривод компрессора мощностью 260 кВт·А при существующих весовых отдачах  $\approx 0,7$  кг на 1 кВт·А приведет к увеличению массы агрегатов до 190 кг. Установка генераторов в конструкции двигателя существенно влияет на удельные расходы топлива, особенно на режиме полета «крейсерский».

При отборе мощности на режиме «крейсерский» от газогенератора, от ротора высокого давления влияние отбора механической мощности с номиналом 260 кВт·А оказывает практически такое же влияние на отбор мощности от двигателя, как отбор воздуха от компрессора высокого давления.

В отличие от схемы, применяемой на самолете Boeing 787, предлагается использовать СКВ с автономным компрессором и установкой охлаждения парокompрессионного цикла охлаждения (полностью электрическая СКВ).

Рассматривалась СКВ пассажирского самолета на 200 пассажиров с полностью электрической СКВ. Результаты расчета параметров электроприводного компрессора, в зависимости от высоты полета, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Высота полета, м	12 000	0
$p_n$ , кПа	19,4	101,3
$p_{каб}$ , кПа	81,5	101,3
$t_n$ , °С	-36	37
M	0,8	0
$p_{вх.эл.компр}$ , кПа	28,76	101,3
$G_{СКВ}$ , кг/ч	4120	5 150
$P_{вых.эл.компр}$ , кПа	112	145
$\pi_k$	3,89	1,43
$KПД_{эл.компр}$	0,75	0,75
$\Delta T_{компр}$ , °С	169,2	44,6
$t_{компр.вых.}$ , °С	163,5	81,6
$N_{компр}$ , кВт	194,6	64,1
$KПД_{эл.двиг}$	0,8	0,8
Мощность, потребляемая из сети электрокомпрессора, кВт	243,2	80,1

Таким образом, одним из альтернативных вариантов СКВ полностью электрического самолета является СКВ с автономным компрессором и установкой охлаждения

парокомпрессионного цикла охлаждения. Выполненный термодинамический анализ показал реализуемость технических требований при разработки электроприводного компрессора СКВ ПЭС. Проведенный анализ показал целесообразность продолжения работ по разработке электроприводного компрессора СКВ ПЭС.

### Литература

- [1] Антонова Н.В., Шустров Ю.М. *Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Москва, Машиностроение, 2006, 384 с.
- [2] Мусин С.М, Харитонов С.А., Ковалев К.Л. *Электрический самолет: Концепция и технологии*. Уфа, УГАТУ, 2014, 288 с.
- [3] Николенко В.Ю., Клочков В.В. *Современная организация создания авиатехники*. Москва, Изд-во Московского гос. Ун-та леса, 2013, 348 с.
- [4] Никулин А.В., Меркулов В.И. Акустическое проектирование агрегатов систем воздухообмена на транспорте. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2013, т. 1 2 (16).

УДК 621.52

## Метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса с комбинированной проточной частью в широком диапазоне давлений

© Очков Андрей Андреевич, Демихов Константин Евгеньевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[aochkov@mail.ru](mailto:aochkov@mail.ru)

*Предложен комплексный метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса с комбинированной проточной частью в широком диапазоне рабочих давлений при различных режимах течения газа. В ходе проведенных исследований выполнена оценка эффективности влияния различных факторов на откачные характеристики турбомолекулярных вакуумных насосов с комбинированной проточной частью. На основании полученных результатов даны рекомендации по проектированию оптимальной конструкции проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса.*

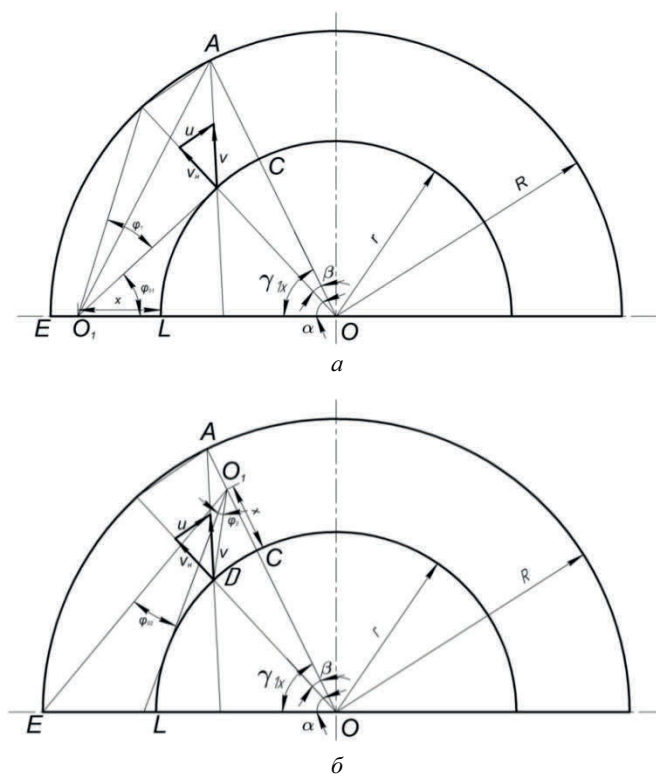
**Ключевые слова:** турбомолекулярный вакуумный насос, рабочее давление, откачные характеристики.

В современной промышленности турбомолекулярные вакуумные насосы (ТМН) находят все большее применение благодаря своим преимуществам: возможности эффективно работать при относительно высоких давлениях на стороне нагнетания (до 1000 Па), относительно высокой степени повышения давления при работе с лег-

кими газами (ТМН практически не загрязняют откачиваемый объем различного рода органическими веществами) и др. Анализируя современный рынок вакуумной техники, можно заключить, что наиболее распространены ТМН с комбинированной проточной частью (осевые и молекулярные ступени).

В настоящее время существует проблема оптимизации ТМН, особенно с комбинированной проточной частью, работающих в широком диапазоне давлений при различных режимах течения газа. В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» разработан метод расчета оптимальных параметров межлопаточных колес ТМН, однако он не позволяет провести процесс оптимизации в широком диапазоне рабочих давлений насоса и, тем более, при различных режимах течения газа.

Разработан комплексный метод расчета оптимальной откачной характеристики ТМН с комбинированной проточной частью в широком диапазоне давлений при различных режимах течения газа. Впервые разработана математическая модель процесса откачки газа как цилиндрическим, так и дисковым молекулярным вакуумным насосом в широком диапазоне давлений. Двухмерная расчетная схема представлена на рис. 1. Адекватность математической модели проверена сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными. Погрешность не превысила 20 %, причем максимальное расхождение наблюдается при работе насоса в молекулярно-вязкостном (переходном) режиме течения газа.



**Рис. 1.** Расчетная схема переноса молекул газа каналом цилиндрического МВН в направлении откачки (а) и со стороны нагнетания (б)

На основании разработанной математической модели создано программное обеспечение, позволяющее рассчитать оптимальную конструкцию молекулярных ступеней, входящих в состав ТМН с комбинированной проточной частью для различных критериев оптимальности.

В ходе проведенных исследований оценена эффективность влияния различных факторов на откачные характеристики ТМН с комбинированной проточной частью. На основании полученных результатов даны рекомендации по проектированию оптимальной конструкции проточной части ТМН.

### Литература

- [1] Демихов К.Е., Никулин Н.К. *Оптимизация высоковакуумных механических насосов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 255 с.
- [2] Демихов К.Е., Очков А.А. Метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, Спец. вып. № 4 «Вакуумные и компрессорные машины и пневмооборудование», с. 20–23.
- [2] Демихов К.Е., Очков А.А. Программное обеспечение оптимизации основных параметров турбомолекулярных вакуумных насосов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/750.html> (дата обращения 13.08.2015).
- [3] Демихов К.Е., Очков А.А. Математическая модель процесса откачки газа цилиндрическим молекулярным вакуумным насосом в широком диапазоне давлений. *Наука и образование*. 2014, № 12, с. 200–209. URL: <http://tectnomag.edu.ru/mdocs/scope.htm> (дата обращения 13.08.2015).
- [4] Myoung-Keon Kwon, Young-Kyu Hwang. An Experimental Study on the Pumping Performance of Molecular Drag Pumps. *Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.)*, 2006, vol. 20, no 9, pp. 1483–1491.
- [5] The Vacuum technology book. Vol. II. Pfeiffer Vacuum GmbH. April 2013.
- [6] Hybrid turbomolecular pumps ATH series. Adixen Alcatel GmbH. October 2013.
- [7] Pfeiffer vacuum catalogue. Pfeiffer vacuum GmbH. April 2013.
- [8] Mauro Audi, Silvio Giors, Romina Gotta. *The state of the art in Molecular-Drag Turbo-pump Technology*. Agilent Technologies Vacuum Products Division. Agilent technologies GmbH. 2011.

УДК 532.685+57.088.3

## Разработка высокоэффективной мобильной установки для выделения ДНК

© Пугачук Александр Сергеевич, Чернышев Андрей Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[pugachukalexandr@mail.ru](mailto:pugachukalexandr@mail.ru)

*Разработана математическая модель течения рабочей среды в установках вакуумной сепарации растворов ДНК. Проведено численное и экспериментальное исследование рабочих процессов в блоке вакуумной сепарации. Подтверждена адекватность разработанной модели рабочих процессов. Выявлены недостатки существующих установок пробоподготовки. Предложены конструктивные решения, позволяющие*

*улучшить эффективность установок вакуумной сепарации. Разработана новая малогабаритная мобильная установка для подготовки проб ДНК, модифицированная устройствами для повышения эффективности выделения ДНК.*

**Ключевые слова:** *вакуум, сепарация, выделение, ДНК, неравномерность, сорбент, математическая модель.*

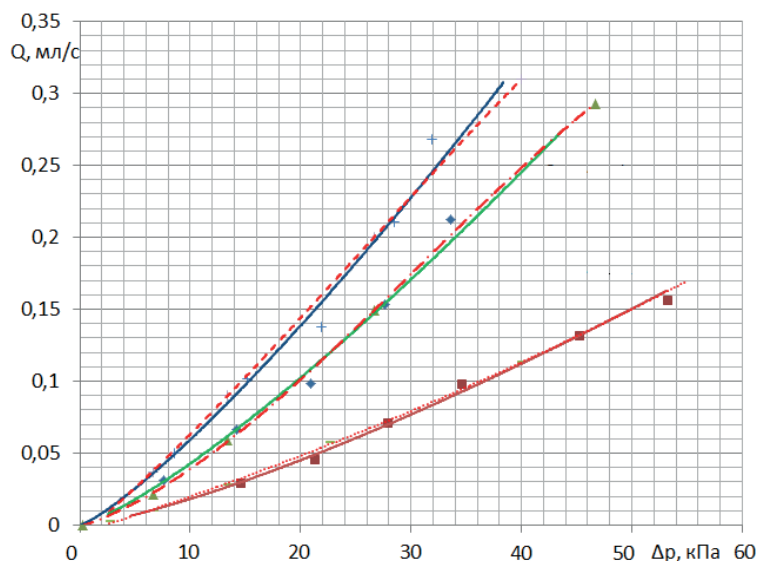
В настоящее время подготовка пробы является одним из наиболее значимых стадий выполнения молекулярно-генетических исследований [1, 2]. Она заключается в том, что исходный биологический материал предварительно измельчается, очищается от крупных неорганических частиц, вносится в специальный раствор и из клеток выделяется ДНК. Выделение ДНК проводят, предварительно разрушив клеточную структуру биоматериала, т. е. после процесса лизиса клеток. Высвобожденные из клеток белковые структуры растворяются. Полученный раствор является первичным для начала процесса выделения ДНК.

Существует множество методов выделения ДНК, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее распространен метод сорбции ДНК на магнитных частицах, так как он достаточно эффективен и может быть автоматизирован. Однако он очень трудоемок и связан с высокими затратами, поэтому неприемлем для использования малыми потребителями, например, небольшими региональными медицинскими или научными лабораториями. Имеющееся оборудование для выделения ДНК представлено в основном крупными автоматизированными комплексами зарубежного производства, которое требует огромных вложений при покупке расходного материала и самого оборудования. Поэтому актуальной задачей является поиск и реализация менее затратных методов выделения ДНК. Таким методом является метод вакуумной сепарации. Установки, реализующие этот метод, называются установками вакуумной сепарации [3]. Принцип метода прост и не требует сложных операций и дорогостоящего расходного материала. Однако до последнего времени он был слабо распространен в связи с низкой эффективностью, причины которой не были изучены.

Целью данного исследования — разработка новой малогабаритной высокоэффективной установки для выделения ДНК на основе анализа внутренних процессов в рабочей полости установок вакуумной сепарации.

Основным процессом, протекающим внутри установок вакуумной сепарации, является течение рабочей среды через порошок сорбента, на котором происходит процесс сорбции молекул ДНК. Проведен анализ данного процесса и разработан метод расчета его гидродинамических параметров, позволяющий определить распределение основных характеристик при заданных условиях [4]. Результаты численного расчета процесса течения рабочей среды в установках вакуумной сепарации с помощью разработанной математической модели с инженерной точностью согласуются с данными, полученными экспериментально. Проведение серии экспериментов стало возможным благодаря созданию экспериментальной установки вакуумной сепарации [5]. Полученные в ходе работы экспериментальные и расчетные характеристики (рис. 1) позволили выявить причину низкой эффективности применяемых установок вакуумной сепарации — неравномерность протекания основного рабочего процесса из-за различия расходных характеристик течения рабочей среды через ячейки установки вакуумной сепарации. Предложены варианты конструктивных модификаций (устройств снижения неравномерности очистки), позволяющие избежать неравномерности течения рабочей среды и повысить эффективность выделения ДНК. Проведено численное исследование

основного рабочего процесса с использованием предложенных модификаций и выбрана наиболее эффективная конструкция.



**Рис. 1.** Экспериментальные (—) и расчетные (---) зависимости расхода рабочей среды от перепада давлений между атмосферой и рабочей полостью установки вакуумной сепарации для трех различных рабочих ячеек

Результатом выполненной работы является мобильная установка для выделения ДНК, принцип действия которой основан на методе вакуумной сепарации, модифицированная с помощью устройств снижения неравномерности очистки. В дальнейшем планируется провести комплекс ее испытаний в институте им. Н.А. Белозерского МГУ им. М.В. Ломоносова.

## Литература

- [1] Андронов Е.Е., Пинаев А.Г., Першина Е.В., Чижевская Е.П. *Научно-методические рекомендации по выделению высокоочищенных препаратов ДНК из объектов окружающей среды*. Санкт-Петербург, 2011, 23 с.
- [2] Антонова О.С., Корнева Н.А., Белов Ю.В., Курочкин В.Е. Эффективные методы выделения нуклеиновых кислот для проведения анализов в молекулярной биологии. *Научное приборостроение*, 2010, т. 20, № 1, с. 3–9.
- [3] Пугачук А.С., Кузнецова Ю.С. Пневмовакuumная установка сепарации растворов ДНК. *Молодежный научно-технический вестник* URL: <http://technomag.edu.ru/rub/531602/index.html> (Дата обращения 10.03.2015).
- [4] Пугачук, А.С., Чернышев, А.В. Исследование процесса двухфазного течения смеси в установке вакуумной сепарации ДНК. *Инженерный журнал: наука и инновации*. URL: <http://engjournal.ru> (дата обращения 10.03.2015).
- [5] Пугачук А.С., Губинская Т.А., Чернышев А.В. Экспериментальное исследование течения жидкости через рабочие ячейки пневмовакuumной установки пробоподготовки. *Инженерный вестник: Наука и образование*, 2014, № 12.

УДК 621.6

## **Разработка блока высокого давления для осуществления многоступенчатой заправки адсорбционной системы аккумулирования природного газа**

© Подчуфаров Алексей Алексеевич, Стриженов Евгений Михайлович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[alexey.podchufarov@gmail.com](mailto:alexey.podchufarov@gmail.com)

*С развитием технологий использования природного газа возникают вопросы, связанные с его хранением и эффективным использованием в качестве газомоторного топлива. Известно несколько способов хранения природного газа в сжатом и сжиженном состоянии. Высокое давление сжатого и испарения сжиженного газа предъявляют высокие требования безопасности при эксплуатации данных систем. В качестве альтернативы в настоящее время активно исследуются технологии создания адсорбционных систем хранения природного газа.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, энергосбережение, пожаровзрывобезопасность, адсорбция, природный газ, метан, система аккумулирования.

По запасам природного газа Россия является мировым лидером, обладая 25 % мировых запасов. Использование природного газа в качестве транспортного топлива способствует уменьшению выбросов углекислого газа до 25 %, угарного газа до 95 %, углеводородов в 2 раза и обеспечивает отсутствие твердых частиц в выхлопе на этом газе. При этом важным фактором является низкая стоимость природного газа по сравнению с бензином и дизельным топливом. При всех достоинствах природного газа основной проблемой является несовершенство систем его хранения, которым присущи существенные недостатки, препятствующие развитию газомоторного топлива.

В настоящее время в качестве альтернативы существующим системам хранения природного газа, таким как сжиженный природный газ (СПГ) и компримированный природный газ (КПК), активно исследуются адсорбционные системы хранения (АПГ), представляющие собой сосуды, заполненные пористым адсорбентом, и обладающие высокими аккумулирующими свойствами [1–3]. В отличие от систем с КПК, работающих под давлением ~20 МПа, АПГ функционируют при значительно меньших давлениях (до 7 МПа).

В данной работе рассмотрены вопросы разработки блока высокого давления для многоступенчатой заправки адсорбционной системы аккумулирования природного газа. При использовании многоступенчатой заправки, общий объем газа разбивается на несколько частей, каждая часть сжимается до определенного давления и последовательно подается в сосуд-адсорбер. По расчетам данная оптимизированная заправка позволяет экономить 50...70 % электроэнергии на заправку.

Представлена оригинальная схема многоступенчатой заправки адсорбционной системы аккумулирования природного газа. Полученные результаты позволяют использовать существующие на рынке элементы конструкции для сокращения времен-

ных и денежных затрат при проведении исследований и разработок. На следующем этапе работы планируется сборка экспериментального стенда, осуществляющего процесс заправки адсорбционной системы для проверки адекватности и точности проведенных расчетов.

*Данная работа выполняется в рамках Соглашения № 14.577.21.0125 с Минобрнауки России, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57714X0125.*

### Литература

- [1] Кельцев Н.В. *Основы адсорбционной техники*. Москва, Химия, 1976, с. 511.
- [2] Стриженов Е.М., Фомкин А.А., Жердев А.А., Прибылов А.А. Адсорбция метана на микропористом углеродном адсорбенте АУ-1. *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2012, т. 48, № 6, с. 521–526.
- [3] Стриженов Е.М., Жердев А.А., Никифоров Ю.В., Фомкин А.А. Адсорбция метана в микропористом углеродном адсорбенте. *Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности. Материалы XIV Всерос. симп. с участием иностранных ученых*. Москва, 26–30 апреля 2010.

УДК 621.6.02:621.89-590-82

## **Результаты исследовательских испытаний нового типа привода, основанного на использовании эффекта «предельного пневмомолота» в радиальном газостатическом подшипнике**

© Ткачев Иван Сергеевич, Пешти Юлий Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[TkachevIS@technodinamika.ru](mailto:TkachevIS@technodinamika.ru)

*Рассмотрена возможность создания привода, основанного на использовании эффекта «предельного пневмомолота» в радиальном газостатическом подшипнике. Обобщены условия возникновения эффекта «предельного пневмомолота». Составлены рекомендации по применению привода в системах кондиционирования воздуха современных авиационных летательных аппаратов, холодильной технике. Показаны перспективы применения привода в качестве поворотного механизма искробезопасного запорного вентиля. В трехмерном отображении получены результаты первых теоретических исследований газостатического подшипника, работающего в режиме «предельного пневмомолота». Впервые представлен стенд для исследования рабочих характеристик привода, а также приведены первые результаты, на основании которых определены характерные особенности появления режима «предельного пневмомолота»; найдены уравнения и структура фазовой диаграммы, соответ-*



ствующие режимам «пневмомолота» и «предельного пневмомолота»; установлены основные условия возникновения режима «предельного пневмомолота». Также впервые уточнена зависимость, которая приводит к возникновению эффекта «предельного пневмомолота». Определены основные конструктивные и эксплуатационные требования к разрабатываемому приводу. Проанализировав полученные результаты, предложены дальнейшие этапы разработки и облик нового привода.

**Ключевые слова:** предельный пневмомолот, газостатический подшипник, привод, система кондиционирования воздуха, авиация.

При определенных сочетаниях геометрических размеров газостатического радиального подшипника с покоящимся валом и параметров наддуваемого в рабочий зазор подшипника газа возникают самовозбуждающиеся колебания вала. Это явление динамической неустойчивости первоначально невращающегося вала получило название «пневмомолот» [1]. При случайном сближении цапфы вала со стенкой вкладыша подшипника происходит их соприкосновение, приводящее к возникновению эффекта «предельного пневмомолота».

Работа газостатического подшипника в режиме «предельного пневмомолота» характеризуется определенным крутящим моментом на валу и постоянной частотой вращения вала со скоростью 2...5 об/мин, что создает предпосылку для создания привода на основе этого эффекта, который мог бы найти применение в различных областях машиностроения. Например, в качестве привода льдогенератора, искробезопасных поворотных механизмов заслонок трубопроводов, системах автоматического поддержания давления и системах кондиционирования воздуха. Перспективным также является использование нового типа привода в качестве демпфирующего устройства с основной несущей частотой, отличной от вибрационных частот авиационных средств.

Новый тип привода также находит широкое применение в смесительных устройствах химического производства и в технологических процессах разработки основных агрегатов систем жизнеобеспечения бортовых средств: например, в качестве вибростенда для уплотнения в патронах хемосорбентов и силикагелей для осушителей бортового радиоэлектронного оборудования, а также в технологических системах, имеющих развитую пневматическую сеть.

В литературе отсутствуют данные по разработке привода на основе автоколебательных газостатических устройств [2–4].

Впервые эффект кручения вала с постоянной частотой и вращением был запатентован в МГТУ им. Н.Э. Баумана [5].

Цель работы — разработка нового типа привода, основанного на использовании эффекта «предельного пневмомолота» в радиальном газостатическом подшипнике.

Для создания нового привода в настоящей работе решены следующие задачи: создание стенда для исследования нового типа привода и проведение первых испытаний. Разработанный стенд обеспечивает гибкость регулировки как параметров газа, так и конструктивных параметров подшипника.

Все расчеты впервые выполнены при переменном коэффициенте расхода, который учитывает изменение зазора в режиме предельного пневмомолота [6, 7].

Все результаты расчетных параметров газа впервые получены в трехмерном графическом виде.

В процессе испытаний газостатический подшипник помещался в бронекамеру. По результатам испытаний нового привода впервые были получены фазовые диа-

граммы автоколебательного процесса, характерные для «пневмомолота» и «предельного пневмомолота». Были определены виды уравнений фазовых диаграмм. Также установлено, что наступление режима «пневмомолота» соответствует мягкому самовозбуждению, в то время как режим «предельного пневмомолота» обычно наступает при жестком самовозбуждении, условием возникновения которого может быть увеличение давления наддува или заклинивание дросселей.

В процессе испытаний были определены следующие характерные особенности работы нового привода:

- наступление вращения вала характеризовалось появлением акустического низкочастотного фона, который изменялся в зависимости от давления наддува. Низким давлениям соответствовал низкочастотный фон. При увеличении давления наддува частота фона росла. При этом вибрационная частота во всем диапазоне давлений менялась прямо пропорционально. Таким образом, «привыкнув» к фону, можно определять на слух режим работы привода;

- на режимах работы газостатического привода не сказывалось отсутствие воздушного фильтра и влияние конденсата, попадающего с рабочим воздухом в зазор и дроссели. Однако наличие влаги, безусловно, оказывало коррозирующее действие на корпус подшипника;

- при высоких давлениях проявлялся эффект Джоуля — Томпсона, который заключался в падении температуры потока на дросселях и появлении инея на трубках;

- при заклинивании дросселей, т. е. снижении расхода на выходе из подшипника, режим «пневмомолота» обнаруживался при очень небольших давлениях наддува.

Среди прочих условий возникновения эффекта «предельного пневмомолота» было впервые получено выражение для определения минимальной величины радиального зазора, равное  $R_v \cdot 10^{-6} \cdot 0,85$ , где  $R_v$  — радиус ротора привода.

Таким образом, для достижения цели настоящей работы впервые были поставлены и решены следующие задачи:

- предложена методика расчета наступления режима «предельного пневмомолота» с апробацией методики на исследовательском стенде;

- выявлены характерные особенности появления режима «предельного пневмомолота»;

- определены уравнения и структура фазовой диаграммы, соответствующие режимам пневмомолота и предельного пневмомолота;

- выявлены основные условия возникновения режима «предельного пневмомолота»;

- определены основные конструктивные требования к разрабатываемому приводу;

- определены основные эксплуатационные требования к разрабатываемому приводу.

Следует подчеркнуть, что в литературе, посвященной вопросам динамической неустойчивости ротора в газостатических опорах, отсутствуют данные об исследовании и разработке привода, основанного на использовании эффекта «предельного пневмомолота».

Научная новизна настоящей работы заключается в том, что все перечисленные выше задачи по расчету привода, разработке стенда для его испытаний и выводов по результатам испытаний сформулированы и выполнены впервые.

## Литература

- [1] Пешти Ю.В. *Газовая смазка* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1993, 381 с.
- [2] Trippet R.J., Oh K.P., Rohde S.M. Theoretical and Experimental Load-deflection. *Studies of a Multileaf Journal Bearing. Topics in Fluid Film Bearing Design and Optimization: Presented of the Design Engineering Conference, Chicago*. Illinois, 1978, April, pp. 130–156.
- [3] *Design Gas bearings*. N.Y., Mechanical Technology Incorporated, 1969, 673 с.
- [4] Кунина В.В., Пешти Ю.В. Аналитическое определение неустойчивых режимов работы газостатических радиальных подшипников с гладкими рабочими поверхностями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Машиностроение*, 1998, с. 151–159.
- [5] А.С. № 824714. *Способ создания вращательного движения вала*.
- [6] Выгодский М.Я. *Справочник по высшей математике*. Москва, АСТ: Астрель, 2006, 246 с.
- [7] Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. Москва, Машиностроение, 1992, 672 с.

УДК 621.6

## Разработка вихревого регулятора

© Усс Александр Юрьевич, Стародубцев Алексей Александрович,  
Чернышев Андрей Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[uss25.ru@hotmail.com](mailto:uss25.ru@hotmail.com), [Starodubtsev532@rambler.ru](mailto:Starodubtsev532@rambler.ru), [av-chernyshev@yandex.ru](mailto:av-chernyshev@yandex.ru)

*Раскрыта актуальность и области применения вихревых регуляторов. Рассмотрено состояние вопроса на сегодняшний день по использованию и разработке вихревых регуляторов, приведена схема вихревого регулятора. По результатам анализа опубликованных данных и предварительного численного расчета течения газа в рабочей полости вихревого регулятора определены его геометрические параметры, разработана трехмерная модель. С применением аддитивных технологий изготовлен опытный образец вихревого регулятора и для проведения его испытаний подготовлен экспериментальный стенд.*

**Ключевые слова:** вихревой регулятор, управляющая струя, запирание регулятора.

Регуляторы параметров газа — устройства, поддерживающие с заданной точностью давление и расход рабочего тела на постоянном уровне либо изменяющие эти параметры по заданной программе.

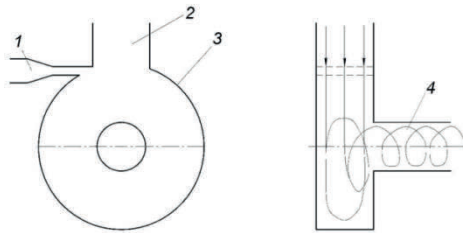
Решение проблем взаимодействия потоков регулирования параметров рабочей среды с использованием вихревых регуляторов, которые имеют ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с другими устройствами, в настоящее время является актуальным. Параметры агрессивных сред необходимо регулировать при проведении различных технологических процессов в пневмогидравлических системах, применяемых в космической, авиационной, нефтегазовой, химической и других областях промышленности, где газ может находиться при высокой температуре и иметь раз-

личные загрязняющие включения, такие как пары металлов или химически активные частицы.

На практике применяют мембранные регуляторы. Одним из наиболее простых и надежных является регулятор, принцип действия которого основан на использовании вихревого течения газа. Схема, поясняющая принцип действия вихревого регулятора, показана на рис. 1.

Анализ опубликованных данных [1–3] показал, что такой тип регуляторов характеризуется широкой областью применения. По сравнению с другими видами регуляторов данное устройство имеет ряд неоспоримых преимуществ:

- простота конструкции (отсутствие подвижных элементов);
- долговечность;
- невосприимчивость к воздействию электромагнитных полей;
- невосприимчивость к радиационному воздействию;
- возможность работы с различного рода газами и их смесями;
- низкая стоимость изготовления (производства);
- низкие эксплуатационные затраты.



**Рис. 1.** Схема вихревого регулятора:  
1 — управляющий канал; 2 — питающий канал; 3 — вихревая камера; 4 — выходной канал

Изучив методы расчета [1–4] и исследовав рабочие процессы в вихревых регуляторах, авторы данной работы пришли к заключению, что единого понимания в теории процессов, происходящих в этих устройствах, до сих пор не достигнуто. Основные зависимости давления в выходном патрубке регулятора от расхода в питающем сопле заложил в своих работах Л.А. Залманзон [1]. Для разработки новых конструкций вихревых регуляторов с применением современных программных пакетов и на базе современной компьютерной техники создана математическая модель процессов, происходящих внутри вихревой камеры [5].

Цель работы — получить экспериментальные данные по давлению и расходу в выходном канале, сопоставить их с результатами расчета, экспериментально «запереть» питающий канал с помощью потока газа из канала управления.

Запирание регулятора означает, что из канала питания в вихревую камеру не поступает поток газа. Согласно опубликованным данным, запирание питающего канала происходит в том случае, если в канал управления подается давление большее, чем в канал питания. На периферии вихревой камеры создается кольцо повышенного давления, которое преграждает путь потоку газа из канала питания.

Результат стационарного расчета движения газа в рабочей камере [5] вихревого регулятора с помощью ANSYS Fluid flow (CFX) показал, что давление в управляющем канале должно быть выше, чем давление в питающем канале.

По заданным размерам вихревой камеры разработана трехмерная модель. Опытный образец вихревого регулятора выполнен с применением аддитивных технологий (рис. 2).



**Рис. 2.** Трехмерная модель вихревого регулятора

Для проведения испытаний вихревого регулятора на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана создан экспериментальный стенд.

#### **Литература**

- [1] Залманзон Л.А. *Теория элементов пневмоники*. Москва, Наука, 1969, 508 с.
- [2] Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. *Элементы струйной автоматики*. Москва, Машиностроение, 1973, с. 289–314.
- [3] Бугаенко В.Ф. *Пневмоавтоматика ракетно-космических систем*. Будник В.С., ред. Москва, Машиностроение, 1979, 168 с.
- [4] Попов Д.Н., ред. Исследование и расчет струйных элементов и цепей систем автоматического регулирования. *Труды МВТУ*, 1977, № 244, 79 с.
- [5] Белова О.В., Стародубцев А.А., Чернышев А.В. Вихревой регулятор давления газа. *Инженерный вестник*, 2014, вып. 5. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/740398.html>

УДК 614.0.06

## Компоненты объектов историко-культурного наследия как индикатор уровня экологической и техногенной безопасности города Казани

© Алексеева Екатерина Ивановна, Романовский Владимир Леонидович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[kleongardt@bk.ru](mailto:kleongardt@bk.ru)

*В Республике Татарстан насчитывается более 7 тысяч объектов культурного наследия. Наблюдения за их состоянием показывают, что они нуждаются в действенной охране, консервации и реставрации. Важно не только сохранить памятники старины, но и создать условия для их функционирования.*

*Для систематизации возникающих рисков и проведения научно-обоснованных мероприятий по сохранению объектов культуры предлагается проводить анализ рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на таких объектах с помощью инновационного метода, на основании которого в дальнейшем выработываются рекомендации и план действий по минимизации техносферных рисков.*

**Ключевые слова:** охрана объектов историко-культурного наследия, анализ риска, методология анализа риска, экологическая безопасность, техногенная безопасность.

Охрана историко-культурного наследия является одной из приоритетных задач международного сотрудничества, государственной и региональной политики. Это находит выражение и на законодательно-правовом уровне. Так, в 1972 году ЮНЕСКО приняла Конвенцию об охране всемирного культурного и природного наследия, которая к настоящему времени ратифицирована более чем 120 странами, в том числе и Россией.

В Российской Федерации основы государственной политики в области охраны историко-культурного наследия определяются федеральным законом «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».

Вопросам сохранения объектов культурного наследия посвящено немало исследований в области истории, культурологии и юриспруденции. В последнее время один из актуальных вопросов данной тематики связан с защитой объектов историко-культурного наследия в современных условиях развития промышленности мегаполисов.

К объектам культурного наследия (памятникам истории и культуры), согласно соответствующему федеральному закону РФ, относятся «...объекты недвижимого имущества со связанными с ними произведениями живописи, скульптуры, декоративно-прикладного искусства, объектами науки и техники и иными предметами материальной культуры, возникшие в результате исторических событий, представляющие собой ценность с точки зрения истории, археологии, архитектуры, градостроительства, искусства, науки и техники, эстетики, этнологии или антропологии, социальной культуры и являющиеся свидетельством эпох и цивилизаций, подлинными источниками информации о зарождении и развитии культуры».

Понятие «сохранение» в отношении историко-культурного наследия можно понимать по-разному. Согласно упомянутому закону РФ сохранение объекта культурного наследия — это действия, направленные на обеспечение его физической сохранности, причем среди составляющих понятие «сохранение» выделено как *приспособление объекта культурного наследия для современного использования* — «... научно-исследовательские, проектные и производственные работы, проводимые в целях создания условий для современного использования объекта культурного наследия ...».

Сегодня способы сохранения объектов историко-культурного наследия весьма разнообразны. Благодаря демократизации общественной жизни, развитию туризма и средств массовых коммуникаций растет число людей, получающих доступ к освоению ценностей культуры. Для этого могут быть использованы и такие способы сохранения наследия, как консервация, реставрация, реабилитация, реконструкция, резервация, придание заповедного статуса. Новые информационные технологии позволяют материализовать память культуры, детально зафиксировать отдельные явления и объекты. Наиболее надежный путь — создание условий для непрерывной жизни культурной традиции, но он же и более сложный.

В Республике Татарстан вопрос защиты и сохранения объектов историко-культурного наследия также стал предметом повышенной заботы правительства.

Прошедший не так давно 2012 год был объявлен в республике годом историко-культурного наследия. Для объектов культуры было сделано немало, и сейчас им уделяется огромное внимание.

В республике разработана новая долгосрочная целевая комплексная программа сохранения культурного наследия «Мирас — Наследие» до 2016 года. Целью программы «Мирас — Наследие» является обеспечение реализации государственной политики в области сохранения культурного наследия, создание условий для обеспечения доступа к культурным ценностям и информационным ресурсам граждан и организаций. Задачи программы — изучение и популяризация культурного наследия, обеспечение государственной охраны объектов культурного наследия (памятников истории и культуры), обеспечение сохранности культурного наследия, пополнение музейного и архивного фондов.

Таким образом, с одной стороны, рассмотрение проблемы современного использования историко-культурного наследия как составной части задачи его сохранения предписывается на законодательном уровне. С другой стороны, на сегодняшний день

уровень развития науки, ее возможности обуславливают необходимость и возможность расширения понятия «Сохранение».

Всего на территории Республики Татарстан насчитывается более 7 тысяч объектов культурного наследия. На государственной охране находится 1 540 объектов культурного наследия, из них 150 — федерального значения, 1 076 — республиканского значения, 314 — местного значения. При этом в федеральной собственности находятся 364 объекта, в республиканской — 200 объектов, в муниципальной — 770, в частной собственности — 206 объектов. Из общего количества объектов культурного наследия 513 находятся в Казани. Однако многие из них находятся весьма в плачевном состоянии.

Ускорение физического разрушения объектов культурного наследия антропогенными и природными факторами представляет угрозу их «выживанию» и возможности быть переданными будущим поколениям.

Важной стороной вопроса сохранения объектов историко-культурного наследия в современных условиях является необходимость и возможность разработки методологических подходов, которые позволят на раннем этапе выявить риски возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах историко-культурного наследия или на территории охранных зон в городе Казани.

Используя международный опыт в области защиты объектов экономики, можно разработать такой подход, который позволит эффективно решать задачи, направленные на защиту и сохранение объектов наследия. Один из таких подходов — это анализ риска, который является основой для принятия решений по обеспечению безопасности и проведению мероприятий по повышению устойчивости объектов экономики.

В качестве инновационного метода определения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах историко-культурного наследия автор предлагает применить метод древовидных структур, который поможет научным способом обосновать принятие решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности, влияющих на устойчивость объектов историко-культурного наследия.

Данный метод был разработан профессором КНИТУ-КАИ Романовским В.Л.

Метод древовидных структур позволяет:

- четко формализовать рассматриваемый материал;
- анализировать различные, но взаимосвязанные ситуации и события в рамках одного «дерева»;
- проводить эффективную количественную оценку условий недопущения негативных событий или условий достижения цели;
- равноправно, в рамках одного «дерева», учитывать все элементы системы человек–техника–среда».

Метод древовидных структур (рис. 1) вообрал в себя графоаналитические методы-предшественники и является дальнейшим их развитием. В частности, возможны несколько головных событий (на рис 1 они обведены двойной рамкой); допускается влияние последующих событий на предшествующие (т. е. «прокрутка» части событий во времени); развитие событий по разным «ветвям» структуры в зависимости от изменения текущей ситуации, возможен равноправный учет всех компонентов системы человек–техника–среда в рамках одной структуры.

Для учета всех возможных факторов риска, грозящих объектам наследия, может быть предложена древовидная структура (см. рис. 1), которая поможет реставраторам проанализировать причины разрушения здания и принять превентивные меры.



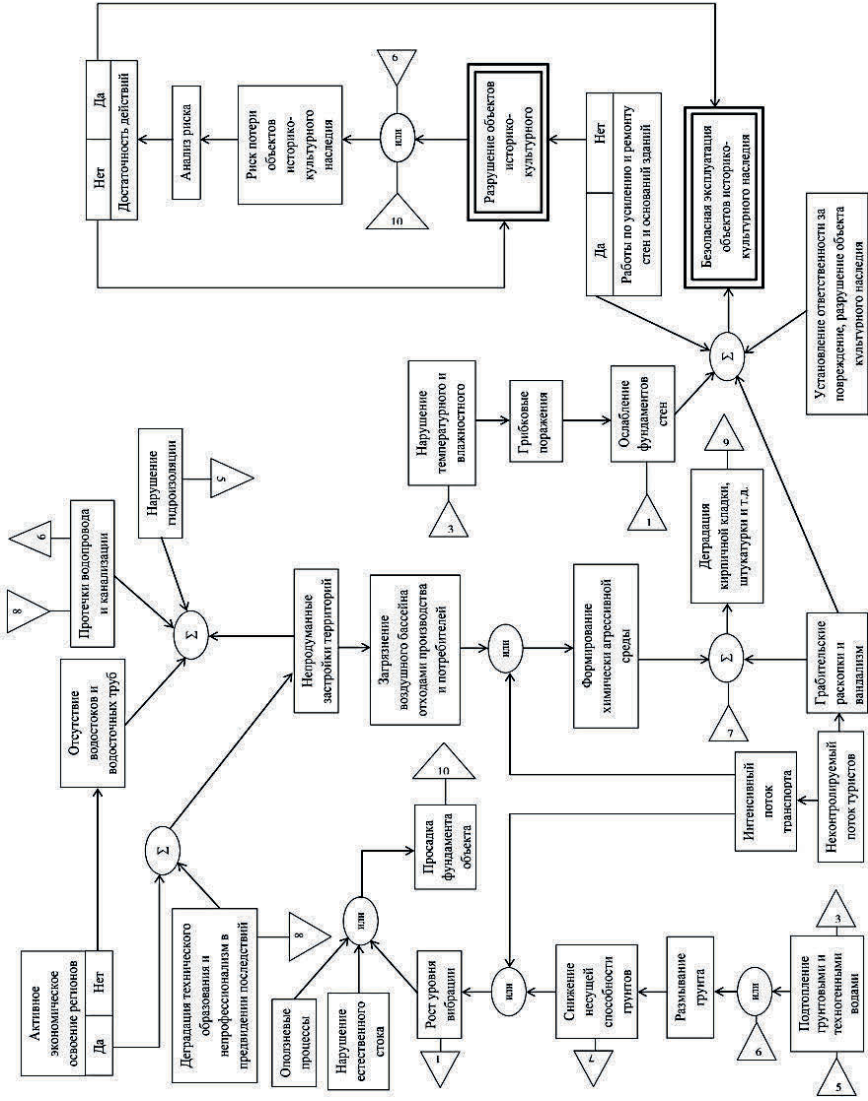


Рис. 1. Древодвижная структура

В частности, эта структура четко демонстрирует очевидное: рано или поздно объект по отмеченным причинам может выйти из строя; подготовленный и внимательный обслуживающий персонал способен предотвратить нежелательные последствия или уменьшить их тяжесть; человеческий фактор играет весьма важную роль на всех этапах; возможность принятия специалистами в конкретной области адекватных обстановке решений определяется совокупностью условий в тех или иных обстоятельствах.

Рассмотрим каждую «ветку» подробнее. Активное экономическое освоение регионов, с одной стороны, может положительно повлиять, т. е. предотвратить такие опасные ситуации, как подтопление грунтовыми водами, отсутствие водостоков, нарушение гидроизоляции, но, с другой стороны, приводит к загрязнению воздушного бассейна отходами производства, тем самым к формированию химически агрессивной среды, в свою очередь, приводящей к деградации объектов наследия.

Событие «неконтролируемый поток туристов» также отрицательно сказывается на безопасности объектов. Ведь он может привести к грабительским раскопкам, вандализму.

Огромную роль играют и природные чрезвычайные ситуации: оползневые процессы, эрозия, подтопление грунтовыми водами (это, к сожалению, очень сложно предупредить), а также невысокая квалификация специалистов, проводящих ремонтно-реставрационные работы.

Древовидные структуры наглядно демонстрируют все процессы разрушения памятника, способы выявления причин процессов разрушения и их приостановки. Аналогичная структура поможет рассчитать вероятности рисков возникновения экстремальных ситуаций на объектах наследия и даст возможность организации, отвечающей за сохранность того или иного здания, расставить приоритеты в проведении восстановительных, ремонтных работ и правильно организовать охранные меры.

Разработка и применение на практике инновационных научных методов мониторинга и выявления опасных факторов риска, оказывающих воздействие на устойчивость объектов культурного наследия, изучение международного опыта в сфере сохранения и использования наследия помогут проводить научно обоснованные ремонтно-реставрационные работы, от которых во многом зависит экологическая и техногенная безопасность города Казани.

## Литература

- [1] ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010—2011. *Менеджмент риска. Методы оценки риска*. Введ. 2002-01-11. Москва, Изд-во стандартов, 2011, 74 с.
- [2] Романовский В.Л. Графоаналитический метод анализа риска «Древовидные структуры». *Изв. Самарского научного центра Российской академии наук*. Сер. «Машиностроение» и «Экология», спец. вып. «ELPIT-2007», т. 2. 2007.
- [3] Федеральный закон от 21.07.97 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

УДК 628.54

## Исследование процесса очистки сточной воды в лабораторной установке с оригинальной эжекционной системой аэрации

© Антонова Екатерина Сергеевна, Ксенофонов Борис Семенович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[kotant@mail.ru](mailto:kotant@mail.ru)

*Рассмотрены основные задачи интенсификации флотационного процесса. Предложена флотационная установка с использованием оригинальной эжекционной системы аэрации, позволяющей получать требуемые характеристики рабочей жидкости при относительно невысоких энергозатратах. На лабораторной установке проведен ряд экспериментов по определению характеристик рабочей жидкости и очистке сточной воды. Составлена математическая модель, описывающая процесс очистки в лабораторной установке. Полученные экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с теоретическими, что подтверждает адекватность модели.*

**Ключевые слова:** *очистка сточных вод, флотация, эжекционная система аэрации, диспергатор, математическое моделирование.*

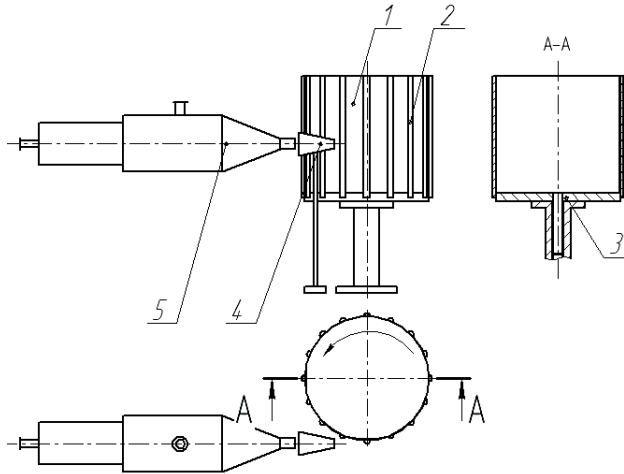
Флотационный способ широко используется для очистки сточных вод. Основной задачей интенсификации флотационного процесса является разработка системы аэрации и конструкции флотационной машины, которые обеспечат требуемые параметры рабочей жидкости (размеры пузырьков, интенсивность аэрации) и высокоэффективную реализацию процесса при невысоких эксплуатационных и капитальных затратах.

Одной из наиболее простых и наименее энергозатратных систем аэрации является эжекционная система, однако ее главный недостаток — получение достаточно крупных пузырьков диаметром более 500 мкм. Эта проблема решается как совершенствованием конструкции самого эжектора, так и внедрением специальных устройств диспергирования. Причем применение специальных диспергаторов является предпочтительным ввиду их универсальности и возможности применения в любых системах [5, 6].

При решении поставленной задачи предложена флотационная установка с эжекционной системой аэрации, описанная в [1], в которой для получения требуемых параметров водовоздушной смеси использовано оригинальное устройство диспергирования (рис. 1). Диспергирование пузырьков происходит при контакте струи водовоздушной смеси, которая выходит из эжектора и проходит через направляющий элемент с нарифлениями диспергатора.

Использование предлагаемой системы аэрации также позволяет снизить энергозатраты. В табл. 1 приведено сравнение наиболее распространенных систем аэрации, по данным [2–4], с предлагаемой. В качестве критериев взяты диаметр пузырьков и показатель затрат электроэнергии на получение 1 м<sup>3</sup> флотирующего газа.

Таким образом, предлагаемая система позволяет получить тонкодисперсную водовоздушную смесь с диаметрами пузырьков менее 200 мкм с наименьшими энергозатратами.



**Рис. 1.** Диспергатор:  
1 — полое тело; 2 — полуцилиндрические стержни; 3 — подвижная платформа; 4 — направляющий элемент; 5 — эжектор

Таблица 1

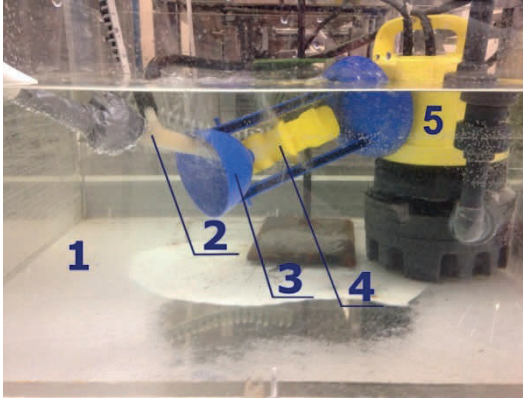
**Сравнение основных показателей систем аэрации**

Способ флотации	Средний диаметр пузырька, мкм	Удельные затраты электроэнергии, кВт · ч
Механическая	700–1 500	17,0
Пневматическая	1 000–5 000	0,2
Напорная	30–70	10,7
Электрофлотация	20–40	23,5
Эжекционная с применением оригинального диспергатора	30–200	0,5–0,7

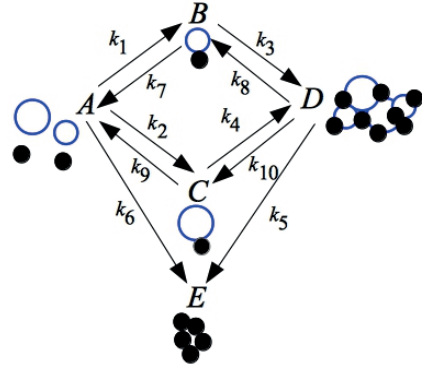
Для исследования параметров водовоздушной смеси и проведения эксперимента по очистке сточной воды собрана лабораторная установка (рис. 2).

Принцип действия заключается в следующем. Вода подается насосом 5, при ее прохождении через эжектор 2 на высокой скорости в нем создается зона пониженного давления, за счет чего происходит всасывание воздуха. Образовавшаяся водовоздушная смесь проходит через направляющий элемент 3 и диспергатор 4, где происходит дробление пузырьков. Рабочая высота жидкости 0,17 м, расход воды 360 л/ч.

Процесс, проходящий в установке, представлен на схеме рис. 3.



**Рис. 2.** Лабораторная установка: 1 — камера аэрации; 2 — эжектор; 3 — направляющий элемент; 4 — диспергатор; 5 — насос



**Рис. 3.** Схема процесса: A, B, C, D, E — исходное состояние частиц, состояние частиц во флотокомплексах с мелкодисперсными и крупно дисперсными пузырьками, состояние частиц в пенном слое, состояние частиц в осадке соответственно;  $k_i$  — константы, характеризующие переходы из одного состояния в другое

Система дифференциальных уравнений, описывающих данный процесс, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} C_A = -k_1 C_A - k_2 C_A - k_6 C_A + k_7 C_B + k_9 C_C; & C_A(0) = C_{A0}; \\ \frac{d}{dt} C_B = k_1 C_A - k_3 C_B - k_7 C_B + k_8 C_D; & C_B(0) = 0; \\ \frac{d}{dt} C_C = k_2 C_A - k_4 C_C - k_9 C_C + k_{10} C_D; & C_C(0) = 0; \\ \frac{d}{dt} C_D = k_3 C_B + k_4 C_C - k_7 C_D - k_8 C_D - k_{10} C_D; & C_D(0) = 0; \\ \frac{d}{dt} C_E = k_6 C_A + k_7 C_D; & C_E(0) = 0. \end{cases}$$

Характеристики системы аэрации для расчета констант были определены экспериментально для данной установки (табл. 2).

Таблица 2

**Характеристики системы аэрации**

Параметр	Значение
Средний диаметр мелкодисперсных пузырьков $D_1$ , мкм	55
Средний диаметр крупнодисперсных пузырьков $D_2$ , мкм	120
Интенсивность аэрации мелкодисперсных пузырьков $q_1$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$1 \cdot 10^{-5}$
Интенсивность аэрации крупнодисперсных пузырьков $q_2$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$4 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент полидисперсности $k$	1

Константы рассчитаны в соответствии с [3]:  $k_1 = 0,0038 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_2 = 0,0021 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_3 = 0,0016 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_4 = 0,0118 \text{ с}^{-1}$ . Учитывая маловероятный процесс осаждения, так как основную долю загрязнений составляли нефтепродукты, приняли  $k_5 = 0,0001 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_6 = 0,0001 \text{ с}^{-1}$ . При проведении эксперимента вода с уже образовавшимися флотокомплексами периодически проходила через эжектор, поэтому в данном случае учитывали обратимость процесса, приняв  $k_7 = 0,001 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_8 = 0,0015 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_9 = 0,0015 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_{10} = 0,0015 \text{ с}^{-1}$ .

В качестве очищаемой воды была использована поверхностная сточная вода с территории автомойки, основными загрязняющими веществами в которой являются нефтепродукты, взвешенные вещества и ПАВ. Эксперимент проводился в периодическом режиме. Сточная вода перед поступлением во флотационную установку прошла предварительную реагентную обработку. В качестве реагента использовался Аква-аурат-30. Отбор проб осуществлялся через 5, 15, 20, 30 мин после начала эксперимента. Анализ отобранных проб был выполнен на турбодиметре 2100N НАСН. Для каждой пробы было проведено по 3 измерения, при этом погрешность с вероятностью 0,9 не превышала 10 %.

По полученному решению дифференциальных уравнений с использованием рассчитанных констант получены зависимости мутности от времени процесса. Для сравнения экспериментальных данных с теоретическими была построена кривая суммы ( $C_A(t) + C_B(t) + C_C(t)$ ), так как в отбираемых пробах частицы загрязнения находились как в исходном состоянии, так и в состоянии флотокомплексов. На рис. 4 представлена теоретическая зависимость и экспериментально полученные результаты.

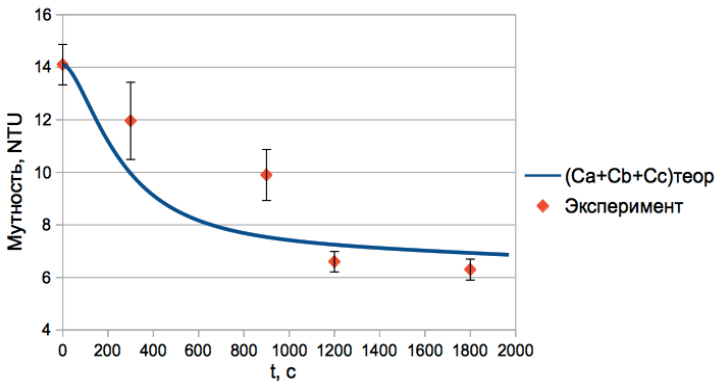


Рис. 4. Зависимость мутности от времени процесса

Полученные экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с теоретическими расчетами, что позволяет судить об адекватности модели.

### Литература

- [1] Ксенофонтов Б.С., Антонова Е.С. Флотационная машина для очистки сточных вод. Пат. № 149273, МПК C02F1/24 / заявл. 24.02.2014, опубл. 27.12.2014.
- [2] Алексеев Д.В. *Очистка стоков энергетических установок методом струйной флотации*: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2002, 166 с.
- [3] Ксенофонтов Б.С. *Очистка воды и почв флотацией*. Москва, Новые технологии, 2004, 233 с.

- [4] Rodrigues R.T., Rubio J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. *Minerals Engineering*, 2003, vol. 16, pp. 757–765.
- [5] Sadatomi Michio, Kawahara Akimaro, Matsuura Hidetoshi, Shikatani Shinji. Micro-Bubble Generation Rate and Bubble Dissolution Rate into Water by a Simple Multi-Fluid Mixer with Ori-Fice and Porous Tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Publisher: Elsevier. September, 2012, vol. 41, pp. 23–30.
- [6] Fernanda Yumi Ushikubo. Fundamental Studies on the State of Water with the Generation of Micro and Nano-bubbles. A dis. ... of Doctor of Philosophy, Tokyo, 2010, 112 p.

УДК. 628.161.2

## **Актуализация проблемы обескремнивания воды в промышленных технологиях и пути ее решения**

© **Беляев Андрей Николаевич, Лысов Дмитрий Сергеевич,  
Флегентов Игорь Владимирович**

Россия, г. Киров, Вятский государственный университет

[belyaev71@list.ru](mailto:belyaev71@list.ru), [htpe@rambler.ru](mailto:htpe@rambler.ru), [flegentov@vyatsu.ru](mailto:flegentov@vyatsu.ru)

*В статье отражены вопросы снижения содержания кремния в воде, приведены общие сведения о кремнии, входящем в состав подземных вод, представлена на карте России визуализация артезианских бассейнов с многократным превышением норматива по кремнию. Дано краткое описание основных промышленных технологий обескремнивания воды, подчеркнуты их достоинства и недостатки. Представлено направление интенсификации обработки кавитационным воздействием, позволяющее снизить общие энергозатраты традиционных технологий при сохранении эффективности водоподготовки.*

**Ключевые слова:** кремний, обескремнивание воды, предельно-допустимая концентрация, артезианский бассейн, кавитация.

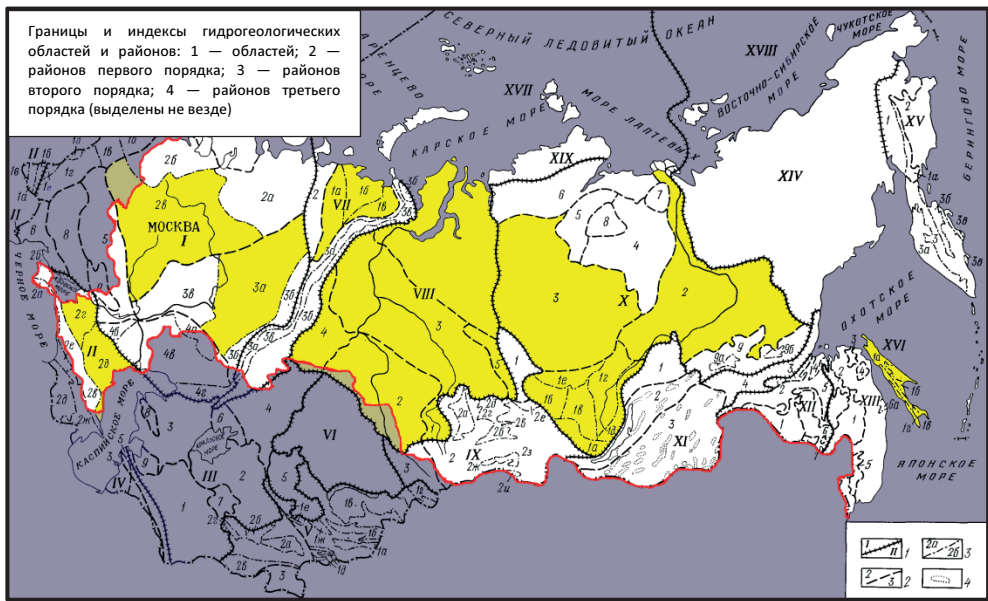
Кремний — это второй по распространенности (после кислорода) элемент земной коры [1]. В окружающей нас живой и неживой природе сложно найти объект, не содержащий его хотя бы в небольшом количестве [2]. Академик В.И. Вернадский писал: «Не подлежит сомнению, что никакой живой организм не может существовать без кремния» [3].

В последние годы все чаще обращает на себя внимание проблема обескремнивания воды. Кремний — это высокоопасное вещество, относящееся к веществам второго класса опасности и нормирующееся по санитарно-токсикологическому признаку. В соответствии с СанПиН 2.1.4.1074—01 предельное содержание в питьевой воде (ПДК) кремния устанавливается на уровне 10 мг/л. В отношении промышленных технологий существуют ограничения по использованию воды, содержащей кремниевую кислоту, в частности: для питания котлов высокого и сверхвысокого давления, в химико-фармацевтической промышленности, при производстве капрона и текстиля, при переработке цветных металлов [4].

Формы присутствия в воде кремниевой кислоты варьируются от коллоидной до ионно-дисперсной в зависимости от ее температуры, pH и соотношения различных примесей воды [4]. По данным последних лет, растворенный кремний присутствует в подземных водах в виде смеси ортокремниевой кислоты  $H_4SiO_4$ , димера  $Si_2O_4 \cdot 3H_2O$ , доля которого в природных водах в некоторых случаях может достигать 50 %, и минорных долей диссоциированных форм ( $HSiO_3^{3-}$ ,  $H_2SiO_4^{2-}$ ,  $H_5Si_2O_7^{-}$ ). Также кремний содержится в природных водах в виде коллоидов  $nSiO_2 \cdot mH_2O$ . Фактически кремнекислые соединения могут быть различны как по химическому составу, так и по степени дисперсности [5].

Превышение нормативных значений по кремнию наблюдается, прежде всего в подземных водоисточниках и зафиксировано в целом ряде регионов Российской Федерации. Проведенные научные изыскания [6–8] позволили выделить ряд артезианских бассейнов с многократным превышением норматива по кремнию, из которых максимальные значения отмечены: в Восточно-Предкавказском — до 30 ПДК; в Западно-Сибирском и Ангаро-Ленском — до 13 ПДК; в Московском и Азово-Кубанском — до 5,2 ПДК; в Сахалинском, Якутском и Тунгусском — до 3,9 ПДК; в Печорском и Волго-Камском — до 3,2 ПДК.

Схема гидрогеологических областей и районов России (на основе карты гидрогеологического районирования СССР, 1973 г., ВСЕГИНГЕО [9]) с превышением норматива по кремнию показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема гидрогеологических областей и районов России: I — Восточно-Европейская (Русская); 2в — Московский; 3а — Волго-Камский; II — Карпатско-Крымско-Кавказская; 2г — Азово-Кубанский, 2д — Восточно-Предкавказский (Терско-Кумский); VII — Тимано-Уральская; I — Печорская система, 1а — Ижеско-Печорский, 1б — Большеземельский, 1в — Предуральский (Ижма-Каратахинский); VIII — Западно-сибирская; 1 — Верхнеобский, 2 — Иртышский, 3 — Среднеобский, 4 — Тобольский, 5 — Среднеенисейский; X — Восточно-Сибирская; 1 — Ангаро-Ленский, 2 — Якутский, 3 — Тунгусский; XVI — Сахалинская; 1а — Северо-Сахалинский, 1б — Поронайский, 1в — Сусунайский, 1г — Татарский (др. обознач. см. в [9])



В технологии очистки воды от кремния выделяют прежде всего реагентные методы, в которых используют известь, гидроксиды и оксиды железа, алюминия, магния, которые вводят в очищаемую воду и поддерживают во взвешенном седиментирующем состоянии. В процессе очистки соединения кремния сорбируются данными веществами и оседают. Это самый простой и отработанный метод, однако он требует тонкой регулировки параметров технологического процесса и подогрева воды. Для эффективной обработки ее температура должна поддерживаться не менее 40 °С, что достаточно проблематично при больших расходах.

Электрохимический метод отличается образованием тех же соединений, но под действием электрического тока. Образующиеся соединения имеют более высокую сорбционную способность, однако метод рекомендуют использовать при неглубоком обескремнивании воды, а для глубокого обескремнивания — только при небольших расходах обрабатываемой воды ввиду существенного повышения расхода металла анода и электроэнергии. Также этому методу присущи малая производительность и образование большого объема вторичных отходов.

Хорошей альтернативой первым двум методам является фильтрационный. Этот метод может с успехом применяться в сочетании с ними. В нем используют вариации все тех же веществ, но в виде зернистых загрузок фильтра. Данный метод позволяет проводить непрерывную очистку воды до полного насыщения фильтрационной емкости загрузки, после чего ее необходимо заменить.

Применение ионообменных смол позволяет достичь наиболее глубокого снижения концентрации кремниевых соединений в воде, однако данный метод не применим для питьевого водоснабжения ввиду его многоступенчатости, высокой стоимости, большого количества образующихся отходов водоочистки и, наконец, из соображений санитарно-гигиенической надежности ионообменных смол и необходимости сопутствующего глубокого обессоливания питьевой воды.

В промышленности можно встретить также высокоэффективный мембранный метод очистки воды, однако при подготовке питьевой воды его не используют. Это связано с высоким ее обессоливанием. Кроме того, это дорогой метод очистки, требующий комплекса водоподготовительных операций и наладки [7].

С развитием современных технологий значимость традиционных методов снижается. Это обусловлено большим расходом реагентов, предполагающим наличие больших площадей, и высоким уровнем энергопотребления, связанным с необходимостью нагрева очищаемой воды. Таким образом, использование кавитационных процессов для очистки воды представляется весьма перспективным направлением. При этом возможно значительное снижение общих энергозатрат при неизменной эффективности водоподготовки [10]. Полученные результаты свидетельствуют об экономической целесообразности промышленной реализации данного направления в повышении эффективности водоподготовки.

### Литература

- [1] Мышляева Л.В., Краснощеков В.В. *Аналитическая химия кремния*. Москва, Наука, 1972, 212 с.
- [2] Семенова Н.А., Холопов А.П., Шашель В.А., Чаплыгина Н.А., Морозов Н.Г. *Кремний — элемент жизни. Экология и медицина*. Санкт-Петербург, ДИЛЯ, 2008, 448 с.
- [3] Вернадский В.И. *Очерки геохимии*. Москва, Ленинград, Грозный, Новосибирск, Гос. науч.-техн. горно-геолого-нефтяное изд-во, 1934, 378 с.

- [4] Фрог Б.Н., Левченко А.П. *Водоподготовка*: учеб. пособие для вузов Москва, Изд-во Моск. ун-та, 1996, 680 с.
- [5] Алексеев В.С. О необходимости пересмотра нормативного содержания кремния в питьевой воде. *Водоснабжение и санитарная техника*, 2011, № 5.
- [6] Питьева К.Е. *Гидрогеохимия (формирование химического состава подземных вод)*. Москва, Изд-во Моск. ун-та, 1978.
- [7] Федотов Р.В. Технология обескремнивания природных вод фильтрованием через модифицированную загрузку: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2013.
- [8] Мазаев В.Т., Шлепнина Т.Г. Оценка степени санитарной опасности соединений кремния в природной и питьевой воде. *Водоснабжение и санитарная техника*, 2011, № 7.
- [9] *Гидрогеология СССР. Сводный том в пяти выпусках*. Вып. 3. Ресурсы подземных вод СССР и перспективы их использования. Москва, Недра, 1977, 279 с.
- [1] Беляев А.Н., Флегентов И.В. Гидродинамическая кавитационная обработка как инструмент интенсификации реагентных процессов в промышленных технологиях. *Журнал прикладной химии*, 2014, т. 87, № 8, с. 1092–1100.

УДК 620.92:502.37

## **Альтернативная энергетика — путь к рациональному природопользованию**

**© Бикбулатов Рустем Рашитович, Нафикова Эльвира Валериковна,  
Белозерова Елена Алексеевна, Красногорская Наталия Николаевна**

Россия, г. Уфа, Уфимский государственный авиационный технический университет

[elena.belozerova.ufa@gmail.com](mailto:elena.belozerova.ufa@gmail.com)

*На примере промышленного предприятия произведена оценка потенциала замещения традиционных источников энергии альтернативными видами: гелиоэнергетика и малая гидроэнергетика. Определено количество тепловой энергии, необходимое для нагрева воды на ТЭЦ. Рассчитано количество энергии, получаемое при работе малой плотинной ГЭС. Выполнены расчеты по экономии топлива и сокращению объемов выбросов углекислого газа за счет использования возобновляемых источников.*

**Ключевые слова:** *альтернативная энергетика, гелиоэнергетика, малая гидроэнергетика, ГЭС, сокращение выбросов парниковых газов.*

Альтернативная энергетика представляет собой совокупность перспективных способов получения, передачи и использования энергии, сочетающая в себе высокую продуктивность при минимальных затратах на производство энергии и отсутствие зависимости от углеводородного топлива, что не маловажно в условиях повышения цен на энергоносители и рост тарифов на электроэнергию. Кроме того, использование возобновляемых источников позволяет значительно сократить выбросы парниковых газов, что способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду [1].

К возможным альтернативам, которые в ближайшем будущем могут дополнить или даже заменить традиционную энергетику относятся солнечное излучение и гидроэнергия малых рек [2].

**Гелиоэнергетика.** Главное препятствие на пути к широкому распространению солнечной энергетики — зависимость от суточного ритма, сезонной изменчивости и погоды. Чтобы усилить поток солнечной энергии, нужно собирать ее с больших площадей и запасать на будущее в аккумуляторах. Пока это удается реализовать в так называемой малой энергетике, которая призвана обеспечивать светом и теплом жилые дома и небольшие предприятия [2].

Наиболее оптимальная область использования солнечной энергии — это нагрев воды и воздуха, горячее водоснабжение и отопление помещений. Устройство, которое преобразует энергию солнца в тепловую энергию, называется солнечным коллектором (СК). Принцип работы СК заключается в следующем: солнечное излучение, попадая на зачерненный теплообменник СК через прозрачное покрытие, нагревает теплоноситель (вода, воздух и пр.). Температура нагрева воды зависит от времени года, географической широты местности, угла наклона коллектора к горизонту, а также от конструктивных и режимных параметров самого СК [3].

В настоящей работе рассмотрены применение альтернативной энергетики для промышленных предприятий и оценка сокращения выбросов CO<sub>2</sub> при замене углеводородного топлива на альтернативные виды. В качестве примера применения энергии солнца проведем расчет получения тепловой энергии на одной из ТЭЦ в условиях Республики Башкортостан (РБ). При расчетах и выборе СК температура окружающего воздуха для условий Республики Башкортостан (г. Уфа) для мая принимаем равной 13,2 °С (286,2 К), для июня — 18,1 °С (291,1 К), для июля — 19,7 °С (292,7 К), для августа — 17,2 °С (290,2 К), для сентября — 11,3 °С (284,3 К) [4].

Рассчитаем количество энергии, необходимое для обеспечения потребителя (Уфимская ТЭЦ) горячей водой в количестве 29000 т/сут с заданной температурой 200 °С (473 К) в период с мая по сентябрь. Расчет осуществим для каждого месяца заданного периода по методике, приведенной в работе [3]. Данные расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Количество энергии, необходимое для нагрева воды в месяц, МДж

Параметр	Месяц					Итого
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	
$Q$	22698,07	22102,67	21908,25	22212,03	22928,94	111850,00

**Малая гидроэнергетика.** Гидроэлектростанции (ГЭС) малой мощности обладают целым рядом преимуществ, которые делают это оборудование все более популярным. Прежде всего стоит отметить экологическую безопасность мини-ГЭС. Малые гидроэлектростанции не оказывают вредного влияния ни на свойства, ни на качество воды. Акватории, где устанавливается гидроэлектростанция малой мощности, можно использовать как для рыбохозяйственной деятельности, так и в качестве источника водоснабжения населенных пунктов. Кроме того, для работы малых ГЭС нет необходимости в наличии больших водоемов. Они могут функционировать, используя энергию течения небольших рек и даже ручьев [5].

Основные параметры, определяющие потенциал реки — напор  $h$  и расход  $Q$ . Напор можно увеличить путем сооружения дамб, плотин. При строительстве плотин необходимо учитывать уклон реки  $i$ , который для равнинных рек составляет  $i = 5 \dots 10$  см/км, для горных рек  $i = 5 \dots 10$  м/км [3].

Для оценки потенциала замещения традиционных источников энергии для рассматриваемой ТЭЦ (г. Уфа) произведен расчет плотины малой ГЭС и параметров гидротурбины согласно методике [3].

В качестве исходных приняты следующие данные:

- длина реки 36 км, общее падение 3 м;
- ширина реки в среднем 6...10 м;
- расход воды в летние месяцы: 0,381 м<sup>3</sup>/с;
- глубина реки 0,3...1,0 м;
- скорость водного потока: 0,6 м/с [6].

Результаты выработки электроэнергии малой ГЭС в теплый период (май — сентябрь) сведены в табл. 2.

Таблица 2

Количество энергии, выработанное на малой ГЭС в с мая по сентябрь, МВт·ч

Параметр	Месяц					Итого
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	
<i>W</i>	438	424	438	438	424	2162

Из приведенных выше таблиц видно, что применение СК для нагрева воды до заданной температуры позволяет сэкономить 111 850 МДж, а выработка малой ГЭС составляет 2 162 МВт·ч. Расчет количества топлива, необходимого для выработки данной электроэнергии, и объема выделяющегося углекислого газа при получении электрической энергии традиционными способами из сгораемых видов топлива ведется согласно методике, приведенной в учебнике «Основы промышленной экологии» [7]. Данные расчета представлены в виде графиков на рис. 1 и 2.

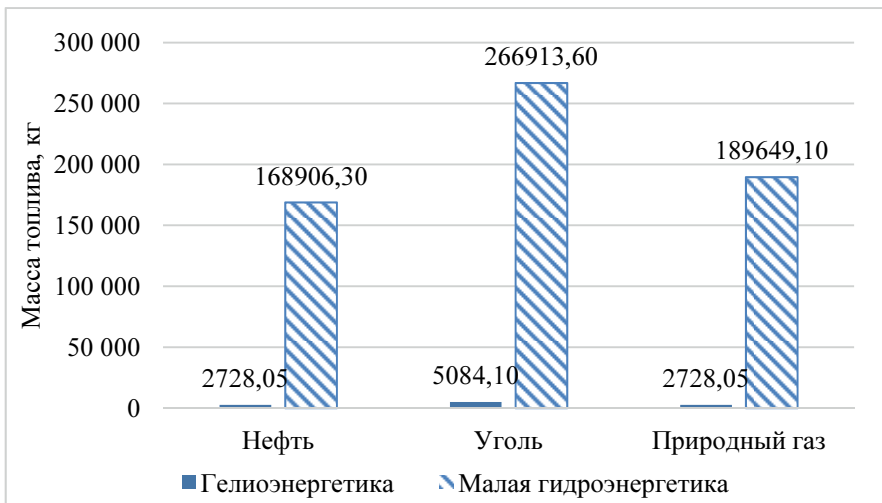
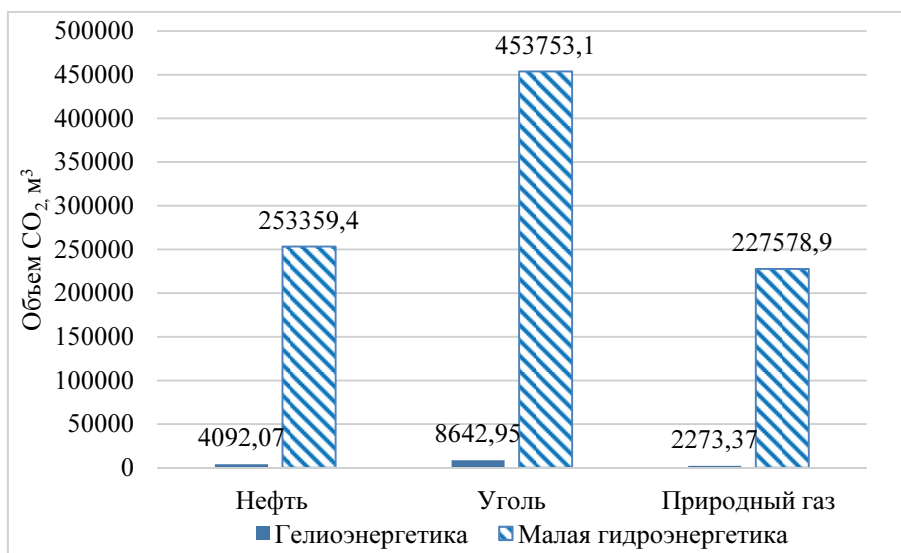


Рис. 1. Количество топлива, которое можно сэкономить при использовании альтернативных видов энергии, кг



**Рис. 2.** Объем выделяющегося CO<sub>2</sub> при сжигании традиционных энергоносителей для получения электроэнергии, м<sup>3</sup>

Таким образом, альтернативная энергетика способствует сохранению невозобновляемых сырьевых энергоресурсов и препятствует увеличению концентрации парниковых газов. На рис. 1 и 2 видно, что использование солнечных коллекторов с мая по сентябрь позволяет сэкономить 2 728,05 кг нефти, 5 084,10 кг угля, 2 728,05 природного газа и предотвратить выброс углекислого газа в объемах: 4 092,07 м<sup>3</sup>, 8 642,95 м<sup>3</sup>, 2 273,37 м<sup>3</sup> соответственно. Эксплуатация малой плотинной ГЭС в течении рассматриваемого периода позволит сберечь 168 906,30 кг нефти, 266 913,60 кг угля, 189 649,10 кг природного газа и не допустить поступление в атмосферу 25 3359,40 м<sup>3</sup>, 453 753,10 м<sup>3</sup>, 227 578,90 м<sup>3</sup> углекислого газа соответственно.

### Литература

- [1] Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. *Технология энергосбережения*. Москва, 2001, 165 с.
- [2] Струнин И.В. Способы получения электрики и тепла из солнечного излучения. *Молодой ученый*, 2014. 320 с.
- [3] Кирпичникова И.М. Соломин Е.В. *Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие к практическим занятиям*. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2009, 50 с.
- [4] *Погода и климат*: онлайн-справочник о погоде и климате. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/28722.htm> (дата обращения 12.07.2015).
- [5] Безруких П.П. *Возобновляемая энергетика: сегодня — реальность, завтра — необходимость*. Москва, Лесная страна, 2007, 120 с.
- [6] Государственный водный кадастр. Раздел 1. Поверхностные воды. Реки и озера. Серия 2. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши. Бассейны рек Камы и Урала. Бассейны рек на территории Республики Башкортостан. Уфа, БашУГМС, 1990–2007, с. 1–156.
- [7] Голицын А.Н. *Основы промышленной экологии: учебник для начального профессионального образования*. Москва, Academia, 2007, 240 с.

УДК 614.8.084

## Моделирование вероятности возникновения производственно-обусловленных заболеваний работника

© Варнавский Александр Николаевич, Мусолин Александр Константинович

Россия, г. Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет

[varnavsky\\_alex@rambler.ru](mailto:varnavsky_alex@rambler.ru)

*Рассмотрено моделирование вероятности возникновения производственно-обусловленных заболеваний работников на основе использования марковских процессов и системы уравнений Колмогорова. Использован суммарный коэффициент отличия воздействия каждого негативного фактора от его нормативного значения. Для оценки влияния негативных производственных факторов на работника и вероятности возникновения производственно-обусловленных заболеваний предложено динамически осуществлять интегральное сопоставление величины воздействия за интервал времени с динамикой балльных оценок функционального состояния регуляторных систем.*

**Ключевые слова:** негативные производственные факторы, функциональное состояние, производственно-обусловленные заболевания, марковские процессы, уравнения Колмогорова, адаптационные процессы, балльные оценки функционального состояния регуляторных систем.

Эффективность производственной деятельности работника производства зависит от его функционального состояния. Оптимальные функциональные состояния работника способствуют высокой производительности труда и качественному результату деятельности. При воздействии негативных факторов или нерациональном режиме труда происходит изменение функционального состояния и его переход в негативное, например, стресс, монотония. Появление таких состояний приводит к ухудшению здоровья, уменьшению эффективности трудовой деятельности и снижению качества результата труда.

Известно, что ухудшение состояния здоровья работников влечет за собой серьезные экономические потери: рост страховых выплат по болезни; прямые медицинские затраты; расходы на обучение работников взамен выбывших из-за несчастных случаев, травматизма, снижение производительности труда. Например, эти затраты в США превышают 150 млрд дол. в год.

В России ежегодный экономический ущерб в связи травматизмом на производстве и профессиональной заболеваемостью составляет около 407,8 млрд руб. (1,9 % ВВП). На данный момент смертность трудоспособного населения России превышает аналогичный показатель по Евросоюзу в 4,5 раз и по прогнозам может составить в ближайшее десятилетие более 10 млн чел. От 20 до 40 % трудопотерь обусловлено заболеваниями, прямо или косвенно связанными с неудовлетворительными условиями труда, более 20 % среди всех впервые признанных инвалидами составляют лица в возрасте 45–50 лет.

Для примера можно привести металлургическую отрасль, обеспечивающую 18,5 % общего объема промышленного производства в стране и, следовательно,

имеющую важнейшее социально-экономическое значение. В данной отрасли занято более миллиона трудящихся. По данным Госкомстата, 30,4 % металлургов подвергаются воздействию комплекса вредных и опасных производственных факторов. При этом, несмотря на существенную модернизацию производства и уменьшение доли ручного труда, ряд операций по-прежнему требует непосредственного контроля и участия человека. В среднем более чем у 80 % работников основных профессий металлургического производства заболеваемость с временной утратой трудоспособности связана с влиянием факторов производственной среды [1].

Главный документ по гигиене труда Руководство Р. 2.2.2006—05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда» (утв. главным государственным санитарным врачом РФ 29.07.2005) так определяет категорию «производственно-обусловленная заболеваемость»: «заболеваемость (стандартизованная по возрасту) общими заболеваниями различной этиологии (преимущественно полиэтиологичных), имеющая тенденцию к повышению числа случаев по мере увеличения стажа работы во вредных или опасных условиях труда и превышающая таковую в группах, не контактирующих с вредными факторами». «Профессиональная заболеваемость» — это «показатель числа вновь выявленных в течение года больных с профессиональными заболеваниями и отравлениями, рассчитанный на 100, 1 000, 10 000, 100 000 работников». Профессиональное заболевание — это «хроническое или острое заболевание работника, являющееся результатом воздействия на него вредного (вредных) производственного (производственных) фактора (факторов) и повлекшее временную или стойкую утрату им профессиональной трудоспособности».

Поэтому актуальной является задача контроля состояния работника, предотвращения появления негативных функциональных состояний и устранения уже возникших, борьба с возникновением производственно-обусловленной заболеваемости, профессиональных заболеваний.

Цель данной работы — моделирование вероятности возникновения производственно-обусловленных заболеваний работников.

Организм человека в течение рабочего дня подвергается действию различных вредных производственных факторов, которые повышают вероятность возникновения заболеваний. В качестве математической модели вероятности возникновения производственно-обусловленных заболеваний используем теорию марковских процессов. Под марковским процессом понимается последовательность смены состояний, в данном случае определяющих состояние организма работника. В марковском процессе фигурируют два независимых события:

организм находится в настоящий момент в конкретном состоянии;  
под воздействием негативных факторов организм перейдет (или не перейдет) в другое состояние.

Под действием вредных производственных факторов организм работника технологического производства находится в следующих состояниях:

- $S_0$  — исходное состояние организма человека, организм здоров;
- $S_1$  — изменение под действием вредных производственных факторов;
- $S_2$  — критический уровень, развитие профессионального заболевания;
- $S_3$  — обращение к специалисту, лечение;
- $S_4$  — потеря трудоспособности в связи с профессиональным заболеванием.

Время рассматриваем как непрерывную переменную. Вероятность перехода  $q_{ij}$  зависит от длительности промежутка времени между переходами. Под действием

вредных производственных факторов организм работника будет переходить из состояния  $S_0$  через промежутки времени в состояния  $S_1, S_2, S_3, S_4$ . Для вероятностного описания этих состояний необходимо найти вероятность перехода из одного состояния в другое за время  $t$ .

Если принять, что в момент времени  $t_0$  организм находился в состоянии  $S_i$ , а к моменту времени  $t$  организм находится в состоянии  $S_r$  и под действием вредных производственных факторов в момент времени  $t+\Delta t$  организм перейдет в состояние  $S_j$ , то в соответствии с формулой Маркова вероятность перехода из  $i$ -го состояния в  $j$ -е, за время от  $t_0$  до  $t + \Delta t$  рассчитывают по уравнению

$$p_{ij}(t_0, t + \Delta t) = \sum_{r=1}^k p_{ir}(t_0, t) p_{rj}(t, t + \Delta t),$$

где  $p_{ir}(t_0, t)$  определяет вероятность перехода к моменту времени  $t$  из состояния  $S_i$  в промежуточное  $S_r$ ;  $p_{rj}(t, t + \Delta t)$  — вероятность перехода к моменту времени  $t+\Delta t$  под воздействием управления из промежуточного состояния  $S_r$  в конечное искомое состояние  $S_j$ .

От уравнений Маркова, используя  $\lambda_{01}, \lambda_{10}, \lambda_{12}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{31}$  — интенсивность переходов организма работника из одного состояния в другое и граф переходов, перейдем к системе линейных дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = p_1(t)\lambda_{10} - p_0(t)\lambda_{01}; \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = p_0(t)\lambda_{01} - p_1(t)(\lambda_{10} + \lambda_{12}) + p_2(t)\lambda_{31}; \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = p_1(t)\lambda_{12} - p_2(t)(\lambda_{23} + \lambda_{24}); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = p_{21}(t)\lambda_{23} - p_3(t)\lambda_{31}; \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = p_2(t)\lambda_{24}. \end{cases}$$

В пакете Mathcad построено решение данной системы уравнений для начальных условий, соответствующих нахождению организма в полностью здоровом состоянии:  $p_0(t) = 1, p_1(t) = 0, p_2(t) = 0, p_3(t) = 0, p_4(t) = 0$ .

Для того чтобы данная модель описывала вероятность возникновения производственно-обусловленных заболеваний конкретного работника, необходимо связать его индивидуальные свойства и воздействия негативных производственных факторов с  $\lambda$ .

Один из способов оценки влияния негативных производственных факторов на состояние работника — оценка его адаптационных процессов. Существующим инструментом для оценки адаптационных процессов человека является анализ вариабельности сердечного ритма, поскольку в последовательности RR-интервалов электрокардиосигнала содержится информация о состоянии различных систем организма. Для анализа вариабельности сердечного ритма осуществляют построение интервалограммы — зависимости длительностей RR-интервалов от времени. Далее проводят обработку данной зависимости во временной или частотной областях для получения соответствующих показателей. В результате анализа вариабельности сердечного



ритма можно получить балльную оценку функционального состояния регуляторных систем и построить так называемую лестницу состояния [2].

Оценить суммарное воздействие факторов можно с помощью суммарного коэффициента отличия величины воздействия  $i$ -го негативного фактора от его нормативного значения [3]:

$$SB = \sum_{i=1}^k \frac{x_i}{\text{ПДЗ}_i},$$

где  $x_i$  — значение  $i$ -го воздействия; ПДЗ <sub>$i$</sub>  — норматив предельно допустимого значения  $i$ -го воздействия;  $k$  — количество учитываемых факторов.

Рассмотрим нахождение работника в течение рабочего дня в разных производственных точках.

Пусть за временной интервал  $T$  работник находился в  $n$  точках, в каждой из которых свое значение воздействий негативных факторов  $\{x_i^j\}$ , где  $j$  — номер производственной точки,  $j = 1, \dots, n$ . Соответственно в каждой точке будет свое значение  $SB_j$ . Будем считать, что в случае, когда работник находился в точке 1, вектор его адаптационных процессов стал  $\bar{A}_1$ . При перемещении в точку 2 изменилось состояние адаптационных процессов и их вектор установился в  $\bar{A}_2$ . В зависимости от отличия  $SB_1$  от  $SB_2$  и силы адаптационных процессов может наблюдаться изменение функционального состояния человека. Аналогичным образом происходит изменение адаптационных процессов при перемещении в другие точки, т. е. на  $\bar{A}_3 \dots \bar{A}_n$ .

Пусть длина векторов  $\bar{A}_j$  характеризует функциональное состояние. Тогда сопоставив  $|\bar{A}_j|$  с  $SB_j$ , можно сделать вывод относительно того как изменяется функциональное состояние работника при изменении негативного воздействия. При ухудшении состояния человека можно сделать вывод о том, является ли возникающее заболевание производственно-обусловленным.

Принцип интегрального сопоставления динамики балльной оценки функционального состояния регуляторных систем с воздействием факторов следующий.

1. С течением времени произошел рост балльных оценок функционального состояния регуляторных систем, т. е. наблюдалось развитие заболевания или ухудшение состояния. За этот же период времени возросла интегральная величина  $SB$ . Соответственно можно сделать вывод: высока вероятность того, что причиной ухудшения состояния работника и развития патологии стали негативные производственные факторы, а заболевание — производственно-обусловленное.

2. С течением времени произошел рост балльных оценок функционального состояния регуляторных систем, т. е. наблюдалось развитие заболевания или ухудшение состояния. Однако роста интегральной величины  $SB$  в этом случае не наблюдалось. Соответственно можно сделать вывод: вероятность того, что причиной ухудшения состояния работника и развития патологии являются производственные факторы, мала, а заболевание — не производственно-обусловленное.

Такое сопоставление можно использовать для повышения эффективности профилактики или лечения возникающего профессионально-обусловленного заболевания.

## Литература

- [1] Минько В.М. *Охрана труда в машиностроении*: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. Москва, Академия, 2013, 256 с.
- [2] Сидоренко Г.И., Комиссарова С.М. Определение адаптационного резерва организма на основе показателей variability сердечного ритма. *Международный медицинский журнал*, 2007, № 2, с. 45–49.
- [3] Родин В.Е. О путях снижения профессиональных заболеваний и производственного травматизма. *Безопасность жизнедеятельности*, 2010, № 1, с. 10–11.

УДК 629.735

## **Особенности и проблемы утилизации электротехнического мусора в гражданской авиации и влияние на окружающую среду**

**© Волков Сергей Сергеевич, Стройкина Оксана Владимировна,  
Николайкин Николай Иванович**

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
гражданской авиации

[Volkovss94@gmail.com](mailto:Volkovss94@gmail.com); [Stroikinaov@gmail.com](mailto:Stroikinaov@gmail.com)

*В статье рассмотрена проблема утилизации электротехнического мусора. По результатам социологического опроса, материалам, предоставленным компаниями о процессах утилизации и об объемах утилизируемых материалов, проанализирована актуальность данной проблемы в России и за рубежом, а также выявлены особенности их утилизации в авиации.*

**Ключевые слова:** *электротехнический мусор, утилизация, окружающая среда, авиация, экология*

Сегодня практически невозможно представить жизнедеятельность общества без техники, электроники, которая упрощает бытовые процессы во всех сферах деятельности. Так, в среднем американцы меняют мобильный телефон раз в полтора года, японцы делают это еще чаще — раз в год. То же самое происходит с другими видами техники (компьютеры, стиральные машины, холодильники и т. д.). На планете живут миллиарды людей, у них растут желания и потребности, которые может удовлетворить только современная техника. В связи с этим напрашивается вопрос, а что происходит с техникой, пришедшей в негодность?

Результаты опроса жителей ЮАО г. Москвы, проведенного авторами данной работы, показали, что из ста опрошенных 54 % ответили, что по истечении срока годности или технической неисправности техники утилизируют ее самым обыкновенным и, отметим, удобным способом, выбрасывают в мусорный бак. По данным ООН, каждый год на свалках России гибнет один миллион птиц [1, 2], тогда как с позиций законодательства электронный мусор относится к «отходам низкой опасности» и за

это предусмотрен не очень большой штраф. Таким образом, преград для нарушений практически нет.

Для общего представления, утилизирующая компания УКО в период с 2010–2013 гг. собрала 2 млн единиц бытовой техники объемом 350 000 м<sup>3</sup>. За 2014 г. в МГТУ ГА было списано 418 единиц оргтехники: ПЭВМ, МФУ, сканеров, принтеров, факсов, картриджей к ним, что составило около 500 кг, в том числе 60 % картриджей, требующих специальной утилизации.

Утилизирующие компании России, которые специализируются на работе с электротехническими отходами, имеют ряд существенных недостатков. Во-первых, большинство из них обслуживают только юридических лиц, потому что это выгоднее. Во-вторых, такие фирмы часто специализируются только на одном виде техники, например, только на холодильниках или стиральных машинах, или кухонных плитах. Но самая главная проблема — это качество утилизации. В Европе перерабатывается более 90 % от общей массы лома, а в России нередко менее половины.

Такая проблема характерна не только для России. В мире ежегодно выбрасывается более 40 млн т старой электротехники. По данным «Гринпис», в Евросоюзе утилизируется лишь 25 % такого мусора, а 65 % оказывается на свалках беднейших стран [2]. В Гану (западное побережье Африки) свозится вышедшая из употребления техника под видом оказания гуманитарной помощи или в виде товаров секонд-хенд. Сортировкой электронного мусора на свалке в местечке Агбоглоши в пригородах Аккры (Гана) занимаются не только взрослые, но и подростки, стараясь заработать за 16 ч всего несколько долларов. Для утилизации применяется самый примитивный способ: технику «выжигают» на кострах, добывая таким образом цветные металлы. При этом в атмосферу выделяется дым с концентрацией вредных веществ, превышающих нормы ПДК (включая диоксины), что приводит к накоплению свинца и меди в почвах этого района, оказывающему негативное воздействие на человека [3].

Нельзя оставить без внимания проблему утилизации в гражданской авиации, ибо регулярно появляются более современные и технологичные воздушные суда, часто и быстро модернизируется авионика, списываются устаревшие самолеты (Як-40, ТУ-154, Ил-86 и др.), редко, но происходят различные авиационные инциденты и даже катастрофы.

В сфере утилизации авиатехники работают специализированные компании как государственные, так и частные. Так, количество автотехники, подлежащей утилизации в компании «Авиавторесурс», составило: в 2013 г. — 116 самолетов; в 2014 г. — 46 самолетов и вертолетов; в 2015 г. предполагается 242 воздушных судна. Эти числа кажутся огромными, впрочем, так же, как и сами объекты утилизации, которые нужно разобрать, рассортировать и переработать. На территории утилизирующего завода все, казалось бы, соответствует экологическим нормам, но объем работ, который предстоит выполнить, пока не соответствует реальным возможностям.

Горы металла под открытым небом, вблизи леса подвергаются постоянным природным воздействиям (температура, влага, ветер). Мелкие детали, которые остаются после разборки и сортировки крупногабаритных элементов и деталей, остаются в почве, постепенно уходя все глубже. Разборка панелей управления и содержащихся в них платах осуществляется вручную. В помещении по переработке меди и алюминия очень «плотный» воздух, насыщенный выделенными при переработке газами.

Утилизация направлена не только на защиту окружающей среды, но и на извлечение прибыли. Сделано, чтобы ломалось — это фундамент развития рыночной экономики! Бизнес, кажется, скоро станет занимать основополагающее место на фоне

здоровья человека и окружающей среды. В тонне старых мобильных телефонов содержится примерно в 40 раз больше золота, чем в тонне золотоносной руды. Самолет Ту-134 (его агрегаты и блоки) содержат: серебра — 3,95 кг; платины — 0,101 кг; золота — 0,145 кг. Все чаще производитель намеренно сокращает жизненный цикл продукции или выпускает неремонтопригодную продукцию.

Проблема утилизации отходов актуальна, но разобраться, чья это проблема, государства, которое и создает для нас условия само выживания, или лично каждого из нас в силу невоспитанности или просто незнания, а главное, кому и как ее решать, стоит разобраться. Введение моды на бережливость (даже для самого себя), сортировка мусора и непрерывное экологическое воспитание и образование от младенчества до старости, это будет уже вкладом, направленным на оздоровление нашей окружающей среды, который каждый из нас может сделать [1].

### Литература

- [1] Николайкин Н.И., Николайкина Н.Е., Мелехова О.П. *Экология: учебник для вузов*. Москва, Дрофа, 2009, 624 с.
- [2] Ермолин А.В. Не быть равнодушным. *GEO*, 2013, № 12 (189), с. 116–117.
- [3] Лоббаде Й. Вторая жизнь электромусора. URL: <http://olmins.info/vtoraya-zhizn-elektromusora/>.html (дата обращения 20.03.2015).

УДК 614.8.013

## **Внедрение инновационных средств противопожарной защиты в казанский учебно-исследовательский и методический центр для людей с ограниченными возможностями здоровья (по слуху)**

© Галимова Алсу Ильнуровна, Романовский Владимир Леонидович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[alsugal92@mail.ru](mailto:alsugal92@mail.ru)

*Создание доступной среды в учебном заведении для людей с ограниченными возможностями здоровья по слуху является необходимым условием для успешного обучения студентов.*

*Для решения проблемы безопасности людей с ограниченными возможностями по слуху на примере студентов Казанского учебно-исследовательского и методического центра предложены меры по его оборудованию инновационными средствами защиты при возникновении чрезвычайных ситуаций.*

**Ключевые слова:** доступная среда, люди с ограниченными возможностями здоровья по слуху, средства защиты, противопожарная безопасность, чрезвычайные ситуации.

В РФ разработана Государственная программа «Доступная среда» на 2011–2015 годы, основными целями которой являются: формирование к 2016 году условий для беспрепятственного доступа к объектам и услугам в приоритетных сферах жизнедеятельности инвалидов и других маломобильных групп населения; совершенствование механизма предоставления услуг в сфере реабилитации и государственной системы медико-социальной экспертизы с целью интеграции инвалидов в общество.

Доступная среда в широком смысле — это среда, которая создает безопасные условия для наибольшего числа людей. С точки зрения проблемы инвалидности, доступная среда — это совокупность элементов окружающей среды, которые могут свободно использовать люди с ограниченными возможностями здоровья. Обеспечение доступности образовательных учреждений стало приоритетным направлением государственной политики. В последние годы правительством и субъектами РФ ведется системная работа по вовлечению инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья (ЛОВЗ) во все сферы социальной, экономической и политической жизни общества, их участию в создании национального валового продукта.

По данным опроса, 64,6 % глухих и слабослышащих считают, что не могут наравне со здоровыми людьми заниматься деятельностью, направленной на обеспечение противопожарной безопасности. Серьезное беспокойство вызывает состояние путей эвакуации и наличие доступных для них открытых запасных эвакуационных выходов, поскольку в отличие от здоровых людей они не в состоянии оперативно изменить маршрут эвакуации. Тем не менее значительное количество людей среди них готовы к действиям, направленным на обеспечение пожарной безопасности не только их самих, но и окружающих их людей [3, с. 19].

Проблема создания доступной среды для лиц, имеющих ограниченные возможности здоровья по слуху, очень актуальна, так как в настоящее время только в Республике Татарстан насчитывается около 350 тысяч человек с нарушением слуха, что составляет 10 % общего количества населения. Численность людей с нарушением слуха постоянно растет и к 2020 г. достигнет уже 400 тысяч.

Основной проблемой ЛОВЗ по слуху является дефицит звуковой информации, поступающий из внешнего мира. Именно поэтому оповещение слабослышащих людей о пожаре представляет сложную задачу. Существует опасность, что слабослышащие люди не будут своевременно оповещены о пожаре, особенно если они находятся одни в помещениях. Многие связывают свою безопасность с автоматическими установками пожаротушения. Лица с ограниченными возможностями здоровья по слуху предпочитают иметь компактные и мобильные устройства как для обнаружения пожара, так и для экстренного оповещения оперативных служб [4, с. 116].

При Казанском национальном исследовательском техническом университете имени А. Н. Туполева создан учебно-исследовательский и методический центр профессиональной реабилитации лиц с ограниченными возможностями здоровья по слуху, в котором на сегодняшний день обучаются 74 человек. Из-за недостаточного оснащения этого центра специальным оборудованием при эвакуации из учебного здания № 6 и студенческого общежития № 4 при пожарах, авариях, стихийных бедствиях [1, с. 10], а также при угрозе терактов для людей с нарушением слуха могут возникнуть проблемы.

Для решения проблемы безопасности глухих людей на примере студентов Казанского учебно-исследовательского и методического центра, мы предлагаем оборудовать центр следующими устройствами: системой низкочастотного оповещения и сигнализации, стандартными системами оповещения при пожаре и эвакуационными фотолюминесцентными системами.

Система низкочастотного оповещения и сигнализации включает в себя:

- датчик пожара;
- систему управления;
- световую, звуковую, а также вибрационную сигнализацию.

На данный момент наиболее простая для восприятия ЛОВЗ по слуху вибрационная сигнализация, которая в настоящее время так необходима в студенческом общезнании, отсутствует.

Одним из вариантов системы низкочастотного оповещения является специальный вибробраслет (рис. 1), который может применяться в учебных и других учреждениях. Однако не каждый человек соглашается надевать его и носить в домашних условиях [2, с. 240].



Рис. 1. Вибробраслет

Стандартные системы оповещения о пожаре включают:

- дымовые и температурные извещатели;
- звуковые оповещатели;
- аэрозольные извещатели;
- световые извещатели;
- световые табло путей эвакуации.

Кроме этих стандартных известных средств существует новая, не имеющая аналогов система, которая распыляет специальный аэрозоль с резким запахом васаби (рис. 2). Она оснащена световой пожарной сигнализацией и подсистемой звукового оповещения. Согласно результатам испытаний запах васаби способен разбудить спящего человека за пару минут. На основе этой технологии можно производить как автономные пожарные извещатели, так и целые системы.

В целях повышения качества образования и безопасности считаем необходимым включить в систему образования FM-систему Oticon (рис. 3). В нее входит радиопередатчик и радиоприемник, позволяющие глухим людям лучше слышать не только учебную информацию на занятиях, но и слышать звуковое оповещение о пожарах, авариях, стихийных бедствиях [1, с. 15], а также при угрозе терактов.

Фотолуминисцентные эвакуационные системы оснащены табло с бегущей строкой, канатно-спускными автоматическими устройствами эвакуации при пожаре САМОСПАС, лестницами аварийно-спасательными АСЛ.



Рис.2. Аэрозольный оповещатель, распыляющий резкий запах васаби



Рис. 3. FM-система Oticon

Предложенные системы предупреждения об опасности и системы спасения людей в чрезвычайных ситуациях безусловно, повысят безопасность жизни наших студентов.

### Литература

- [1] Кочергин А.В., Накоряков П.В., Жданов И.А., Кусюмова Л.С. и др. К принципиально новой системе реабилитации и обучения глухих и слабослышащих детей. *Материалы 13-й Всероссийской научно-технической конференции «Внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика, диагностика, экология»*, Казань, 2001.

- [2] Леонгард Э.И., Самсонова Е.Г., Иванова Е.А. *Я не хочу молчать: Из опыта работ по организации обучения глухих и слабослышащих детей*. Москва, Теревинф, 1990, с. 231–247.
3. Кирюханцев Е.Е., Холщевников В.В., Шурин Е.Т. *Первые экспериментальные исследования движения инвалидов общем потоке. Безопасность людей при пожарах*. Москва, ВИПТШ МВД РФ, 1999, с. 18–23.
4. Шурин Е.Т., Самошин Д.А. *Результаты экспериментов по определению некоторых параметров эвакуации маломобильных людей при пожаре*. Москва, АГПС МВД России, 2001, с. 114–117.

УДК 656.18:168.4:504

## Повышение эффективности и экологической безопасности транспортных систем крупных городов за счет развития велосипедного движения

© Галышев Алексей Борисович, Трофименко Юрий Васильевич

Россия, г. Москва, Московский автомобильно-дорожный  
государственный технический университет

[alexborr@yandex.ru](mailto:alexborr@yandex.ru), [ywtrofimenko@mail.ru](mailto:ywtrofimenko@mail.ru)

*Велосипедный транспорт имеет ряд преимуществ по сравнению с автотранспортом. Его использование практически не оказывает отрицательного воздействия на окружающую среду, способствует экономии топливно-энергетических ресурсов и укреплению здоровья населения. Однако по причине слабого развития велосипедного движения в нашей стране лишь с недавнего времени предпринимаются попытки количественно оценить экономический эффект от использования данного вида транспорта. При этом очевидно, что оценка эффективности единичных веломаршрутов и городской велотранспортной системы в целом проводится по разным критериям и, соответственно, по разным методикам. В данной статье рассматриваются различные методы оценки транспортной и экологической эффективности велосипедного движения, применимые как для отдельных веломаршрутов, так и в масштабе всей велотранспортной системы крупного города.*

**Ключевые слова:** велосипед, веломаршрут, велотранспортная сеть, велотранспортная работа, транспортная эффективность, экономический эффект.

Развитие велосипедного движения в большинстве европейских стран сегодня признано одной из важнейших задач, которые необходимо решать при планировании и создании городских транспортных систем. Прежде всего это связано с обострением проблем, связанных с непомерно быстрым развитием процесса автомобилизации. Негативные стороны данного процесса состоят в загрязнении окружающей среды (ОС) вредными веществами, ухудшении состояния здоровья населения, снижении мобильности населения из-за транспортных заторов и др. Одним из способов решения данных проблем является использование экологически чистых типов транспорт-



ных средств, в том числе велосипедов. Основные преимущества велосипеда по сравнению с автомобильным транспортом:

- в ряде случаев на велосипеде можно добраться до пункта назначения быстрее, чем на автомобиле;
- велосипед требует гораздо меньших эксплуатационных затрат, чем автомобиль и не потребляет топливо;
- велосипед экологически безопасен в эксплуатации (не производит вредных выбросов и не создает шума);
- велосипед способствует улучшению физической формы человека и укреплению его здоровья [1].

Эффективность велосипедного движения в крупном городе можно оценить двумя способами, рассматривая либо каждый веломаршрут в отдельности, либо вело-транспортную сеть в целом. При этом в первом случае определяющим критерием эффективности является фактор времени, затрачиваемого на преодоление определенного маршрута с помощью разных типов транспортных средств (ТС), а во втором — изменение негативного эффекта, который возникает в результате воздействия транспортной системы города на население и ОС (выбросы вредных веществ, потребление топлива, ухудшение здоровья людей).

Эффективность единичного веломаршрута можно оценить по методике, приведенной в [2]. В ней указано, что при движении в транспортном потоке высокой плотности, преимущество получают малогабаритные ТС (в первую очередь, велосипеды), которые способны достаточно быстро передвигаться по городской территории, не создавая транспортных заторов. Транспортная эффективность веломаршрута определяется тем, насколько он обеспечивает велосипедисту возможность достигнуть пункта назначения с наименьшими затратами времени [2]. В качестве измерителей эффективности веломаршрута могут выступать следующие показатели:

- коэффициент прямолинейности веломаршрута;
- относительное сокращение времени перемещения при пользовании веломаршрутом;
- коэффициент приспособленности веломаршрута  $k_A$ .

При определении фактического времени движения по веломаршруту ( $t_{FV}$ ) помимо теоретической скорости движения велосипедиста необходимо учесть продолжительность суммарных задержек велосипедиста, связанных с преодолением различных препятствий (бордюров, резких поворотов, пересечений дорог, лестниц и т. п.) [2]. Формула для расчета величины  $t_{FV}$  имеет вид

$$t_{FV} = t_{TV} + \Delta t_V, \quad (1)$$

где

$$\Delta t_V = \sum_{i=0}^m \tau_i c_i \quad (2)$$

— продолжительность суммарных задержек велосипедиста на веломаршруте, связанных с преодолением различных препятствий, с;  $\tau_i$  — удельная норма потери времени велосипедистом на преодоление  $i$ -го препятствия;  $c_i$  — расчетная характеристика  $i$ -го препятствия на веломаршруте;  $m$  — количество препятствий на веломаршруте.

Рассчитанную величину  $t_{FV}$  сравнивают с временем преодоления данного маршрута на других видах транспорта. Веломаршрут может быть признан эффективным,

если величина  $t_{FV}$  будет меньше затрат времени на перемещение из начальной точки маршрута в конечную с использованием других видов транспорта.

К сожалению, из-за большой протяженности и разветвленности транспортных систем крупных городов оценить транспортную эффективность велотранспортной системы по данному критерию в целом достаточно трудно. Тем не менее можно теоретически оценить процент эффективных и неэффективных маршрутов, входящих в нее, и на основании этой оценки рассчитать экономический эффект от развития велосипедного движения в крупном городе. Расчеты, проведенные для проекта велотранспортной системы г. Москвы, предложенной ЦНИИП велотранспорта им. Валфиуса [3], показали, что стоимость сэкономленного велосипедистами г. Москвы времени при использовании ими рассматриваемой сети составит от 7 до 18 млрд руб./год.

Эколого-экономическую эффективность велотранспортной сети в целом можно оценить по методике, предложенной в [4], в зависимости от велотранспортного спроса (велотранспортной работы) и замещения им выполняемой транспортной работы другими видами транспорта. Объем велотранспортной работы определяется двумя способами:

- на основании мониторинга реальной интенсивности велосипедного движения;
- с использованием материалов социологических опросов.

Для конкретных расчетов необходимо применять тот способ, который больше подходит для рассматриваемой ситуации. Иногда целесообразно провести расчет двумя способами и взять среднеарифметическую величину. Формулы для расчета велотранспортной работы ( $W(T)$ ) по первому (3) и второму (4) способам представлены ниже.

$$W(T) = k_u \sum_{i=1}^n L_i \int_{t=0}^T S_i(t) dt; \quad (3)$$

$$W(T) = P \int_{t=0}^T \varphi(t) D(t) dt, \quad (4)$$

где  $T$  — интервал времени, за который рассчитывается транспортная работа, ч;  $k_u$  — коэффициент неопределенности, учитывающий долю перемещений велосипедистов за пределами рассматриваемой велотранспортной сети (для укрупненных расчетов примем  $k_u = 1,5$ );  $n$  — количество участков велотранспортной сети;  $L_i$  — длина  $i$ -го участка велотранспортной сети, км;  $S_i(t)$  — зависимость интенсивности движения на  $i$ -м участке велотранспортной сети от времени на рассматриваемом временном интервале, вел/ч;  $P$  — количество жителей в рассматриваемом регионе, чел;  $\varphi(t)$  — зависимость доли жителей, использующих велосипед, от времени на рассматриваемом временном интервале;  $D(t)$  — зависимость среднесуточной длины поездок велосипедиста от времени на рассматриваемом временном интервале, км/сут.

Далее необходимо оценить потенциальное снижение транспортной работы, выполняемой другими видами ТС, в первую очередь личными автомобилями. Для этого используется показатель  $\Delta(NL)$ , выражающий снижение величины автотранспортной работы за счет роста велотранспортной [4]. Данный показатель является одним из входных параметров для расчета основных показателей эколого-экономической эффективности велотранспортной сети. К ним относятся снижение выбросов загрязняющих веществ автотранспортом, снижение потребления транспортного топлива и снижение уровня заболеваемости и смертности населения.

Расчет проводится по методикам, изложенным в [5–7]. Непосредственный расчет снижения вредных выбросов и расхода автотранспортного топлива рекомендуется выполнять в программе «Коперт 4». Эта программа позволяет рассчитать выбросы как регулируемых (CO, NO<sub>x</sub>, VOC, твердые частицы), так и нерегулируемых (N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, тяжелые металлы) загрязнителей. При расчете расхода топлива учитывается как масса топлива, сгораемого в ДВС, так и топливные потери в результате испарения. Расчет экономического эффекта от улучшения состояния здоровья населения осуществляется с помощью инструмента по экономической оценке «HEAT» [7], рекомендуемого Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ).

Расчеты, проведенные для велосети г. Москвы ЦНИИП велотранспорта [3], показали, что при росте доли интенсивности использования велотранспорта с 1 % до 10 % (показатели наиболее развитых стран), экономический эффект от снижения выбросов вредных веществ вырастет с 3 до 91 млн. руб./год, а экономический эффект от снижения потребления топлива вырастет от 0,5 до 11 млрд. руб./год. Экономический эффект, рассчитанный при помощи инструмента HEAT в среднем составляет 18,3 млрд. руб./год.

### Литература

- [1] Галышев А.Б. Обоснование необходимости развития велосипедного движения в крупных городах. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*, 2011, № 3, с. 102–106.
- [2] Шелмаков П.С., Шелмаков С.В. Методика оценки эффективности веломаршрута. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2013, № 9–1 (16), с. 131–134.
- [3] *Отраслевая схема развития велодорожной сети в г. Москве (часть)*. URL: <http://velotransnii.ru/proekty/newsid/1004.aspx> (дата обращения 07.12.2014).
- [4] Галышев А.Б., Шелмаков С.В. Методика оценки эколого-экономической эффективности велотранспорта в зависимости от интенсивности его использования. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*, 2014, № 4 (39), с. 107–110.
- [5] Донченко В.В., ред. *Рекомендации по применению методов и средств, обеспечивающих эффективное снижение вредных выбросов от эксплуатируемой транспортной техники*. Москва, НПСТ «Трансконсалтинг», 2001, 45 с.
- [6] Голубева Т.М., ред. *Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте: методические рекомендации*. Москва, АвтоПолис, 2008, 79 с.
- [7] Rutter H. *Health economic assessment tool for cycling (HEAT for cycling)*. URL: <http://www.thepep.org/ClearingHouse/docfiles/HEAT.pdf> (дата обращения 22.06.2013).

УДК 621.3

## Современные требования к проектированию безопасности и экологичности нового производства

© Гусева Татьяна Александровна, Шевченко Софья Михайловна

Россия, г. Нижний Новгород, Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина

[guseva-yanat1984@mail.ru](mailto:guseva-yanat1984@mail.ru)

*Проектирование промышленной (техносферной) и экологической безопасности нового производства основано на инженерных расчетах и выявлении опасных производственных объектов, их декларировании и экспертизе безопасности у сторонней организации.*

**Ключевые слова:** промышленная (производственная) безопасность; проектная документация; экспертиза; декларирование; опасные производственные объекты; экологическая безопасность.

На современном этапе развития экономики и промышленности производственное предприятие можно представить в обобщенном виде: комплекс из сырья для переработки, производственные площади, производственное оборудование, организованные рабочие места, технология производства и производственный цикл, готовая продукция.

Следовательно, еще на стадии проектирования нового производства чего-либо возникает вопрос о проектировании его производственной (промышленной) и экологической безопасности, так как проектируются опасные производственные объекты, начиная с их строительства и заканчивая реконструкцией уже имеющихся.

Процесс подготовки производства состоит из взаимосвязанных мероприятий, обеспечивающих создание новых и совершенствование выпускаемых видов продукции, внедрение передовой технологии, а также эффективных методов организации труда, производства и управления.

С технолого-экономической позиции проектирование нового производства — это проведение исследований, связанных с подготовкой нового производства, проектирование новой и совершенствование выпускаемой продукции, технологическая подготовка производства, организационно-экономическая подготовка производства. В этом случае содержание и порядок работы по подготовке производства регламентируется государственными стандартами (ЕСКД, ЕСТД, ЕСТГП), где главная задача подготовки производства определяется как создание и организация выпуска новых конкурентоспособных изделий.

С позиции промышленной безопасности проектирование нового производства — это разработка проектной документации на строительство, расширение, реконструкцию, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию опасного производственного объекта с необходимыми обоснованиями и расчетами. Кроме того, в проектной документации предусматриваются мероприятия по предупреждению аварий и локализации их последствий, как на самом проектируемом объекте, так и в результа-

те аварий на других объектах в районе размещения проектируемого объекта. При разработке данных мероприятий учитываются источники опасности, факторы риска, условия возникновения аварий и их сценарии, численность и размещение производственного персонала.

Таким образом, проектирование техносферной (промышленной) безопасности нового производства должно «ориентироваться на требования, предъявляемые при экспертизе промышленной безопасности проектной документации» [1].

Экспертиза промышленной безопасности проектной документации нового производства представляет собой анализ и оценку оптимальности принятого технологического процесса в части его безопасности и надежности, обоснованности технических решений и мероприятий по обеспечению безопасности ведения работ, предупреждению аварийных ситуаций и ликвидации их последствий, а также оптимальности применяемых в проекте решений по компоновке технологического оборудования, безопасности и рациональности проектных решений по размещению зданий и сооружений, обеспечению безопасности эксплуатационного персонала, достаточности мер по локализации и ликвидации последствий аварий и т. д.

Экспертиза промышленной безопасности проводится в порядке, «установленном федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности, на основании принципов независимости, объективности, всесторонности и полноты исследований, проводимых с использованием современных достижений науки и техники» [1].

Необходимо проводить декларирование опасных производственных объектов и составлять декларацию о промышленной безопасности, которая предполагает всестороннюю оценку риска аварии и связанных с нею угроз, а затем выполнить разработку плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) в целях определения возможных сценариев возникновения аварийных ситуаций и их развития.

Далее с позиции экологической безопасности осуществляется нормирование производственной деятельности в соответствии с природоохранной нормативной документацией.

Она заключается в «оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС)»[2], «организации санитарно-защитной зоны предприятия (СЗЗ)»[3], «проектировании нормативов образования отходов и лимитов на их размещение (ПНООЛР), нормативов предельно допустимых сбросов (ПДС)»[4] и нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ), проведении акустических расчетов и расчетов классов опасности веществ.

Итак, любой проект нового производства должен содержать раздел «Безопасность и экологичность объекта» с подразделами «Описание рабочего места, оборудования и выполняемых технологических операций»; «Идентификация опасных и вредных производственных факторов»; «Воздействие производственного фактора на организм работающих»; «Мероприятия по разработке безопасных условий труда на производственном участке»; «Обеспечение электробезопасности на производственном участке, рабочем месте»; «Обеспечение пожарной безопасности на производственном участке, рабочем месте»; «Экологическая экспертиза разрабатываемого объекта»; «Безопасность объекта при аварийных и чрезвычайных ситуациях».

Кроме того, обоснованием правильности и корректности в проектировании техносферной (промышленной) безопасности нового производства являются следующие инженерные расчеты: расчет общего искусственного освещения; расчет и проектирование системы вентиляции (общеобменной, местной); акустический расчет помеще-

ния; выбор и расчет схемы защитного заземления; разработка системы молниезащиты; определение категории помещения по пожаро- и взрывоопасности; защита от статического электричества; учет требований эргономики при выполнении работ сидя, стоя; выбор и расчет систем очистки вентиляционных выбросов в окружающую среду; выбор и расчет систем очистки стоков промышленных предприятий; выбор способов утилизации твердых, масляных и других отходов.

Результаты инженерных расчетов сводятся в паспорт опасного производственного объекта (цех, участок).

Современные требования к проектированию промышленной безопасности нового производства реализуются посредством экспертизы промышленной и экологической безопасности проектной документации, которая представляется технико-экономическим обоснованием (обоснование инвестиций), исходными данными для проектирования, рабочим проектом (генеральным планом, технологической частью, автоматизацией процесса, электротехнической частью и др.) и рабочей документацией по разделам проекта.

### Литература

- [1] Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ. О промышленной безопасности опасных производственных объектов (с изменениями и дополнениями от 31.12.2014 № 514-ФЗ);
- [2] Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ. Об охране окружающей среды (с изменениями на 29.12.2014);
- [3] Федеральный закон от 23.11.1995 № 174 –ФЗ. Об экологической экспертизе (с изменениями на 12.02.2015);
- [4] Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения (с изменениями и дополнениями от 23.06.2014).

УДК 628.9, 519.711.3

## **Математическое моделирование теплообменных и массообменных процессов при хранении нефти и нефтепродуктов**

© Денисова Анастасия Александровна, Кустикова Марина Александровна

Россия, г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

[denisova.anstasiia@gmail.com](mailto:denisova.anstasiia@gmail.com), [marinakustikova@mail.ru](mailto:marinakustikova@mail.ru)

*С учетом повышения требований к экологической и промышленной безопасности нефтегазовой отрасли возникает необходимость разработки современной методики контроля и управления потерями. В настоящее время требуются алгоритмические программные комплексы, оснащенные средствами моделирования, анализа и прогнозирования, которые позволят быстро и корректно определить по заданным*

параметрам состояние системы и ее поведение при различных условиях в будущем. Это будет являться предпосылкой к разработке новых моделей и методик, наиболее полно отражающих процессы хранения нефти. В работе рассмотрено математическое моделирование тепло- и массообменных процессов при хранении нефти и нефтепродуктов, которое необходимо для построения моделей и методик прогнозирования потерь.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, нефть, нефтепродукты, хранение нефти, потери нефти, теплообменные процессы, массообменные процессы, физико-математическое моделирование.

В современном мире ситуация складывается таким образом, что добыча нефти с каждым годом возрастает. Нефтеперерабатывающая отрасль России является одной из базовых отраслей страны. Отечественные нефтяные компании осуществляют полный комплекс нефтяных работ — от разведки, добычи и переработки нефти до ее транспортировки и сбыта нефтепродуктов.

Добытое сырье необходимо не только транспортировать, перерабатывать, но и хранить. Для этого и используется огромное количество резервуарных парков нефтепродуктов. В основном они предназначены для уже переработанного сырья — светлых и темных нефтепродуктов, масел. Резервуары и трубопроводы представляют собой сложные системы, к сожалению, подверженные всевозможным аварийным ситуациям, таким как пожары, утечка нефтепродуктов в окружающую среду, и являются объектами повышенной опасности.

Производственные объекты хранения нефти, нефтепродуктов вносят значительный вклад в загрязнение атмосферного воздуха. Основная часть загрязнителей при нормальном режиме работы поступает в атмосферу в виде пара, газа из резервуаров и технологических аппаратов и при сливно-наливных операциях. Удельный вклад в загрязнение товарно-сырьевых парков, составляет около 50 % общего объема потерь. Особенно велики потери при испарении нефти и легковоспламеняющихся нефтепродуктов при хранении их в резервуарах. В качестве загрязнителя в данном случае выступают сложные смеси большого количества индивидуальных углеводородных компонентов. При этом уменьшаются объемы сырья для нефтехимического синтеза, ухудшается качество нефтепродукта.

Безусловно, распределение потерь зависит от характеристики продукта, вида объекта (нефтебаза, магистральный трубопровод) и характера перевалки нефти и нефтепродуктов. Поэтому одной из основных является проблема разработки и внедрения средств, сокращающих потери.

С учетом повышения требований к экологической и промышленной безопасности производственных объектов и технологических процессов нефтегазовой отрасли возникает необходимость разработки современной методики контроля и управления потерями. В настоящее время требуются алгоритмические программные комплексы, оснащенные средствами моделирования, анализа и прогнозирования, которые позволят быстро и корректно определить по заданным параметрам состояние системы и ее поведение при различных условиях в будущем. Это будет являться предпосылкой к разработке новых моделей и методик, наиболее полно отражающих процессы хранения нефти. Без научно обоснованного определения и прогнозирования потерь нефти, влияющих на экологические и экономические ущербы, невозможно повышение эффективности эксплуатации объектов трубопроводного транспорта и резервуарных парков. Следовательно, необходимо разработать математические модели теплооб-

менных и массообменных процессов при хранении нефти и нефтепродуктов для дальнейшего совершенствования конструкций резервуаров и эффективности их использования.

Все потери нефти и нефтепродуктов классифицируются следующим образом:

1) количественные потери. В этом случае качественный состав нефтепродуктов остается неизменным;

2) качественно-количественные потери, при которых происходит количественная потеря с одновременными ухудшениями качества нефтепродукта. К этому виду потерь относится испарение нефтепродуктов, когда вместе со снижением объема хранимого в резервуаре нефтепродукта изменяются плотность, вязкость и другие свойства продукта;

3) качественные потери, когда ухудшается качество нефтепродукта при неизменном количестве. В основном это потери при недопустимом смешении нефтепродуктов.

Кроме того, следует выделить еще две группы потерь углеводородного сырья, характеризующие естественную убыль и безвозвратные потери при авариях.

Потери от испарения. В резервуаре, имеющем некоторое количество продукта, газовое пространство заполнено паровоздушной смесью. Количество нефтепродукта в этой паровоздушной смеси определяют по формуле

$$G = \rho V,$$

где  $G$  — объемная концентрация паров нефтепродукта в паровоздушной смеси;  $\rho$  — плотность паров продукта;  $V$  — объем газового пространства.

Всякое выталкивание паровоздушной смеси из газового пространства резервуара в атмосферу сопровождается потерями нефтепродукта, испарившегося в газовое пространство. Это и есть потери от испарения. Они происходят по следующим причинам: 1) от вентиляции газового пространства; 2) от «больших дыханий»; 3) от «обратного выдоха»; 4) от насыщения газового пространства; 5) от «малых дыханий».

*Потери от вентиляции газового пространства.* Если в крыше резервуара имеются в двух местах отверстия, расположенные на расстоянии  $H$  по вертикали, то более тяжелые бензиновые пары будут выходить через нижнее отверстие, а соответствующее количество атмосферного воздуха входить в газовое пространство резервуара через верхнее отверстие; при этом установится естественная циркуляция воздуха и бензиновых паров в резервуаре, образуется так называемый газовый сифон. Объемная потеря газа в единицу времени работы «газового сифона» определяется по уравнению

$$Q = \mu F \sqrt{2 \frac{p}{\rho_c}},$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода отверстия;  $F$  — площадь отверстия;  $p$  — давление, при котором происходит истечение, оно равно разности весов столбов высотой  $H$  паровоздушной смеси плотностью  $\rho_c$  воздуха плотностью  $\rho_v$ , т. е.

$$p = H(\rho_c - \rho_v).$$

Потери от вентиляции могут происходить через открытые люки резервуаров, цистерн вследствие простого выдувания бензиновых паров ветром, поэтому их необходимо тщательно герметизировать.



*Потери от «больших дыханий».* Огни происходят от вытеснения паров нефтепродуктов из газового пространства емкостей закачиваемым нефтепродуктом. Нефтепродукт, поступаая в герметизированный резервуар, сжимает паровоздушную смесь до давления, на которое установлена арматура. Как только давление станет равным расчетному давлению дыхательного клапана, из резервуара будут выходить пары нефтепродукта, начнется «большое дыхание» («выдох»). Чем больше давление, на которое отрегулирован дыхательный клапан, тем позднее начнется «большое дыхание». При откачке нефтепродукта из резервуара происходит обратное явление: как только вакуум в резервуаре станет равен вакууму, на который установлен дыхательный клапан, в газовое пространство начнет входить атмосферный воздух — произойдет «вдох» резервуара.

*Потери от «обратного выдоха».* Вошедший в резервуар воздух начнет насыщаться парами нефтепродукта; количество газов в резервуаре будет увеличиваться; вследствие этого по окончании «вдоха» спустя некоторое время из резервуара может произойти «обратный выдох» — выход насыщающейся газовой смеси.

*Потери от насыщения газового пространства.* Если в пустой резервуар, содержащий только воздух, залить небольшое количество нефтепродукта, последний начнет испаряться и насыщать газовое пространство. Паровоздушная смесь будет увеличиваться в объеме, и часть ее может уйти из резервуара — произойдут потери от насыщения.

*Потери от «малых дыханий».* Они происходят в результате следующих причин:

а) из-за повышения температуры газового пространства в дневное время. В дневное время газовое пространство резервуара и поверхность нефтепродукта нагреваются за счет солнечной радиации. Паровоздушная смесь стремится расширяться, с поверхности нефтепродукта испаряются наиболее легкие фракции, концентрация паров нефтепродукта в газовом пространстве повышается, давление растет. Когда избыточное давление в резервуаре станет равным давлению, на которое установлен дыхательный клапан, он открывается и из резервуара начинает выходить паровоздушная смесь — происходит «выдох». В ночное время из-за снижения температуры часть паров конденсируется, паровоздушная смесь сжимается, в газовом пространстве создается вакуум, дыхательный клапан открывается и в резервуар входит атмосферный воздух — происходит «вдох»;

б) из-за снижения атмосферного давления. При этом разность давлений в газовом пространстве резервуара и атмосферного может превысить перепад давлений, на который установлен дыхательный клапан, он откроется и произойдет «выдох» («барометрические малые дыхания»). При повышении атмосферного давления может произойти «вдох».

При хранении нефтепродуктов в резервуаре нефтебазы изменяются следующие параметры:

- уровень (вследствие испарения, изменения температуры и плотности);
- температура (вследствие суточных колебаний температуры окружающей среды либо нагрева нефти в холодный период);
- плотность (вследствие испарения легких фракций);
- давление в газовом пространстве (при повышении давления в ГП до давления, на которое настроен ДК, происходит «малое дыхание», т. е. насыщение паров нефти в газовом пространстве и последующий «выдох» их через дыхательный клапан.

При отпуске нефти изменяются следующие параметры:

- уменьшается уровень нефти (до минимально допустимого значения); температура; плотность (вследствие испарения);

• давление в газовом пространстве (необходимо отметить, что выкачивание нефти из резервуара сопровождается всасыванием воздуха; вследствие испарения продукта увеличивается давление в ГП, при достижении давления в ГП, на которое настроен ДК, происходит «обратный выдох»).

В резервуарах происходят процессы теплопереноса, среди которых испарение нефти с поверхности в газовое пространство. Интенсивность переноса массы паров, выделяющихся из нефти в резервуаре, существенно отличается от процесса испарения нефти в открытых пространствах, так как парциальное давление фракций в газовом пространстве герметичного резервуара асимптотически стремится по времени к давлениям насыщения. Разность концентраций паров вблизи поверхности и вдали от нее постепенно уменьшается, что приводит к уменьшению скорости массопереноса и установлению в ряде случаев динамического равновесия между жидкостью и парами. Это осложняется тем, что нефтепродукт является многокомпонентной средой с переменным по времени и пространству составом. В жидкой фазе имеются растворенные газовые компоненты, которые выделяются при изменении внешних условий. Многие исследователи справедливо подчеркивают приближенность известных математических моделей испарения и дегазации нефти. Однако для создания современных имитационных моделей все же приходится разрабатывать и уточнять математические модели процессов массопереноса в резервуарах. По существу происходит процесс накопления информации, а получаемые эмпирические и полумпирические (основанные на законах сохранения и законах теплопереноса) модели должны дополняться и уточняться по мере накопления новых опытных данных, полученных в модельных и натуральных условиях.

При построении математической модели оценки потерь нефти и нефтепродуктов также необходимо учитывать и параметры конструкций, используемых для хранения. На нефтебазах и перекачивающих станциях применяют стальные и железобетонные резервуары различных конструкций. Резервуары должны отвечать ряду требований. Они должны быть герметичными для хранящихся нефтепродуктов и их паров, простой формы, долговечными, дешевыми. Эти требования в зависимости от назначения нефтебазы и физико-химических свойств и условий перекачки нефтепродуктов удовлетворяются в различной степени и разными способами.

## Литература

- [1] Антипов В.Н., Земенков Ю.Д., Шабаров А.Б. и др. *Диагностика повреждений и утечек при трубопроводном транспорте многофазных углеводородов*. Тюмень, Вектор Бук, 2002, 432 с.
- [2] Нгуен Чьеу Ньен, Ч.С. Гусейнов. Роль солнечной радиации в испарении легких фракций углеводородов в наземных и подводных резервуарах. *Нефтяное хозяйство*, 2000, № 4, с. 54–56.
- [3] Штерензон В.А. *Моделирование технологических процессов: конспект лекций*. Екатеринбург, Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010, 66 с.

УДК 514

## Экология города

© Ефремочкина Мария Сергеевна, Пономарёв Валентин Михайлович

Россия, г. Москва, Московский государственный университет путей сообщения

[heycroco@gmail.com](mailto:heycroco@gmail.com)

*Работа посвящена исследованию основ экологии современного мегаполиса. Показано, что железная дорога, метрополитен, легковые и грузовые автомобили являются основным средством передвижения в городских зонах, объекты которого выделяют в окружающую среду огромное количество загрязняющих веществ и взвесей. Рассмотрены возможности улучшения экологической обстановки.*

**Ключевые слова:** *окружающая среда, экологическая обстановка, транспортные средства, загрязненность.*

«Будущее и дальнейшее развитие крупных городов находится в непосредственной зависимости от исхода соревнований между частотой использования автомобиля и лифта, и сумасшедшим можно считать того, кто считает, что в этой «гонке» лучше сделать ставку на лифт», говорил Фрэнк Ллойд Райт, выступая в программе службы общественного вещания 27 мая, 1974 г.

В очередной раз необходимо обратить внимание на исследование основ экологии современного мегаполиса, при этом безопасность и ограничение вредного воздействия (безвредность) играют главенствующую роль. Расположение дорог, проходящих автомагистралей и городских сооружений в крупных мегаполисах представляют собой вершину инженерного искусства.

Железная дорога, метрополитен, легковые и грузовые автомобили являются основным средством передвижения в городских зонах, объекты которого выделяют в окружающую среду огромное количество загрязняющих веществ и взвесей (СО, СО<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>), а также основным источником шумового и вибрационного загрязнения городской среды.

Сегодня в мире насчитывается более миллиарда автомобилей (1/4 миллиарда приходится на США). Например, в таких крупных городах, как Москва (Россия) и Нью-Йорк (США), наблюдается особо напряженная экологическая ситуация. В Москве общий процент по экологической обстановке районов города с напряженной обстановкой, где имеются какие-либо химические загрязнения в атмосфере, составляет 27 %, прежде всего из-за высокой транспортной нагрузки. Это относится, например, к району проспекта Вернадского, станции Кунцево, станции Фили. В южной части штата Нью-Йорк в радиусе восьмидесяти и более километров основной причиной загрязнения среды являются автомобили.

Городской общественный транспорт оказывает такое же неблагоприятное воздействие на экологическую обстановку города. Анализируя ситуацию сегодня, можно сделать вывод о том, что автобусы движутся медленно, имеют крупные габариты, но обладают большей пассажироместимостью; легковые автомобили движутся медленно, занимают меньшее пространство и имеют среднюю пассажироместимостью;

мотоциклы передвигаются быстро, маловместительны и при парковке практически не занимают места. Технические особенности этих видов транспорта существенно различаются по уровню шумового воздействия, габаритным характеристикам каждого и по количеству выбрасываемых в городскую среду загрязняющих веществ.

Ограничение скорости движения в городской зоне, как правило, сосредоточено на снижении скорости движения транспортных средств, а также на призыве к людям ходить пешком, ездить на велосипеде и пользоваться общественным транспортом.

Несмотря на то что строительство автодорог и железной дороги может стать главной причиной, разрушающей естественные условия окружающей среды, препятствием при сохранении единства среды обитания, исследования, проходившие в этой области, по-прежнему остаются немногочисленными [1]. Необходимо отметить, что сооружение экодуков может положительно отразиться на участках автодорог с многополосным движением. На кольцевых автотранспортных развязках, как правило, встречаются промежуточные участки с растительностью, которые являются опасной зоной для живых организмов, находящихся там. Экологические исследования кольцевых транспортных развязок определили зависимость видового разнообразия растений и насекомых (Немiртега) от расположения озелененного участка, от биологического разнообразия данного местообитания, и от режима регулирования движения автотранспорта. Мосты с разработанной системой ливневых стоков и водопропускных труб, затененные сооружением зоны, крутые берега и другие элементы этой группы объектов имеют широкое распространение в качестве выбора местообитания и играют немаловажную роль для некоторых представителей флоры и фауны. Среди видов живых существ, обитающих на мостах, ведущее место занимают летучие мыши, которые используют их в качестве мест своего гнездования и ночлежки.

Автостоянки, проезжая часть, пешеходная зона и аллеи имеют свои отличительные признаки и, следовательно, различные показатели экологического воздействия на окружающую среду. Асфальтобетонное покрытие проезжей части и относящихся к ней зон является наиболее распространенным вариантом в городе [1]. Тем не менее некоторые городские улицы вымощены брусчаткой или камнем, в то время как использование высокопористых материалов применяется для пешеходной и парковочной зон. Существует огромное разнообразие видов брусчатки, которой иногда выложены и проезды, и пешеходные дорожки. Наблюдается зависимость водных и энергетических потоков от типа поверхности. Значительную часть площади большинства городов занимают автостоянки (парковочная зона для автомобилей). В среднем, площадь, занимаемая автомобилями на автостоянках, составляет 28 % (максимум 56 %). В городской зоне автомобильные стоянки являются главными источниками теплового загрязнения, образования и накопления ливневых вод и отходов.

Автотранспорт является основным источником выброса NOx и углеводородов, в том числе и летучих органических веществ (ЛОВ), которые выделяются в окружающую среду даже тогда, когда автомобили припаркованы. Затененность, создаваемая кроной деревьев, снижает количество испаряемых ЛОВ (эмиссии). Загрязняющие вещества с автостоянки, переносятся по стокам вместе с ливневыми водами, во время «первого смыва» дождем. Загрязненная веществами с автостоянки, первая порция ливневых вод считается особо токсичной.

Наличие озелененных участков (и валоканав) на территории автостоянки полезно для организации мероприятий по ограничению спуска ливневых вод, образующихся от легких дождей, и снижению концентрации загрязняющих веществ, содержащихся в первом смыве. Светлоокрашенные или белые поверхности сооружений

вдоль проезжей части отражают больший процент поступающего излучения и выделяют в атмосферу меньше теплоты. Дороги, изготавливаемые из высокопористых материалов, гораздо тише, но при этом накапливают загрязняющие вещества, такие как частички дорожной соли и тяжелых металлов. Мощные дороги гораздо шумнее вышеупомянутых, но имеют меньший объем спускаемых ливневых вод и более высокий показатель инфильтрации.

Сети дорог с системой (многорежимного) персонального автоматического транспорта представляют будущее наземного транспорта. В основе этой системы заложена замена участка обычной дороги на узкие специальные пути, которые могут быть надземными (или подземными), вдоль которых движутся легкие, обтекаемой формы электромобили (транспортные средства).

Такая система работает благодаря использованию возобновляемых источников энергии, преобразовывая и передавая энергию в скрытые направляющие кабели, а также асинхронному двигателю для запуска небольших электродвигателей, так что транспортные средства являются полностью автоматизированными.

Пока автобусы, фургоны и транспортные средства для перевозки грузов на малой скорости едут вдоль одних улиц, по другим маршрутам движутся специализированные автомобили (электромобили). Такой вид транспорта работает без водителя, соответствует всем уровням требуемой безопасности, обеспечивает отсутствие случаев гибели животных на дороге, не работает на углеводородном (природном) топливе, работает на системе «умного» освещения с использованием современных светодиодов, не выбрасывает парниковых газов, не загрязняет воздух [2].

Например, компания «General Electric» в настоящее время разрабатывает технологии для подключенных к такой автотранспортной сети уличных фонарей, которые могут быть использованы для обнаружения, если вдруг на конкретной автобусной остановке сосредоточилось много людей, и подать соответствующий сигнал городской транспортной службе на отправку дополнительного автобуса. Современные «умные» уличные фонари смогут подключаться к навигационной системе автомобиля и в режиме реального времени на основе анализа трафика и ситуации на дорогах давать необходимые указания водителю при поиске не занятого места на парковке. Такой тип освещения сможет помочь беспилотным автомобилям безопасно двигаться по дорогам.

Установка «умных» уличных фонарей является дорогостоящим мероприятием, но многие города уже планируют модернизировать используемую осветительную систему и внедрить эти технологии для последующей экономии электроэнергии. Сейчас установленные уличные фонари старого типа используют огромное количество электроэнергии, в некоторых случаях половину от общего потребления электроэнергии города.

В итоге территории, когда-то застроенные дорогами и обочинами, освобождают; осветительная система дорог модернизируется под систему, в которой применены технологии «умного» освещения; земля вдоль дорог вновь возвращается в пользование к людям и животному миру. Пространство вблизи жилого района сможет быть выделено для садоводства. Иными словами, такая транспортная система, полностью растворяется в городской и природной среде и соответствует как требованиям безопасности для человека, так и экологическим требованиям.

## Литература

- [1] Бурак В.Е., Донцов С.А. Обобщенная экологическая оценка загрязнения окружающей среды в процессе укладки асфальтобетонных покрытий. *Наука и техника транспорта*, 2007. № 1, с. 90–92.
- [2] Пономарев В.М., Ульянов В.А. Актуальные вопросы подготовки сил обеспечения транспортной безопасности. *Проблемы безопасности российского общества*, 2014, № 3–4, с. 70–74.

УДК 542.943-92

## Перспективные окислительные процессы как эффективные методы очистки сточных вод, содержащих трудноокисляемые органические соединения

© Желовицкая Алла Всеволодовна

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный  
исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[vs.alla@ru](mailto:vs.alla@ru)

*Проведен анализ перспективных окислительных процессов (Advanced Oxidation Processes) для очистки сточных вод от трудноокисляемых органических соединений. Установлено, что эффективными способами очистки сточных вод, содержащих трудноокисляемые органические соединения, являются перспективные окислительные процессы. Эффективность таких процессов заключается в использовании нетоксичных и экологически чистых веществ (пероксида водорода), которые способны приводить к деструкции молекул органических соединений. Также установлено, что для повышения эффективности очистки может использоваться комбинация окислителя и иона металлов переменной валентности, хорошо известная как система Фентона или система Раффа.*

**Ключевые слова:** *очистка сточных вод, перспективные окислительные процессы, система Фентона, система Раффа, трудноокисляемые органические соединения, пероксид водорода.*

Как известно, вопрос водоочистки промышленных сточных вод носит актуальный характер. В этом отношении возникает необходимость в разработке и внедрении экологически и экономически эффективных технологий. В последние годы внимание исследователей привлекают перспективные окислительные процессы (Advanced Oxidation Processes — AOPs) [1]. Данные процессы основаны на двух последовательных стадиях: генерирование активных окислительных частиц и их взаимодействие с загрязняющими веществами, растворенными в воде. Перспективные окислительные процессы находят все большее применение в очистке сточных вод, содержащих трудноокисляемые органические соединения. Это объясняется тем, что такие соединения могут подвергаться полной деструкции, приводящей к конечным продуктам —

СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>О. Как правило, данные методы эффективны в отношении органических соединений, которые не способны к деструкции биологическим способом ввиду того, что данные соединения имеют сложную структуру. Поэтому внедрение перспективных окислительных процессов (AOPs) в практику водоочистки с использованием новых окислителей является актуальным.

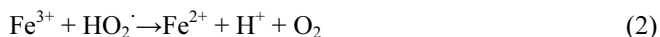
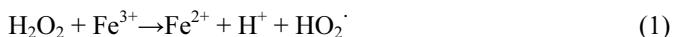
Перспективные окислительные процессы имеют ряд преимуществ по сравнению с биологическими, химическими и другими процессами очистки сточных вод, содержащих трудноокисляемые органические соединения. К таким преимуществам относятся: ресурсосбережение, минимизация экологического ущерба ввиду использования нетоксичных окислителей (пероксида водорода), а также снижение водопотребления.

Перспективные окислительные процессы могут быть реализованы как химическим, так и электрохимическим способами.

Существует ряд работ [2], в которых рассмотрено использование комбинация окислительных процессов. К ним относят, например, использование окислителя с другими процессами или веществами — катализаторами. В последнее время большое внимание уделяется Фентон-процессам для окисления разнообразных органических соединений. Например, комбинация пероксида водорода и ионов железа (II), хорошо известная как система Фентона. В частности, можно применять озон, УФ облучение или ионы металлов переменной валентности и пероксида водорода (система Фентона, система Раффа).

Так, в работе [3] описана деструкция 3-нитрофенола с помощью систем Фентона и Раффа. Система Раффа и система Фентона представляют собой смесь окислителя (Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>) и иона металла переменной валентности (Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>). Продуктами взаимодействия молекул пероксида водорода с ионами железа являются гидроксильные радикалы, позволяющие в дальнейшем приводить к деструкции молекул органических соединений.

Механизмы каталитического разложения пероксида водорода в системах Фентона (Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>) и Раффа (Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>/Fe<sup>3+</sup>) несколько схожи [4]. Различие состоит в механизме инициирования. Начальная скорость распада Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub> в присутствии Fe<sup>2+</sup> значительно выше, чем в случае Fe<sup>3+</sup>, что обычно объясняют низкой концентрацией радикалов НО<sub>2</sub><sup>·</sup>, расходующихся на восстановление Fe<sup>3+</sup>. Кроме того, требуется некоторое время, чтобы в системе возникли ионы Fe<sup>2+</sup>:



Эффективность генерации окислительных частиц (гидроксильных радикалов) и, как следствие, деструкция органических веществ в значительной степени зависит от характера среды. Установлено [3], что оптимальное значение рН, при котором можно достигнуть эффективной очистки, находится в области 2,5–3,5. Гидроксильные радикалы иницируют радикальные цепные реакции, приводящие к полному окислению молекул органических соединений.

Известно, что ионы железа (II) и железа (III), играющие роль катализатора в системе Фентона или Раффа, чаще всего представляют собой гомогенную систему, так как вводятся в обрабатываемую сточную воду в виде солей сульфата или хлорида железа. Это приводит к существенным экологическим и экономическим затратам. Имеются работы [5], в которых предлагается использование гетерогенных катализа-

торов. Это объясняется тем, что гомогенные катализаторы (ионы  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) систем Фентона и Раффа имеют недостатки: необходимость удаления осадка из обработанной сточной воды. Также в работе [6] исследуется возможность очистки сточной воды от органических соединений (красителей). Предлагается использовать для этих целей природные алумосиликатные гетерогенные катализаторы. В работе [7] рекомендуется применять гетерогенные катализаторы на основе железа.

Однако авторами работы [8] при применении системы Фентона для деструкции красителей указывается, что при концентрации ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  10 мг/л и значении водородного показателя 2,5–3,0 степень обесцвечивания составляет 99,5 %, тогда как обесцвечивание молекул красителя на гетерогенном катализаторе  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  приводит к длительности процесса и составляет порядка 5...6 ч.

На основании изложенного материала можно утверждать, что перспективные процессы окисления найдут широкое применения в системах очистки сточных вод от трудноокисляемых органических соединений.

### Литература

- [1] Oturan M.A. Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOPs) for the Environmental Applications. *Portugalica Electochimica Acta*, 2007, vol. 25, no 1, pp. 1–18.
- [2] Иванцова Н.А., Матвеева А.А., Тимашева Н.А. Каталитическое окисление красителя метиленового синего кислородом воздуха в присутствии железной стружки и пероксида водорода. *Экологическая химия*, 2012, vol. 21 (2), с. 81–85.
- [3] Ерохин К.С., Лебедева О.Е. О влиянии pH на эффективность окислительной деструкции 3-нитрофенола системами Фентона и Раффа. *Научные ведомости. Сер. Естественные науки*, 2014, № 23, с. 133–135.
- [4] Кручинина Н.Е., Аммар Ш., Иванцова Н.А., Тимашова Н.А., Габленко Н.В. Окислительная деструкция органических красителей реактивом Фентона и анализом. *Вода: химия и экология*, 2011, № 9, с. 32–38.
- [5] Конькова Т.В. Гетерогенные катализаторы Фентона для очистки сточных вод от органических красителей. *Химия и химическая технология*, 2012, т. 55, вып. 11, с. 85–89.
- [6] Владимирцева Е.Л., Шарнина Л.В., Вельбой М.А., Нуруллина Г.Н. Деструкционно-адсорбционный метод очистки растворов от активных красителей. *Вестник Казанского технологического университета*, 2014, т. 17, № 6, с. 59–61.
- [7] Иванцова Н.А., Матвеева А.А., Тимашева Н.А. Каталитическое окисление красителя метиленового синего кислородом воздуха в присутствии железной стружки и пероксида водорода. *Экологическая химия*, 2012, т. 21, № 2, с. 81–85.
- [8] Шалбак А., Иванцова Н.А. Окислительная деструкция красителей. *Успехи в химии и химической технологии*, 2010, т. XXIV, № 11, с. 53–57.



## Очистка металлосодержащих сточных вод способом электрохимического перексоокисления

© Желовицкая Алла Всеволодовна

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[e-mail:vs.alla@ru](mailto:vs.alla@ru)

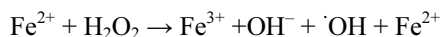
*Изучены перспективные окислительные процессы как эффективные для очистки сточных вод от ионов металлов. Установлено, что один из эффективных способов очистки сточных вод от ионов металлов — электрохимическое окисление. Альтернативным процессом электрохимической очистки от ионов металлов является электрохимическое перексоокисление, которое заключается в электрохимическом генерировании ионов железа (II), и введение в обрабатываемую воды молекул окислителя — пероксида водорода. Данная система называется системой Фентона.*

**Ключевые слова:** перспективные окислительные процессы (Advanced Oxidation Processes), очистка сточных вод от ионов металлов, электрохимическое перексоокисление, система Фентона, осаждение ионов металлов на поверхности гидроксидов железа.

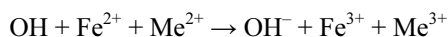
Очистка загрязненных сточных вод металлами — одна из главных задач окружающей среды. Зачастую классические методы очистки неспособны привести к эффективной очистке. В настоящее время интерес многих авторов направлен на перспективные окислительные методы — Advanced Oxidation Processes [1, 2]. Среди них выделяют химические и электрохимические процессы. Для очистки сточной воды, содержащей смесь металлов, инновационной технологией является электрохимическое перексоокисление [3]. Сущность электрохимического перексоокисления заключается в том, что на стальные электроды накладывается постоянный ток и в очищаемую сточную воду вводят пероксид водорода. При этом на электроде протекает процесс окисления железа (0) до железа (II):



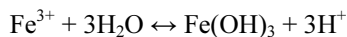
Далее протекает процесс взаимодействия ионов железа (II) с пероксидом водорода —  $\text{H}_2\text{O}_2$  в соответствии с уравнением реакции (система Фентона)



Гидроксильный радикал ( $\cdot\text{OH}$ ) может реагировать с ионами железа (II) или с ионом металла —  $\text{Me}^{2+}$ , либо может реагировать с органическим соединением.



Как только образуются ионы  $\text{Fe}^{3+}$ , мгновенно (быстро) осаждается гидроксид железа:



Данные о процессе восстановления металлов на поверхности гидроксида железа (III) в области pH = 3,5; 4,5; 6,5 представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Восстановление металлов на поверхности гидроксида железа**

Процесс	Металл						
	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Cd	V
Восстановление на Fe(OH) <sub>3</sub> (%)	<i>pH = 3,5</i>						
	95,5	1,9	0,8	75,7	2,9	0,0	71,3
Восстановление на Fe(OH) <sub>3</sub> (%)	<i>pH = 4,5</i>						
	94,9	12,0	2,0	94,6	2,6	0,4	70,0
Восстановление на Fe(OH) <sub>3</sub> (%)	<i>pH = 6,5</i>						
	93,2	80,7	7,1	99,6	13,3	4,3	60,0

Из табл. 1 следует, что степень адсорбции ионов металлов на поверхности гидроксидов железа зависит от величины pH, такие металлы, как хром и свинец, а также медь, при pH = 6,5 имеют высокое сродство к гидроксиду железа.

В табл. 2 представлены данные о процессе восстановления металлов на поверхности гидроксида железа с добавлением окислителя — пероксида водорода. Степень адсорбции таких металлов, как медь, свинец и цинк, выше по сравнению с данными табл. 1.

Таблица 2

**Процент восстановления металлов на гидроксида железа (III) с различной концентрацией пероксида водорода при pH = 6,5, t = 3 мин, J = 0,25 А**

Процесс	Металл						
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	V
Восстановление на Fe(OH) <sub>3</sub> (%)	<i>Концентрация H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> — 100 мг/л</i>						
	4,3	93,2	80,7	7,1	99,6	130,3	60,0
Восстановление на Fe(OH) <sub>3</sub> (%)	<i>Концентрация H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> — 1000 мг/л</i>						
	1,29	90,0	64,7	3,12	99,1	6,18	74,3

На основании изложенного материала можно сделать вывод о том, что электрохимическое перекисоокисление позволяет проводить очистку сточной воды, содержащей ионы металлов.

**Литература**

- [1] Oturan M.A. Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOPs) for the Environmental Applications. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 2007, vol. 25, no 1, pp. 1–18.
- [2] Guinea E. Degradation of the Fluoroquinolone Enrofloxacin by Electrochemical Advanced Oxidation Processes Based on Hydrogen Peroxide Electrogeneration. *Journal Electrochimica Acta*, 2010, vol. 55, no 6, pp. 2101–2115.
- [3] Arienzo M., Chiarenzelli J., Scurudato R. Remediation of Metal-Contaminated Aqueous Systems by Electrochemical Peroxidation: an Experimental Investigation. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, pp. 187–198.

УДК: 66.066

## Повышение безопасности эксплуатации ГеоЭС с помощью водоподготовки геотермального теплоносителя

© Кипнис Максим Алексеевич, Козляков Вячеслав Васильевич

Россия, г. Москва, Московский государственный университет дизайна и технологии

e-mail: kipnis\_m@ineum.ru

Научный руководитель д.т.н. проф. (МГУДТ)

*Безопасность работы ГеоЭС напрямую связана с предварительной водоподготовкой геотермального теплоносителя. Находящийся в нем кремнезем вызывает отложения в теплообменном оборудовании ГеоЭС. Предложено использование электролиза и применение разделительной мембраны для извлечения кремнезема. В качестве материала мембраны выбран текстиль. Он отличается равномерностью распределения пор, одинаковостью размеров и низкой стоимостью. Для реализации метода разработано устройство, в котором создаются две зоны с ярко выраженными кислотными и щелочными свойствами. В кислой среде растворимость кремнезема снижается и происходит его осаждение.*

**Ключевые слова:** геотермальная энергетика, кремнезем, мембрана, электролиз, рН, брезент.

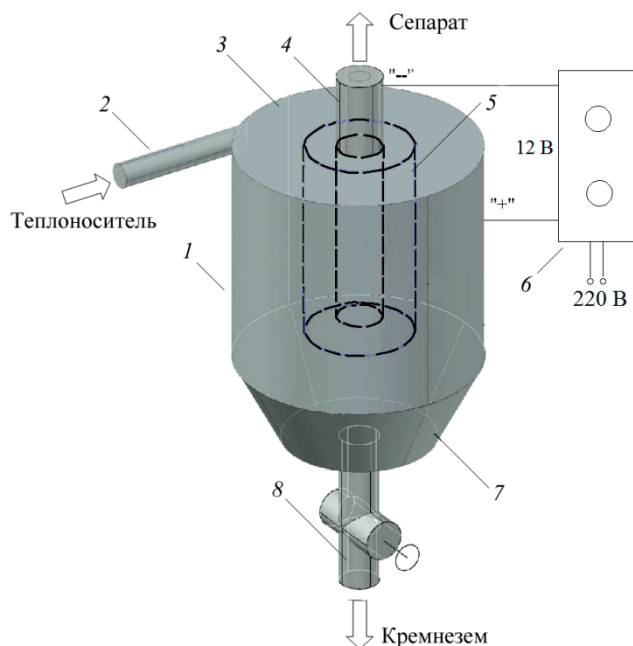
Надежная, долговечная и эффективная работа геотермальных электростанций (ГеоЭС) зависит от ряда факторов. К ним можно отнести качество оборудования, соблюдение технологии генерации энергии, квалификацию персонала и т. д. Но ни одна ГеоЭС не может обойтись без предварительной водоподготовки геотермального теплоносителя. Это обусловлено тем, что теплоноситель имеет большую минерализацию 1,5...2,0 г/кг. В частности концентрация кремнезема в жидкой фазе в зависимости от месторождения может варьироваться от 500 до 1 200 мг/кг.

Наличие кремнезема способствует образованию отложений в оборудовании ГеоЭС. Так, образовавшиеся отложения в трубах уменьшают их внутренний диаметр, тем самым снижая расход и увеличивая гидравлическое сопротивление. Из-за образовавшегося слоя кремнезема на рабочих поверхностях теплообменного оборудования ухудшается теплопередача и соответственно снижается КПД [1].

На ГеоЭС используется большой арсенал устройств и методов очистки геотермального теплоносителя от кремнезема. Так, к отдельному виду можно отнести электрохимические методы. Методы основаны на ухудшении растворимости кремнезема и его коагуляции при пропускании через геотермальный теплоноситель электрического тока. Растворимость кремнезема зависит от рН среды и температуры.

В кислой среде кремнезем плохо растворяется и выпадает в осадок. В щелочной среде, напротив, кремнезем хорошо растворим и существует в ионной форме [2]. Поэтому для осаждения кремнезема используется электролиз для генерации ионов  $H^+$  и  $OH^-$  и разделительная мембрана, препятствующая транспорту этих ионов.

Для реализации этого процесса предложено устройство для осаждения кремнезема с текстильной мембраной (рис. 1) [3].



**Рис. 1.** Устройство для осаждения кремнезема с текстильной мембраной

Устройство состоит из алюминиевого корпуса 1, играющего роль анода, вводного патрубка 2, диэлектрической крышки 3, выводного патрубка 4, играющего роль катода, текстильной мембраны 5, источника питания 6, бункера 7 и сливного патрубка 8. Принцип работы устройства заключается в следующем. Геотермальный теплоноситель подается через вводный патрубок 2 тангенциально, благодаря чему внутри корпуса приобретает закручиваемую траекторию движения. На электроды подается напряжение 12...24 В. В анодной зоне значение pH понижается до 1–2, а в катодной повышается до 11–12. В кислой среде растворимость кремнезема падает и он оседает в бункер. Создание закручиваемых потоков способствует интенсификации этого процесса. Очищенный теплоноситель проходит через мембрану 5 и из катодной зоны извлекается через выводной патрубок 4.

В устройстве в качестве разделительной мембраны применен текстиль. Выбор материала обусловлен тем, что в текстиле благодаря повторяющемуся рапорту поры равномерно распределены по площади, а их размеры получаются примерно одинаковыми. Это дает возможность задействовать для фильтрации практически всю площадь мембраны, а минимальный разброс размеров пор позволяет минимизировать проскок частиц кремнезема. В качестве текстиля выбран брезент. Материал вырабатывается плотняным, наиболее прочным переплетением хлопчатобумажных и льняных нитей. Выбор материала связан с тем, что мембрана работает под большим перепадом давлений и к ней предъявляются строгие требования по надежности. Помимо этого стои-

мость такой мембраны ниже по сравнению с другими материалами (керамика, полимеры), что уменьшает стоимость устройства и его эксплуатационные расходы.

Использование текстильной мембраны позволяет создавать кислую среду в анодной зоне устройства и щелочную в катодной зоне. На границе мембраны создается перепад pH до 3 единиц. Благодаря наличию мембраны, препятствующей транспорту ионов  $H^+$  и  $OH^-$  толщины приэлектродных зон составляют до 100 мкм, что повышает эффективность осаждения кремнезема.

Эксперименты по очистке геотермального теплоносителя на разработанном устройстве показывают, что в статическом режиме работы удается осадить до 98 % кремнезема при удельном расходе  $6,9 \cdot 10^{-4}$  кВт · ч/кг. В динамическом режиме работы геотермальный теплоноситель циркулирует через устройство. Здесь удается извлечь до 90 % кремнезема при затрате электроэнергии  $5,4 \cdot 10^{-4}$  кВт · ч/кг. Меньшая степень извлечения при динамическом режиме работы по сравнению со статикой связана с меньшим временем пребывания теплоносителя в устройстве. Однако оставшаяся часть кремнезема настолько мала, что не приводит к образованию отложений в оборудовании ГеоЭС. При норме содержания кремнезема в 100 мг/кг отфильтрованный геотермальный теплоноситель имеет концентрацию кремнезема 76,5 мг/кг.

#### Литература

- [1] Козляков В.В., Кипнис М.А. Повышение технологической безопасности теплоэнергетического оборудования при электрохимической очистки теплоносителя от кремнезема. *Охрана и экономика труда*, 2014, № 1, с. 64–69.
- [2] Козляков В.В., Кипнис М.А. Осаждение кремния из водного раствора геотермального теплоносителя электрохимическим способом с помощью изменения кислотности среды с последующим фильтрованием. *Дизайн и технологии*, 2014, № 41, с. 60–69.
- [3] Козляков В.В., Кипнис М.А. *Устройство для извлечения кремнезема из геотермального теплоносителя*. Пат. № 152488 Российская Федерация, МПК C02A 1/46; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «МГУДТ». — № 2014131306/05; заявл. 29.07.2014; опубл. 10.06.2015, бюл. № 16.

УДК 66.011

## Устройство экспресс-обнаружения загрязненности воды нефтепродуктами

© Кириенко Павел Андреевич, Пашинин Валерий Андреевич,  
Коваленко Мария Александровна, Павлов Александр Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный университет путей сообщения

[pashininmiit@yandex.ru](mailto:pashininmiit@yandex.ru)

*В статье рассмотрен метод контроля качества сточных вод по измерению поглощения проточной воды в диапазоне длин волн 205...305 нм. В качестве приемника излучения использован солнечно-слепой алмазный УФ-фотоприемник ФА-3. Приме-*

нение данного метода обеспечило контроль степени очистки воды от нефтепродуктов в макетном образце блочно-модульной установки (БМУ) в реальном масштабе времени, что позволило автоматизировать процесс очистки воды.

**Ключевые слова:** алмазный УФ-фотоприемник, непрерывный контроль качества, очистка сточных вод (БМУ).

В процессе эксплуатации производственный (хозяйственный) объект потребляет определенное количество чистой воды, образуя сточные воды, которые сбрасываются в поверхностные водные объекты: реки, моря, озера и др., что приводит к загрязнению окружающей среды. В общем случае источниками загрязнения поверхностных и подземных вод являются неочищенные или недостаточно очищенные производственные и бытовые сточные воды. К указанным источникам загрязнения также относятся поверхностный сток промышленных площадок, фильтрационные утечки вредных веществ из емкостей, трубопроводов и других сооружений, аварийные сбросы и проливы сточных вод на промышленных объектах, осадки, содержащие пыль и загрязняющие вещества от промышленных выбросов, выпадающие на поверхность водных объектов. В связи с этим остро стоит вопрос об обеспечении экологической безопасности на объектах, использующих водные ресурсы в промышленных целях. Для решения этих задач необходима разработка автоматизированного устройства, обеспечивающего вторичное использование воды, путем ее очистки и контроля качества.

Среди методов контроля качества воды, пригодных для применения в автоматизированных установках очистки сточных вод, можно выделить следующие: методы определения биохимического потребления кислорода (БПК), методы определения химического потребления кислорода (ХПК), методы, основанные на поглощении в инфракрасной (ИК) и ультрафиолетовой (УФ) области спектра (далее УФ-метод). В данной статье описывается устройство, позволяющее контролировать качество воды по УФ-методу. Общий вид предлагаемого устройства экспресс-обнаружения загрязненности воды нефтепродуктами приведен на рис. 1.



Рис. 1. Устройство экспресс-анализа качества очищаемой воды

Ультрафиолетовое излучение кроме использования для обеззараживания воды может найти применение и для оценки качества ее очистки.

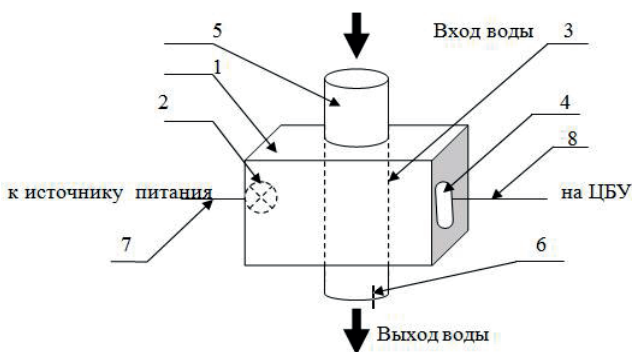
Работа устройства экспресс-анализа качества очищаемой воды основана на непрерывном измерении поглощения потока очищаемой воды в УФ-области спектра в реальном масштабе времени.

В качестве источника УФ-излучения использована лампа бактерицидная ДКБ-9.

Отличительной особенностью предлагаемого устройства экспресс-анализа качества очищаемой воды является конструктивное обеспечение работы источника УФ-излучения не на одной длине волны (254 нм), а в диапазоне длин волн 205...305 нм и проведение непрерывного контроля качества воды в режиме реального времени. Данная особенность позволяет проводить контроль качества воды по гораздо более широкому диапазону загрязняющих веществ.

В качестве приемника УФ-облучения, создаваемого лампой ДКБ-9, использовано УФ-фотоприемное устройство на основе алмазных материалов, которое является основой создания электронных солнечно-слепых оптических сенсоров УФ-диапазона.

Принципиальная схема устройства экспресс-анализа качества воды приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Принципиальная схема датчика контроля качества воды:

1 — корпус; 2 — источник УФ-излучения; 3 — кварцевая трубка; 4 — приемник УФ-излучения; 5 — входной патрубок; 6 — выходной патрубок; 7 — провод к источнику питания; 8 — провод на ЦБУ (центральный блок управления)

Устройство экспресс-анализа качества очищаемой воды, включает в себя: корпус; источник УФ-излучения, соединенный группой проводов с источником питания через дроссель; приемник УФ-излучения, соединенный с источником питания и центральным блоком управления; кварцевую трубку; входной и выходной патрубки для обследуемой воды. В устройстве источник УФ-излучения и УФ-фотоприемник установлены друг напротив друга с внешней стороны кварцевой трубки и не контактируют с потоком воды, который направляется по кварцевой трубке, при этом контроль проводится в динамическом режиме, а анализ качества очищаемой воды осуществляется в реальном масштабе времени.

Устройство внедряется в блочно-модульную установку очистки сточных вод, что позволяет производить очистку в режиме реального времени.

Анализируемая вода проходит через кварцевую трубку, которая пропускает УФ-облучение; УФ-излучение, создаваемое источником (лампой), проходит через слой протекающей воды и фиксируется приемником (фоторезистором или другим анализатором). Сигнал с приемника подается на ЦБУ. Величина сигнала обратно пропорциональна концентрации загрязнений в воде.

В случае превышения порога срабатывания ЦБУ подает сигнал на запорную аппаратуру, которая направляет поток воды в зависимости от ее качества на последующую стадию очистки или на предыдущую. В качестве исполнительных органов запорной аппаратуры использованы электромагнитные клапаны двух типов: нормально открытого и нормально закрытого. Принципиальная схема работы БМУ приведена на рис. 3.

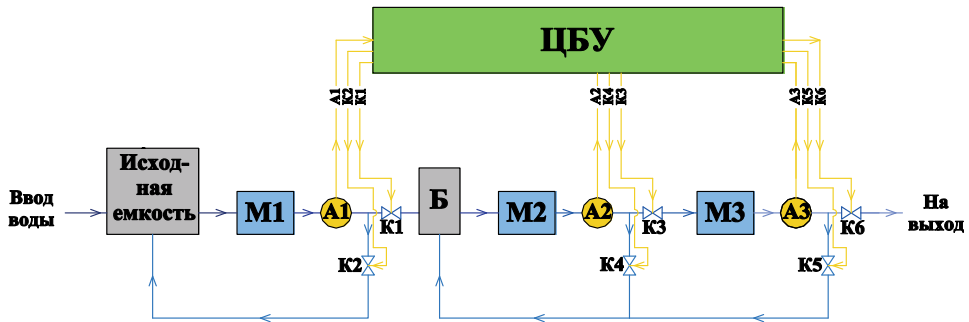


Рис. 3. Принципиальная общая схема работы БМУ очистки сточных вод:

ЦБУ — центральный блок управления; M1 — первый модуль очистки сточных вод, включающий в себя блок коагуляции и блок флотации; M2 — второй модуль очистки сточных вод, включающий в себя блок сорбции; M3 — третий модуль очистки сточных вод, включающий в себя блок УФ-облучения; A1–A3 — анализаторы качества воды — устройства экспресс-анализа качества воды в режиме реального времени, передающий информацию о качестве воды на ЦБУ; K1–K6 — электромагнитные клапаны (нормально открытые и нормально закрытые) — устройства, которые получают сигнал с ЦБУ и в соответствии с качеством сточных вод направляют воду на дальнейшую очистку или на повторную обработку; Б — буферная емкость

Принцип работы устройства экспресс-анализа качества очищаемой воды заключается в следующем: анализируемая вода проходит внутри кварцевой трубки, которая обладает способностью пропускать УФ-излучение. В нижней части корпуса блока контроля установлена лампа ДКБ-9, которая создает УФ-излучение; УФ-излучение проходит через слой воды и попадает на фотоприемник, расположенный в верхней части корпуса. Если вода «чистая», то на корпусе приемника горит зеленый индикатор, а установка работает в нормальном режиме, т. е. вода направляется на очистку в следующий блок. При появлении в воде загрязнений поглощение УФ-излучения увеличивается, а при достижении предела, устанавливаемого при наладке оборудования, на приемнике загорается красный индикатор, свидетельствующий об аварийном режиме работы установки. Электрический сигнал, выдаваемый в этот момент приемником, поступает на блок управления. Вода после сработавшего блока контроля электромагнитными клапанами направляется на повторную обработку.

Возврат работы установки в нормальный режим происходит после улучшения качества анализируемой воды автоматически.



Для контроля качества воды на стадиях технологического процесса в макетном образце установки предусматривается три устройства экспресс-анализа и контроля: устройство № 1 — после первого модуля очистки (блоков коагуляции и флотации) на выходе воды из буферного бака; № 2 — после модуля сорбционной очистки; № 3 — после модуля УФ-облучения. Конструктивно все устройства экспресс-анализа и контроля качества очищаемой воды одинаковы и взаимозаменяемы.

Чувствительность устройств экспресс-анализа качества воды настраивается в ходе пусконаладочных работ в зависимости от качества исходной воды и заложенной в характеристики установки степени очистки. Предельная чувствительность устройства экспресс-анализа качества воды достаточна для регистрации загрязнений до уровня 0,5 ПДК.

В момент движения воды в третьем модуле очистки при воздействии УФ-лучей происходит обеззараживание микроорганизмов. Эффективность обеззараживания может снижаться из-за наличия в воде взвешенных веществ, которые поглощают световое излучение. Бактерицидной установке не нужны реагенты, управление ее работой автоматизировано, она компактна, излучение УФ-ламп не придает воде ни привкуса, ни запаха.

Были проведены испытания с положительными результатами работоспособности устройства по анализу реальных сточных вод, в которых содержались бензин, дизельное топливо, машинное масло.

Устройство экспресс-анализа качества воды показало достаточно высокую эффективность по контролю качества очищаемой воды в динамическом режиме по интегральной функциональной характеристике поглощения в УФ-области спектра в диапазоне длин волн 205...305 нм при линейной скорости потока воды 1...2 м/с.

Предлагаемая БМУ очистки сточных вод с автоматизированной системой оперативного контроля качества воды в режиме реального времени позволит снизить экологическую нагрузку на поверхностные и подземные источники водоснабжения, а также исключить или значительно уменьшить затраты на выплаты штрафов за негативное воздействие на окружающую среду.

## Литература

- [1] Коваленко М.А. *Обеспечение экологической безопасности использования воды на объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта*. Автореф. ... дис. Москва, ФГБУ ВПО МГУПС (МИИТ), 2015.
- [2] Пашинин В.А., Павлов А.В., Коваленко М.А. Ультрафиолетовое излучение для обработки сточных вод. *Мир транспорта*, 2013, № 1 (45), с. 136–143.
- [3] Рощин А.В., Кумпаненко И.В., Усин В.В., Пашинин В.А., Павлов А.В. *Система автоматического управления технологическим процессом очистки воды с непрерывным контролем ее качества в различных точках технологической схемы*. Пат. на изобретение 19(RU) 2472717, C02F9/00, G05B15/00, G05D11/08, заявл. 12.07.2011, опубл. 20.01.2013.

## **Повышение оперативности принятия управленческих решений на ликвидацию последствий аварии с опасным грузом на основе спутниковых и информационных технологий**

© Кирсанов Александр Анатольевич, Сеницын Виталий Васильевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[kirsan@live.ru](mailto:kirsan@live.ru)

*Рост объема перевозимых автотранспортом опасных грузов определил опасную тенденцию повышения риска возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС). Время, прошедшее от момента дорожно-транспортного происшествия до прибытия сил и средств МЧС для ликвидации последствий аварии, в первую очередь определяется временем оповещения о ЧС и временем для принятия решения на ликвидацию последствий. Существующие в России и за рубежом технические решения в области контроля перемещения транспортных средств обеспечивают только контроль передвижения опасного объекта и не решают вопросы оперативного оповещения дежурных сил МЧС о возникшей чрезвычайной ситуации. В статье рассмотрен разработанный автором программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий передачу сообщения о происшествии и повышение оперативности реагирования. Для разработки такого комплекса используются спутниковые, информационные технологии, а также специальные аппаратные средства.*

**Ключевые слова:** опасный груз, транспорт, АХОВ, ДТП, ГИС.

**Введение.** С развитием промышленности в мире растет доля потребления веществ, часть из которых в случае выхода (вылива) в окружающее пространство может представлять опасность для человека и окружающего пространства. Наибольший риск неблагоприятных последствий возникает при транспортировке опасных грузов.

Согласно данным ООН, количество используемых опасных грузов в мировом грузообороте постоянно растет и в настоящее время достигает почти 50 %. С перевозками опасных грузов связан существенный потенциал рисков возникновения чрезвычайных происшествий. В объеме грузов, перевозимых в России всеми видами транспорта, доля опасных грузов составляет порядка 20 %, или примерно 800 млн т. Из них 65 % приходится на долю автомобильного транспорта, около 30 % — на долю железнодорожного транспорта, примерно 5 % — на долю речного и морского транспорта и около 0,1 % — на долю авиации [1].

К опасным грузам на транспорте отнесены вещества, изделия и материалы, свойства которых подпадают под критерии ГОСТ 19433—88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка». Термин «опасные грузы» определяется как «вещества, материалы и изделия, обладающие свойствами, проявление которых в транспортном процессе может привести к гибели, травмированию, отравлению, облучению, заболеванию людей и животных, а также к взрыву, пожару, повреждению сооружений,

транспортных средств, судов, характеризующиеся показателями и критериями, приведенными в настоящем стандарте, транспортируемые в упаковке, а также наливом или насыпью в контейнерах, ТС и навалом водным транспортом» [2].

С перевозками опасных грузов связан существенный потенциал рисков возникновения чрезвычайных происшествий. Последствия таких аварий при наихудших условиях влекут за собой гибель людей, тяжкие телесные повреждения и тяжелые формы заболевания, приводящие к инвалидности людей, а также разрушение технических средств, сооружений и дорог, загрязнение окружающей среды стойкими (плохо разлагающимися при обычных условиях) вредными веществами.

По причине технических неисправностей и неполадок происходят различные транспортные происшествия и аварии. По данным Ространснадзора, на фоне уменьшения аварийных происшествий при перевозке грузов относительная доля крушений с опасными грузами остается практически постоянной и колеблется в пределах от 31,6 до 54,5 % [3].

Особенность таких чрезвычайных ситуаций (ЧС) заключается в физико-химических свойствах опасных грузов. При авариях в зависимости от того или иного вида груза возникают такие основные виды опасности, как взрывоопасность, огнеопасность (пожароопасность), коррозионность и окислительное действие, радиационная опасность, токсичность, инфекционная опасность. Такие аварии имеют более масштабные последствия по сравнению с обычными ДТП и, как правило, не могут быть полноценно ликвидированы силами только одного спасательного подразделения. Другой особенностью является очень высокая динамика развития ситуации и возникновение вторичных поражающих факторов: возникновение вторичного токсичного облака, увеличение площади пожара и др.

Таким образом, для эффективного устранения последствий аварий необходимы оперативная реакция спасательных служб, быстрота принятия управленческих решений оперативными дежурными РСЧС по ликвидации последствий.

Обзор существующих решений в данной области проблематики показывает, что в настоящее время ведется разработка ряда автоматизированных систем экстренного реагирования на аварии автотранспортных средств. В США такая система входит в состав системы Next Generation 9-1-1 (NG 9-1-1), предназначенной для вызова аварийных служб с использованием любых проводных и беспроводных коммуникационных устройств, в том числе через Интернет. Разработка системы финансируется Министерством транспорта США. В рамках Европейского союза создается система eCall, ориентированная на автотранспортные средства и предполагающая использование европейской спутниковой навигационной системы Galileo.

В России разработкой системой аналогичного назначения под названием ЭРА-ГЛОНАСС занимается федеральный оператор «Навигационно-информационные системы» (НИС ГЛОНАСС). Кроме того, НИС ГЛОНАСС разработала систему дистанционного контроля и надзора в области обеспечения транспортной безопасности при осуществлении перевозок опасных грузов с использованием спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS (СДКН-ОГ).

Система СДКН-ОГ обеспечивает автоматизацию большинства процессов, связанных с контролем перевозок опасных грузов автомобильным транспортом, а также позволяет отображать на электронной карте в режиме реального времени данные о местоположении транспортного средства, о выданном специальном разрешении на перевозку опасных грузов, о расположении передвижных и стационарных контрольных пунктов, разрешенных местах стоянок и других параметрах. На основании этих

параметров система в автоматическом режиме фиксирует факты нарушений, проводит их анализ и осуществляет контроль за соблюдением установленных правил перевозок.

Анализ указанной системы показал, что система *обеспечивает только контроль передвижения опасного объекта*. Однако в случае аварии ТС, перевозящих опасные грузы, не менее важным является оперативное оповещение о происшествии (аварии) и прогнозирование масштабов последствия аварий для принятия решений по ликвидации последствий чрезвычайной ситуации [4].

В рамках научной работы разрабатывается программно-аппаратный комплекс [5], обеспечивающий значительное повышение оперативности реагирования. Для разработки такого комплекса используются спутниковые, информационные технологии, а также специальные аппаратные средства.

**Общая схема программно-аппаратного комплекса.** Разрабатываемый программно-аппаратный комплекс (рис. 1) состоит из нескольких модулей. К ним относятся: модуль спутникового мониторинга подвижного объекта повышенной опасности; информационный модуль о ДТП ТС; центральный программный модуль (базы данных, модуль прогнозирования аварийной обстановки); модуль получения метеоданных; модуль геоинформационной системы (ГИС).

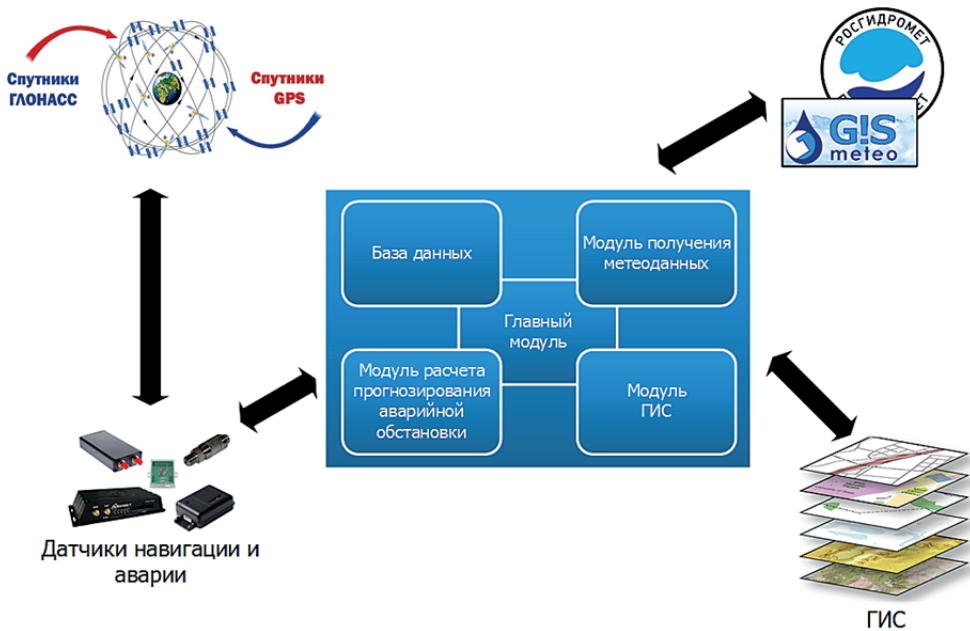


Рис. 1. Общая схема программно-аппаратного комплекса

Модуль спутникового мониторинга обеспечивает отслеживание в режиме реального времени местонахождения подвижного объекта и передает информацию о местонахождении через каналы сотовой связи в центральный программный модуль.

Информационный модуль о ДТП ТС состоит из датчиков аварии, которые устанавливаются непосредственно на транспортное средство (ТС) и обеспечивают автоматическую идентификацию факта аварии. Датчики должны фиксировать полный перечень аварийных ситуаций:

- соударение при свободном положении ТС;
- наезд на ТС;
- падения на ТС тяжелых предметов;
- потеря продольной/поперечной устойчивости;
- пожар;
- взрыв;
- взрыв состава ТС.

Для обеспечения идентификации перечисленных аварийных ситуаций используются три типа датчиков: датчик удара, датчик положения и датчик давления.

Модуль ГИС отображает на карте объекты, имеющие географическую привязку к местности, а также позволяет в режиме реального времени получить информацию об объекте (ТС и груз).

Модуль получения метеоданных осуществляет в режиме реального времени автоматический сбор метеоусловий (температура воздуха, направление ветра, скорость ветра и т. д.) местности, где произошла авария, обращаясь к доступным погодным интернет-сервисам, таким как GISMETEO.RU. Помимо этого модуль определяет степень вертикальной устойчивости воздуха на месте аварии, необходимую для расчетов прогнозирования масштабов химического заражения.

Модуль прогноза аварийной обстановки выполняет расчет возможного распространения поражающих факторов на месте аварии. Он состоит из нескольких подсистем расчетов прогнозирования. Каждая подсистема реализует отдельные методики в зависимости от класса опасности груза. Так, для прогноза химической обстановки при авариях ТС, перевозящих АХОВ, реализуется методика РД 52.04.253—90 [4], предназначенная для решения задач МЧС. В случае возникновения аварийной ситуации после расчетов на карте отображаются в зависимости от класса опасности груза зоны химического заражения, воздействия ударной волны взрыва газовой смеси (ГВС) или распространения пожара.

Управление взаимодействием всех модулей системы осуществляет главный модуль, который отслеживает поступление данных от датчиков в базу данных. Он отображает на карте передвижение объекта с помощью модуля ГИС, а также всю необходимую информацию об объекте. Как только поступает сигнал об аварии ТС, модуль автоматически запрашивает метеоусловия местности, где произошла авария. Эти данные передаются модулю расчета прогноза аварийной обстановки. Затем результаты прогноза отображаются на карте в виде поражающих зон. Все операции модуль осуществляет в режиме реального времени, что позволяет дежурному оператору МЧС максимально быстро принять управленческие решения по ликвидации последствий аварии, оперативно сообщить региональным органам управления МЧС о необходимости эвакуации населения тех населенных пунктов, которые попали в зону аварии.

Данная модель имеет низкую себестоимость, соединив в себе все последние доступные технологии GPS/ГЛОНАСС, открытые ГИС, сервисы метеоданных. Система эффективно решает проблему оперативности реагирования на последствия аварий транспорта, перевозящих наиболее распространенные опасные грузы.

Для обеспечения устойчивой работы комплекса необходимо постоянное стабильное интернет-соединение. Современная инфраструктура сети связи и интернет-коммуникации Российской Федерации имеет достаточную надежность и стабильность. Оперативный прогноз последствий аварии обеспечивается автоматизацией расчетов основных параметров поражающих зон ЧС, отображением прогноза аварийной обстановки на электронной карте оперативного дежурного РСЧС. Успешная реализация данного мероприятия обеспечивается объединением различных модулей.

## Литература

- [1] Соколов Ю.И. Вопросы безопасности транспортировки опасных грузов: Риск транспортировки. *Проблемы анализа риска*, 2009, т. 6, № 1.
- [2] ГОСТ 19433—88. *Грузы опасные. Классификация и маркировка*. Москва, Изд-во стандартов, 1998, 47 с.
- [3] Сайт Ространснадзора. URL: [www.rostransnadzor.gov.ru](http://www.rostransnadzor.gov.ru)
- [4] Кирсанов А.А., Сеницын В.В. Оперативный контроль подвижных объектов повышенной опасности. Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции 19–20 марта 2014 г., Минск, Издат. центр БГУ, с. 318–321.
- [5] Кирсанов А.А. Информационные аспекты оперативного контроля подвижных объектов повышенной опасности. *Студенческий научный вестник: сб. статей докладов*, 2013. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. 342–344.

УДК 502

## Научно-методический подход к оценке безопасности перевозки нефти водным транспортом для окружающей среды и путям ее повышения

© Кожин Данила Геннадьевич, Новиков Василий Константинович

*Россия, г. Москва, Московская государственная академия  
водного транспорта*

[Kozhin.danila@yandex.ru](mailto:Kozhin.danila@yandex.ru)

*В статье с использованием теории риска предлагается разработать методический подход к оценке безопасности перевозки нефти судами водного транспорта для окружающей среды и путям ее повышения, суть которого будет заключаться в построении всех без исключения сценариев возникновения и развития аварийных ситуаций, приводящих к попаданию нефти в водную среду, с последующей оценкой частот реализации, определением масштабов последствий каждого из них.*

**Ключевые слова:** *перевозка нефти, теория риска, научно-методический подход.*

Неотъемлемой частью сферы морских перевозок грузов и пассажиров является обеспечение ее безопасности, в том числе и для окружающей среды.

В соответствии с Федеральным законом от 28.12.2010 №390-ФЗ «О безопасности» одним из основных принципов обеспечения безопасности является приоритет превентивных мер, которые могут быть осуществлены за счет своевременного прогнозирования, выявления, анализа и оценки угроз безопасности.

Достижение этого требования федерального закона применительно к перевозке, например, нефти водным транспортом (ВТ) возможно только на основе использования специально разработанного научно-методического аппарата, позволяющего осуществлять всесторонний прогноз и анализ появления возможных вероятных ситуаций с разливом нефти на всех этапах ее перевозки.

В международной и отечественной практике при анализе аналогичных, сложных в техническом и технологическом плане ситуаций, используют теорию риска — теорию принятия управленческих решений в условиях вероятностной неопределенности. В этом плане анализ риска аварий при перевозке нефти ВТ рассматривается как вероятность попадания ее в водную среду и наносимый ей от этого ущерб [1].

По состоянию на настоящее время отсутствует возможный для практического использования научно-методический аппарат для оценки безопасности перевозки грузов судами ВТ. Необходимость разработки такого аппарата связана как с периодически происходящими авариями с судами, приводящими не только к материальным и людским потерям, но и к загрязнению окружающей среды (ОС), так и с международными и национальными требованиями в области обеспечения перевозки.

Для выполнения практических расчетов по этапам анализа риска требуется проведение специальных исследований по их разработке, как это показано на рис. 1.

Процесс проведения анализа риска загрязнения водной среды при перевозке нефти ВТ является достаточно сложным как в теоретическом, так и особенно в практическом плане. Он должен включать следующие основные этапы [2, 3]:

- 1) определение области применения и формирование исходных данных;
- 2) идентификация опасности перевозки;
- 3) анализ и оценка величины риска для каждого реципиента в результате загрязнения водной среды;
- 4) обоснование мероприятий по повышению безопасности перевозки.

На основе проведенных расчетов с использованием предложенного научно-методического аппарата представляется возможным сформулировать и практически осуществить следующие мероприятия, направленные на повышение безопасности перевозки нефти для ОС.

По цели превентивные меры могут быть разделены на следующие две относительно самостоятельные группы:

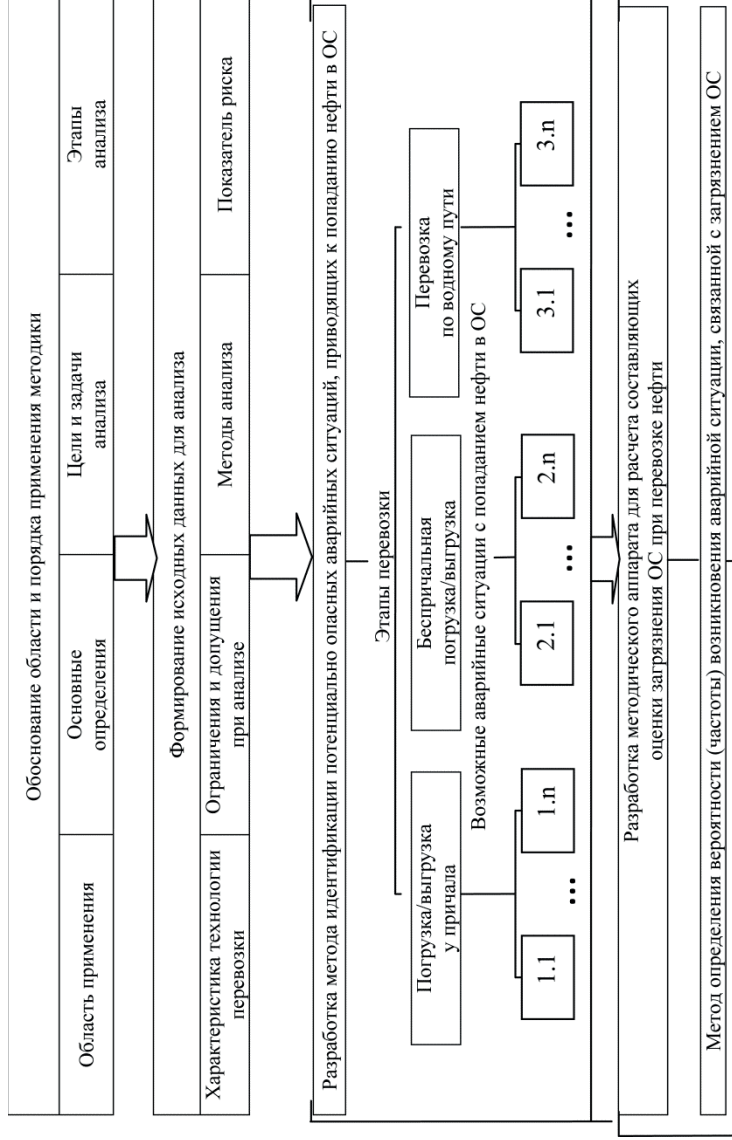
- меры, направленные на предупреждение аварии;
- меры, направленные на смягчение последствий аварии, если она все-таки произошла.

В свою очередь, превентивные меры, направленные на предупреждение аварии, можно подразделить на меры по предупреждению (снижению возможности возникновения) аварийных ситуаций (АС) и уменьшению вероятности перерастания АС в аварию.

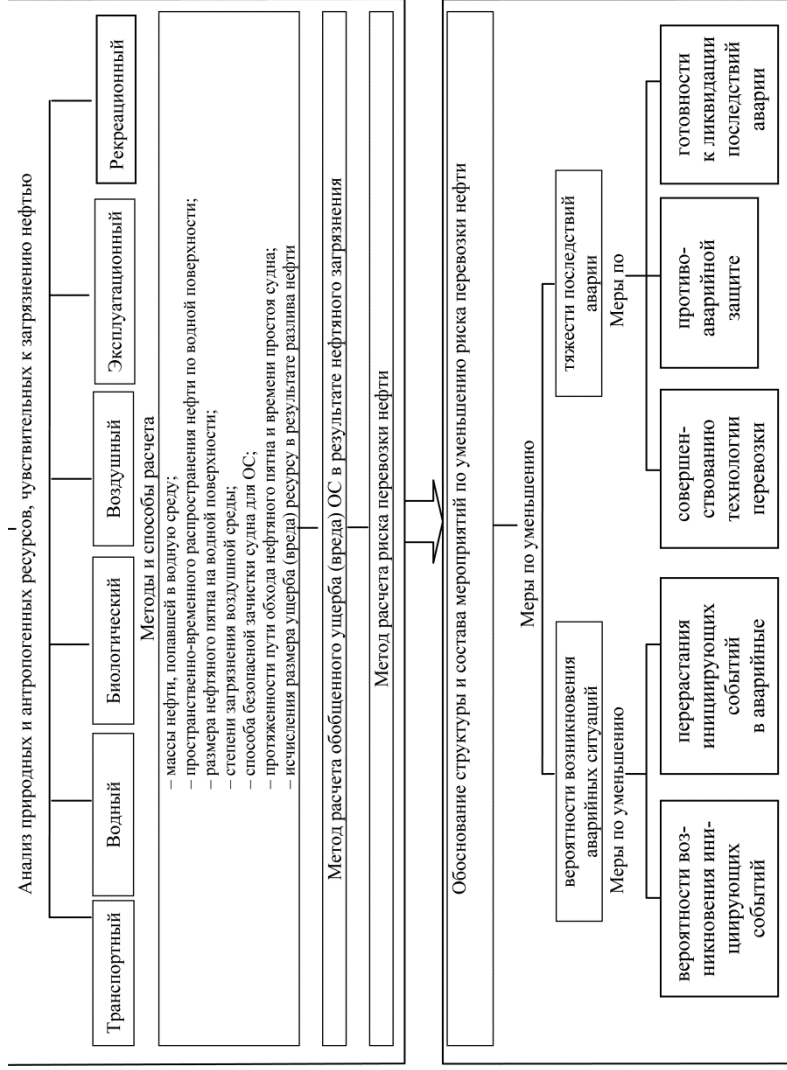
Таким образом, суть предложенного методического подхода к оценке безопасности перевозки нефти ВТ для ОС заключается в построении множества всех без исключения сценариев возникновения и развития возможных аварийных ситуаций, приводящих к попаданию нефти в водную среду, с последующей оценкой частот реализации, определением масштабов последствий каждого из них и разработке на этой основе структуры и состава практических мероприятий по повышению безопасности перевозки нефти ВТ для ОС.

## Литература

- [1] ГОСТ Р 51901—2002. *Управление надежностью. Анализ риска технологических систем.*
- [2] РД 03-418-01. *Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов* (утв. постановлением Ростехнадзора России от 10.07.2001 № 30).
- [3] Снопков В.И. (ред.), Конопелько Г.И., Васильева В.Б. *Безопасность мореплавания: учеб. для вузов.* Москва, Транспорт, 1994, 247 с.







**Рис. 1.** Структурно-логическая схема исследований по разработке научно-методического аппарата анализа риска перевозки нефти ВТ

## Обеспечение экологической безопасности при работе промышленной котельной

© Коломойцева Инесса Евгеньевна, Пашинин Валерий Алексеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный университет путей сообщения

[pashininmiit@yandex.ru](mailto:pashininmiit@yandex.ru)

*В статье рассмотрена возможность улучшения экологической обстановки при работе промышленной котельной, работающей на жидком топливе. В качестве альтернативы предложено перевести котлоагрегат на газообразное топливо. Применение данного метода позволит сократить выбросы в воздушный бассейн, что улучшит экологическую обстановку в районе расположения источника.*

**Ключевые слова:** газообразное топливо, жидкое топливо, промышленная котельная, загрязнение окружающей среды.

На сегодняшний день наиболее масштабным и значительным является химическое загрязнение среды несвойственными ей веществами химической природы. К ним относятся газообразные и аэрозольные загрязнители промышленно-бытового происхождения. Прогрессирует накопление углекислого газа в атмосфере.

В зависимости от вида хозяйственной деятельности, технологического процесса в атмосферный воздух могут выделяться различные опасные для здоровья человека и биосферы в целом вещества. В данной работе объектом исследования послужило эксплуатационное локомотивное депо Москва-пассажи́рская-Курская Московско-Курского отделения Московской железной дороги — филиала ОАО «РЖД». Оно находится в промышленной зоне на станции Москва-Техническая-Курская в ЦАО. Согласно санитарной классификации СанПин 2.2.1/2.1.1.1200-03 (п. 4.4), депо относится к 5-му классу и имеет санитарно-защитную зону 50 м.

На территории предприятия расположена котельная. Так, в результате деятельности промышленных котельных в зависимости от типа используемого топлива, в воздушный бассейн поступают такие вещества, как:

- **оксиды серы** ( $\text{SO}_2$ ), углерода ( $\text{CO}$ ), азота ( $\text{NO}_x$ ) и летучая зола с частицами несгоревшего топлива в виде сажи ( $\text{C}$ ) — для твердого топлива, Мазуты при сгорании в котлоагрегатах выделяют с дымовыми газами оксиды серы, диоксид азота, твердые продукты неполного сгорания и соединения ванадия ( $\text{V}$ ). При использовании в качестве топлива газа происходит выброс диоксида азота и оксида углерода;

- **оксид углерода.** Образуется при неполном сгорании ископаемого топлива (угля, нефти) в условиях недостатка кислорода и при низкой температуре [16]. Это вызывает головные боли, тошноту, а при более высокой концентрации — смерть;

- **диоксид серы** (диоксид серы, сернистый ангидрид). Образуется в процессе сгорания серосодержащих ископаемых видов топлива, в основном высокосернистого мазута, угля;

- **азот (оксид и диоксид азота).** При всех процессах горения образуются окислы азота, причем большей частью в виде оксида. Участвует в образовании азотной кис-

лоты, а также при реагировании с углеводородами (несгоревшие бензиновые пары) образует смог (красно-бурую дымку);

- **сажа** — аморфный углерод, продукт неполного сгорания или термического разложения углеводородов в неконтролируемых условиях;

- **ванадий**. Попадая в процессе сжигания топлива, он оказывает разнообразное негативное воздействие на здоровье человека.

Все загрязняющие атмосферу вещества подразделяются на четыре класса: 1-й — чрезвычайно опасные; 2-й — высоко опасные; 3-й — умеренно опасные; 4-й — малоопасные.

Наибольшая концентрация — С каждого вредного вещества в приземном слое не должна превышать максимально разовой предельно допустимой концентрации (ПДК), т. е.

$$C < \text{ПДК}_{\text{м.р.}}$$

При одновременно содержании в воздухе нескольких веществ однонаправленного действия выполняется условие

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \frac{C_3}{\text{ПДК}_3} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1,$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_n$  — концентрации 1, 2, ...,  $n$  вредного вещества в воздухе, мг/м<sup>3</sup>.

Эффектом суммации обладает ряд вредных веществ, близких по химическому строению и характеру влияния на организм человека.

Для уменьшения выбросов загрязняющих веществ в результате сжигания жидкого топлива, котельные предприятия переводят на газообразное топливо. Это является самым простым и бюджетным вариантом, в том случае, если конструкция котла позволяет функционировать как на жидком, так и на газообразном топливе. В этом случае капитальные затраты не потребуются на установку газоочистных устройств.

Таблица 1

Состав топлива по объему газ, %

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
76,7	4,5	1,7	0,8	0,6	1,0	14,5	0,2

Таблица 2

Исходные данные: мазут высокосернистый (S = 2,9 %)

$q_3$ , %	$q_4$ , %	$a_{\text{ун}}$ , %	$\alpha_{\text{ух}}$	$t_{\text{ух}}$ , °C	W <sup>p</sup> , %	A <sup>p</sup> , %	S <sup>p</sup> , %	C <sup>p</sup> , %	H <sup>p</sup> , %	N <sup>p</sup> , %	O <sup>p</sup> , %	A, СмгК/гр
1	1	0,1	1,3	170	3,0	0,3	2,9	83,4	10,0	0,2	0,2	140

На основании данных характеристик топлив, климатических условий, особенностей рельефа, конструкции котлоагрегата КЕ 10-14, требуемой паропроизводительности, а также с учетом фоновых концентраций загрязняющих веществ, были проведен анализ и расчеты, которые доказывают эффективность данного мероприятия. Результаты сведены в сравнительную табл. 3.

**Выбросы вредных веществ из котельной, при переводе котельной с мазута на газ**

Выделяемые вредные вещества	ПДК <sub>м.р.</sub> , С <sub>м.р.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	ПДК <sub>с.с.</sub> , С <sub>с.с.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Концентрация фоновая С <sub>ф.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	Мазут		Сравнительная характеристика	Газ		Сравнительная характеристика
				После трубы С <sub>расч.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	С <sub>расч.</sub> + С <sub>ф.</sub> , мг/м <sup>3</sup>		После трубы С <sub>расч.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	С <sub>расч.</sub> + С <sub>ф.</sub> , мг/м <sup>3</sup>	
Сажа (зола) с пылеуловителем	0,15	0,05	0,01	0,6 · 10 <sup>-4</sup>	0,01	Норма	—	—	—
Диоксид серы SO <sub>2</sub>	0,5	0,05	0,005	0,045	0,05	Превышение	—	—	—
Диоксид азота NO <sub>2</sub>	0,2	0,04	0,02	0,9 · 10 <sup>-4</sup>	0,02	Норма	0,15 · 10 <sup>-5</sup>	0,02	Норма
Оксид азота NO	0,4	0,06	0,01	0,8 · 10 <sup>-5</sup>	0,01	Норма	0,16 · 10 <sup>-6</sup>	0,01	Норма

**Литература**

- [1] Оценка степени загрязнения атмосферы (2010–2013). URL: <http://knowledge.allbest.ru>
- [2] Безопасность жизнедеятельности. URL: <http://lib.rfei.ru>
- [3] Охрана окружающей среды при эксплуатации теплоэнергетических установок. URL: [http://81\\_mu\\_ohrana\\_okr.sredy\\_.pdf](http://81_mu_ohrana_okr.sredy_.pdf)
- [4] Методика расчета ЗВ в атмосфере. URL: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/7/7042/index.php](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/7/7042/index.php)
- [5] Котлы паровые. URL: <http://kotloprom.ru/kotlyke.html>

УДК 504.61

**Антропогенный прессинг на экосистемы**

© Семчук Николай Николаевич, Кузьмин Александр Иванович

Россия, г. Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

[snnecvo@mail.ru](mailto:snnecvo@mail.ru)

*Взаимоотношения человека и природы от модели «симбиотической» к «прессинговой» переходили постепенно, в течение многих столетий. Антропогенное давление на природу осуществляется в воздушной, водной среде, на суше и даже в космосе. Любая экосистема обладает способностью к структурному и функциональному восстановлению. Однако этот процесс возможен только в ограниченных пределах изменений экологических факторов. Сильный или длительный негативный антропогенный прессинг может приводить к необратимым последствиям.*

**Ключевые слова:** человек, природа, модель, симбиоз, прессинг, антропогенное давление, экосистема, восстановление.

В прямом смысле термин «прессинг» (от. англ. pressing) в некоторых спортивных играх означает тотальное противодействие противнику на всей территории возможного контакта [1]. В переносном смысле (в области политики, экономики, экологии и т. п.) это понимается как давление, натиск, напор, нажим, преследование, бремя, стеснение, тяжесть [2].

Взаимоотношения человека и природы от модели «симбиотической» к «прессинговой» переходили постепенно, в течение многих столетий. Однако уже в XX веке они стали приобретать все более жесткие, антагонистические формы, что в наше время проявляется особенно ярко. Следует отметить, что сейчас антропогенное давление на природу осуществляется глобально, во всех точках контакта — в воздушной, водной среде, на суше и даже в космосе.

Загрязненность атмосферы — один из опаснейших факторов деградации окружающей среды. Поскольку города для большинства населения планеты становятся основной средой обитания, проблема загрязнения воздуха приобретает все более острые формы.

Изучая параметры морфологии и архитектоники побега растений индикаторов, авторы в своих исследованиях попытались определить на их основе количественные и качественные характеристики факторов окружающей среды. В качестве объектов исследования были использованы растения клена платановидного (*Acer platanoides*) из различных условий запыленности атмосферы.

Первая группа растений находилась на территории национального парка «Валдайский», вторая — в условиях стабильной и очень интенсивной запыленности атмосферы (непосредственно около кирпичного комбината в г. Боровичи Новгородской области).

Результаты исследования образцов листьев показали, что имеются параметры морфологии листовой пластинки как константные для каждого из экологических условий, так и существенно различающиеся по исследуемому фактору. Так, различие по одному из морфологических параметров в строении листовой пластинки было заметно даже визуально: боковые грани лопастей (замеры велись по центральной лопасти) у растений из национального парка располагались почти параллельно друг другу или имели тенденцию к сближению (реже к небольшому расхождению) в направлении от вершины лопасти к ее основанию.

У растений, выросших около Боровичского кирпичного комбината в сильно запыленной атмосфере, строение центральной лопасти большинства листовых пластинок напоминало трапециевидную форму (расширение между боковыми гранями в направлении от вершины лопасти к ее основанию).

Математическая обработка полученных данных подтвердила визуальные наблюдения. Так, разность по изучаемому параметру у листьев от валдайских и боровичских растений различалась более чем в 4 раза. Как следует из полученных данных, формирование параметров листовой пластинки у растений *Acer platanoides* существенно зависит от уровня запыленности приземных слоев атмосферы.

Наблюдения показали, что растительные организмы обладают достаточно большим диапазоном пластичности и способны адаптироваться к экстремальным параметрам одного или нескольких экологических факторов. Адсорбция на поверхности листовой пластинки тонкодисперсных пылевых частиц резко уменьшала доступное растению суммарное количество светового потока, снижала интенсивность фотосин-

теза и приводила к недостатку пластических веществ, необходимых для поддержания гомеостаза в оптимальных границах обеспечения всех процессов жизнедеятельности. Реакция растения проявилась в увеличении общей площади листовой пластинки за счет разрастания лопастей листа, что позволяло компенсировать потери. Однако когда изменения экологического фактора выходят за пределы нормы реакции генотипа адаптационные механизмы растения не позволяют осуществить полноценную компенсацию, что завершается его гибелью.

Загрязнения почвы напрямую связаны с продовольственной безопасностью страны. Особенно большие угрозы и экологические риски представляют собой добывающие отрасли промышленности.

Нефтегазопродукты на континентальных территориях перемещаются в основном с использованием трубопроводного транспорта. В связи с постепенным нарастанием общей длины, а также износом магистральных и локальных нефтегазопроводов количество аварийных ситуаций на них с каждым годом неуклонно увеличивается.

Значительная часть трубопроводного фонда устарела. В настоящее время в нашей стране эксплуатируется более 200 тыс. км магистральных нефтегазопроводов, 10 % которых работает более 55 лет, 32 % — около 40 лет. По различным оценкам, каждый год в России из магистральных трубопроводов вытекает большое количество добываемой нефти. Коррозия трубопроводов, несвоевременность их капитального ремонта, брак в процессе строительства, а также нарушения правил технической безопасности приводят к устойчивой тенденции увеличения числа аварий. Помимо огромных экономических потерь это приводит также и к экологическим бедствиям, поскольку очень часто аварии на трубопроводном транспорте вызывают пожары и взрывы.

Локальные, особенно незначительные утечки нефти, вроде бы не представляют большой угрозы для экосистемы. Однако если учесть реальные последствия, а также их дислокацию на большой территории, картина существенно меняется.

Даже после рекультивации торфяно-болотного участка с нефтяным разливом из-за механического перемешивания поверхностного и глубинного торфа, а также последующего фрезерования и внесения удобрений скорость разложения «модифицированного» торфа увеличивается в 10–20 раз, а водоудерживающая способность снижается раз в десять. В результате получается тот же нефтяной разлив, в котором грунт и нефть механически перемешали (перезерировали) на значительную глубину, почти не уменьшив содержание нефти. При этом еще и уничтожаются практически все растения. У такого перепаханного участка разлива исчезает структура, он сильно переувлажняется. Особенно хорошо это видно в динамике, если есть снимки до разлива, после разлива до и после перепахивания. Если основную часть нефти не убрать, а запахать, то многие годы на таком участке ничего расти не будет, даже если использовать различные биопрепараты и удобрения. Чаще всего такие «рекультивированные» участки превращаются в не зарастающую растениями топь (рис. 1). До воздействия нефтепродуктов на этом участке мог свободно, не промочив ног, ходить человек, а после в нем может утонуть даже специальная техника [4].

Объекты нефте- и газодобывающей отрасли являются очень опасными как в промышленном, так и экологическом отношении. Больше всего человеческих жертв и экономических потерь происходит при пожарах, которые возникают как во время разведочного бурения, так и в процессе эксплуатации.

Зафиксированы случаи, когда от искры, образовавшейся при ударе гальки о металлический предмет, загорался газовый или нефтяной фонтан. При этом огненный столб может достигать 150 м и более, а температура превышать 2000 °С [5].



Рис. 1. Нефтяной разлив, превратившийся в нефтяное болото

Наиболее угрожающие масштабы могут приобретать катастрофы на морских нефтеразработках. 22 апреля 2010 г. платформа *Deepwater Horizon* затонула у побережья американского штата Луизиана в точке с координатами  $28,737^\circ$  северной широты  $88,366^\circ$  западной долготы, что привело к крупнейшему в истории США разливу нефти. В результате разлива нефти была загрязнена огромная территория побережья (американские штаты Луизиана, Алабама, Миссисипи, Флорида и Техас). В прибрежной зоне наибольшему негативному воздействию подверглись болотистые местности: там нефть проникла в грунт на глубину 4...5 м.

Утечка нефти в воды Мексиканского залива привела к массовой гибели растений, удерживающих почву в соляных болотах на побережье Флориды и Луизианы, что ускорило эрозию почвы и захват территории суши морем. В районе экологической катастрофы погибли практически все улитки и другие беспозвоночные животные.

Значительно возросла смертность среди различных видов китообразных, распространенных в районе залива. Увеличилась смертность дельфинов вида афалина, зафиксированный после разлива нефти [3].

Минимизировать последствия аварии, сократить период от начала ЧП до полной заделки трубы в данном случае было возможно при использовании специальных устройств, позволяющих дистанционно проводить локальные восстановительные работы.

Повреждение трубы произошло на глубине 1,5 тыс. м. Пробоин оказалось несквозным. Первая попытка установить стальной купол, чтобы накрыть повреждение, оказалась неудачной. Для прекращения утечки пришлось пробурить две дополнительные разгрузочные скважины, после чего в них и в аварийную скважину была закачана буровая жидкость и цемент. Это заняло очень много времени.

Авторами разработан способ ликвидации аварии подобного типа. Одним из возможных вариантов перекрытия потока жидкости из трубы, находящейся на большой глубине, является применение устройства, которое крепится к самой трубе. Устройство состоит из двух подвижно соединенных между собой частей, которые подводят к трубе в зоне, расположенной ниже повреждения. Это позволяет избежать влияния

сильного давления потока жидкости на передвижение устройства. После контакта с поверхностью трубы обе части устройства жестко соединяют между собой так, чтобы труба оказалась в полости устройства.

Фиксация его на трубе происходит за счет сверления нескольких отверстий в стенках трубы, причем эти же сверла затем используют в качестве фиксаторов. После закрепления устройства на аварийной трубе делают ее срез и перемещают заслонку, находящуюся в корпусе устройства, для перекрытия потока жидкости. Для ликвидации аварии и восстановления функций трубопровода с использованием данного способа может потребоваться лишь несколько дней.

Любая экосистема обладает способностью к структурному и функциональному восстановлению даже без каких-либо воздействий извне. Однако этот процесс возможен только в определенных пределах изменений экологических факторов. Сильный или длительный негативный антропогенный прессинг может приводить к необратимым последствиям.

### Литература

- [1] Лехин И.В., Петров Ф.Н. *Словарь иностранных слов*. Москва, ГИС, 1949, 805 с.
- [2] Абрамов Н. *Словарь русских синонимов и сходных по смыслу выражений*. Москва, Русские словари, 1999, 431 с.
- [3] *Разлив нефти в Мексиканском заливе 22 апреля 2010 г.* URL: <http://ria.ru/spravka/20140422/1004524045.html> (дата обращения: 15.06.2015).
- [4] *Нефтедобыча и ДДЗ: Сопутствующие воздействия и проблемы*. URL: [http://wiki.gis-lab.info/w/%D0%9D%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%B0\\_%D0%B8\\_%D0%94%D0%94%D0%97:%D0%A1%D0%BE%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%81%D1%82%D0%B2%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B5\\_%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D1%8F\\_%D0%B8\\_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D1%8B](http://wiki.gis-lab.info/w/%D0%9D%D0%B5%D1%84%D1%82%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D1%87%D0%B0_%D0%B8_%D0%94%D0%94%D0%97:%D0%A1%D0%BE%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%81%D1%82%D0%B2%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D1%8F_%D0%B8_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D1%8B) (дата обращения 11.06.2015).
- [5] Шароварников А.Ф., Молчанов В.П., Воевода С.С., Шароварников С.А. *Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов*. Москва, Калан, 2002.

УДК 620.92

## Поиск энергоэффективных решений для освещения мостового перехода через керченский пролив

© Маюрова Александра Сергеевна, Кустикова Марина Александровна

Россия, г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

[Shushka96@gmail.com](mailto:Shushka96@gmail.com), [marinakustikova@mail.ru](mailto:marinakustikova@mail.ru)

*В работе изучаются различные виды фотовольтаических систем. Рассмотрены достоинства и недостатки фотозлектрических преобразователей различных типов. Выполнен расчет расстояния между опорами освещения Керченского моста на*



основании норм освещенности дорог для трех видов осветительных систем. Производился расчет начальной стоимости оборудования для освещения мостового перехода через Керченский пролив. Выявлены достоинства и недостатки различных систем освещения моста.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, освещение моста, фотоэлектрический преобразователь, солнечные батареи, осветительные системы.

**Постановка проблемы.** В марте 2014 года к Российской Федерации была присоединена Республика Крым. В связи с этими событиями остро встал вопрос о создании единой транспортной системы через Керченский пролив. Во время Великой Отечественной войны в летнее время была построена мостовая переправа через Керченский пролив, которая была разрушена следующей весной из-за схода льда и сложных климатических условий. В ноябре 2014 года был представлен проект: совмещенный мост с автомобильной и электрифицированной железной дорогой. Длина мостовой переправы через Керченский пролив по проекту составляет 19 км. В связи с большой протяженностью моста является актуальной проблема энергоэффективности освещения [1]. Необходимость ее решения диктуется как экономическими, так и социальными процессами, происходящими в нашей стране. В некоторых южных регионах России для освещения удаленных от городов мостов применяют солнечные батареи. Эти системы зачастую используют аккумуляторные батареи для хранения выработанной днем электроэнергии. По данным Гидрометцентра России в Керчи в среднем 300 солнечных дней и 2470 солнечных часов в году.

**Постановка цели.** Исследование энергоэффективности осветительной системы мостового перехода через Керченский пролив, питающейся от энергии солнца.

**Постановка задач:**

- изучить существующие в настоящее время типы и виды солнечных панелей;
- выполнить ориентировочный энергетический расчет системы освещения и солнечных панелей;
- провести стоимостной расчет оборудования.

Солнечные батареи являются фотоэлектрическими преобразователями — полупроводниковыми устройствами, соединенными последовательно-параллельно между собой. Принцип работы данных устройств основан на фотовольтаическом эффекте, т. е. возникновении электрического тока при воздействии солнечного излучения на неоднородную полупроводниковую структуру.

Классификация солнечных батарей по технологии изготовления выделяет два основных типа: кремниевые и пленочные. Кремниевые солнечные элементы дополнительно подразделяются на монокристаллические, поликристаллические и аморфные. В настоящее время большую часть рынка занимают поликристаллические кремниевые элементы, однако с развитием технологий лидирующие позиции займут тонкопленочные солнечные батареи.

Монокристаллические батареи состоят из чистого кремния, который широко используется в производстве полупроводников. КПД монокристаллических батарей составляет 17...20 %.

Поликристаллические солнечные элементы изготавливаются из кремния, получаемого путем медленного охлаждения кремниевого расплава. Данные элементы дешевле, чем монокристаллические батареи, так как их способ получения менее энергоемкий. Солнечные элементы из поликристаллов наиболее распространены, КПД поликристаллических батарей ниже, чем у монокристаллических, и составляет 12...17 %.

Аморфные батареи относятся как к пленочным батареям по технике производства, так и к кремниевым. Данный метод изготовления является самым простым и дешевым, но эффективность батареи значительно ниже из-за процессов деградации кремния. КПД батарей из аморфного кремния составляет 5...6 % [2].

Одинаковую мощность всей системы можно получить с помощью любых видов солнечных элементов. Более эффективные фотоэлектрические преобразователи займут меньшую площадь (табл. 1).

Таблица 1

**Характеристики различных типов солнечных панелей**

Тип солнечных панелей	Вырабатываемая мощность, Вт	Площадь поверхности, м <sup>2</sup>	Ориентировочная цена, тыс. руб.
Поликристаллические	100	0,80	15
Монокристаллические	100	0,55	16
Тонкопленочные	90	1,54	6

Данные системы имеют ряд преимуществ, но основным плюсом использования солнечных батарей является их экономичность. Установка осветительной системы, питающейся от солнечной энергии, дороже обычной системы, однако при этом существенно снижается потребление электроэнергии на объекте. Солнечная система регулируется автоматически, в системах автономного электроснабжения на солнечных батареях электричество запасается на аккумуляторах. Поскольку электричество производится путем прямого преобразования энергии света, то нет абсолютно никаких шумов. В течение года солнечные батареи теряют до 1,5 % своей первоначальной мощности из-за старения кремния. Общий срок службы солнечных батарей составляет более 45 лет.

При установке фонарных столбов расстояние между опорами освещения устанавливается исходя из количества, мощности и высоты установки осветительных фонарей установленных на опоре. Расчет расстояния между опорами освещения выполняется на основании норм освещенности дорог (СНиП 23-05-95). Данные расчета можно привести в табл. 2.

Поскольку на текущий момент нет информации о выбранном типе освещения мостовой переправы через Керченский пролив, то будет целесообразно рассмотреть несколько случаев. Возьмем для расчета три вида осветительных систем с различными типами источника света, но одинаковой мощностью в 250 Вт:

- с металлогалогенной лампой ГКУ21-250-012;
- со светодиодами ДКУ03-240-001;
- с дуговой натриевой трубчатой лампой ЖКУ08-250-001.

Эксплуатация солнечных панелей в качестве источника электроэнергии наиболее эффективна с использованием энергоэффективных приборов. В случае с системой освещения наиболее выгодно применять светодиоды, так как данный тип освещения потребляет меньше энергии, чем дуговые, накаливающие и газоразрядные лампы.

Как следует из табл. 2, дороже всего стоит осветительная система со светодиодами, однако если использовать для электропитания солнечные батареи, наиболее выгодно применять светодиоды, так как данный тип освещения потребляет меньше энергии, чем дуговые, накаливающие и газоразрядные лампы. Срок службы светодиодных систем по сравнению с номинальным сроком службы ламп в среднем в 50 раз больше. Более подробные экономические расчеты будут выполнены в дальнейших частях работы [3].

Таблица 2

**Сравнительные характеристики осветительных приборов**

Характеристика	ГКУ21-250-011	ДКУ03-240-001	ЖКУ08-250-001
	Металлогалогенная лампа	Светодиоды	Дуговая натриевая трубчатая лампа
Мощность, Вт	250	240	250
Световой поток, лм	20 000	26 220	30 000
Требуемое расстояние между столбами, м	45,5	42,3	49,5
Стоимость за 1 шт., руб.	5635	34200	2785
Необходимое количество, шт.	418	450	384
Итоговая стоимость, руб.	2 355 430	15 390 000	1 069 440

Номинальная мощность светильников составляет 250 Вт, исходя из этих данных, подбираем солнечные панели достаточной мощности. В состав системы электропитания, питающейся от солнечной энергии, входят не только солнечные батареи. Система также включает в себя аккумуляторы, инверторы и контроллеры, однако солнечная панель это тот элемент, с которого начинается весь процесс накопления и преобразования энергии [4]. Тонкопленочные элементы не рассматриваются из-за большой площади солнечных панелей при заявленной мощности. Сравнительные характеристики солнечных батарей представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Сравнительные характеристики осветительных приборов**

Тип солнечных панелей	Монокристаллический	Поликристаллический
Мощность, Вт	260	260
Площадь, м <sup>2</sup>	1,28	1,6
Стоимость системы за 1 шт., руб.	50 000	47 200
Итоговая стоимость с МГЛ, руб.	20 900 000	19 729 600
Итоговая стоимость со светодиодами, руб.	22 500 000	21 240 000
Итоговая стоимость с ДНТЛ, руб.	19 200 000	18 124 800

**Заключение.** Наиболее перспективным направлением в солнечной энергетике являются пленочные солнечные элементы, однако в настоящий момент более распространены кремниевые панели. Осветительные приборы с дуговыми натриевыми трубчатыми лампами являются самыми дешевыми, однако светодиодные системы имеют более долгий срок службы и низкое энергопотребление. Для обеспечения энергоэффективного питания осветительной системы наиболее рационально взять монокристаллические солнечные элементы, так как они обладают меньшей площадью, чем поликристаллические. Для выбора типа осветительных приборов необходимо провести дополнительные экономические расчеты. Существенным недостатком солнечных панелей является наличие токсичных веществ в составе фотоэлементов и использование ядовитых веществ при их производстве. После 30 лет эксплуатации производительность солнечных батарей падает. По истечении 30–50 лет эксплуатации панелей возникает проблема их утилизации, которая пока не разрешена с точки зрения экологии.

## Литература

- [1] Burschka J. Sequential Deposition as a Route to High-Performance Perovskite-Sensitized Solar Cells. *Nature* 499, 18.07.2013, pp. 316–319.
- [2] Кашкаров А.П. *Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции*. Москва, ДМК Пресс, 2011, 144 с.
- [3] Козловская В.Б., Радкевич В.Н., Сацукевич В.Н. *Электрическое освещение: справочник*. Минск, 2007, 37 с.
- [4] Dr. Arnulf Jager-Waldau. PV Status Report 2012. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012, 58 p.

УДК 66.074.5

## Метод биологической очистки воздуха от летучих органических соединений

© Митин Александр Константинович, Николайкина Наталья Евгеньевна

Россия, г. Москва, Московский государственный машиностроительный университет, Институт инженерной экологии и химического машиностроения

[mitin.rus@gmail.com](mailto:mitin.rus@gmail.com)

*В работе представлены гидродинамические характеристики новых насадок, предназначенных для биологической очистки газа преимущественно от летучих органических соединений. По результатам экспериментов выявлены устойчивые режимы работы по скорости очищаемого газового потока — не более 0,1 м/с, что соответствует вязкостному режиму течения. Установлена зависимость, позволяющая прогнозировать изменение гидравлического сопротивления биофильтрационных насадок со временем. Предложен периодичный режим подачи орошения, позволяющий повысить эффективность очистки газа.*

**Ключевые слова:** биологическая очистка газа, насадки, летучие органические соединения, гидравлическое сопротивление.

Особо опасными и распространенными загрязнителями являются летучие органические соединения (ЛОС). ЛОС (галогенпроизводные, ароматические углеводороды, фенолы, кетоны, меркаптаны, нитросоединения и др.), вызванные антропогенной деятельностью, могут стать причиной онкологических и других заболеваний человека. Кроме того, ЛОС часто являются веществами со специфическим запахом и вызывают раздражение слизистых оболочек человека, обонятельный дискомфорт.

Снижение количества загрязняющих веществ (ЗВ) в выбросах от стационарных источников осуществляется внедрением газоочистных систем. Использование традиционных методов газоочистки (абсорбции, адсорбции, каталитического и термического окисления, озонирования и т. п.) приводит к образованию вторичных отходов и ЗВ, а также высоким эксплуатационным и капитальным затратам при очистке от ЛОС и дезодорации, поскольку выбросы ЛОС многокомпонентны, больших объемов

(более 10 000 м<sup>3</sup>/ч) и малой концентрации ЗВ (от 1 мг/м<sup>3</sup> и более) (например, выброс табачной фабрики).

Альтернативным является метод биологической очистки газа (биофильтрация). Данный метод не продуцирует вторичные загрязнения, поскольку в процессе очистки используются микроорганизмы, прикрепленные к насадке, и окисляющие органические соединения в аэробных условиях вплоть до паров воды и диоксида углерода. Биофильтрация газа является наименее энергоемким методом, требует минимальных капитальных и эксплуатационных затрат, а также устойчиво работает при очистке выбросов от многокомпонентных смесей, в том числе при низких концентрациях ЗВ (0,001 до 1 г/м<sup>3</sup>) в больших объемах выбросов (10 до 100 000 м<sup>3</sup>/ч) [1].

Таким образом, востребованность биологического метода очистки газа от ЛОС велика. Однако производительность биофильтров по газу остается ограниченной, что обусловлено несовершенством повсеместно используемой в странах ЕС в биофильтрах насыпной насадки в виде кусков коры, опилок и т. д. [1, 2]. Такие насадки обладают высоким гидравлическим сопротивлением, недолговечностью и неприменимы в условиях климата средней полосы РФ.

В нашей работе проводился анализ конструкций и материалов насадок для биологической очистки газа, требований, предъявляемых к ним, описанных в [3], на основании которых был предложен алгоритм выбора биофильтрационной насадки.

В соответствии с нашими исследованиями наиболее перспективными являются насадки из пенополиуретана (ППУ) и предложенная нами новая комбинированная полимерная насадка (КПН) [4].

Изучение гидродинамических и массообменных характеристик насадок для биофильтров выявило следующие особенности:

- увеличение гидравлического сопротивления биофильтров со временем, что связано с ростом биомассы. В этой связи важно уметь прогнозировать изменение гидравлического сопротивления во времени в целях предотвращения закупорки биофильтра;
- процесс биофильтрации часто лимитирован скоростью биодеградации ЗВ в слое биопленки. В этой связи нами было выявлено, что рабочие скорости газового потока соответствуют вязкостному режиму течения.
- не выявлено явного преимущества прямоточной, противоточной или перекрестной организации контактирующих потоков. Однако нами установлено, что пленка жидкости может служить дополнительным барьером, создающим сопротивление массопередаче.

На рис. 1 представлены результаты экспериментов по определению гидравлического сопротивления биофильтрационных насадок, а на рис. 2 — эффективность очистки воздуха от паров дихлорметана (ДХМ) в зависимости от скорости газа.

По результатам экспериментов выявлено, что при скорости газового потока менее 0,1 м/с наблюдается наибольшая эффективность очистки. В соответствии с рис. 1 графики кривых при  $W_0 < 0,1$  м/с лежат в вязкостной области, описываемой линейной зависимостью

$$\frac{\Delta P}{H} = f(W_0).$$

В этой связи при расчете гидравлического сопротивления биофильтрационных насадок уместнее использовать формулу Эргана, описывающую работу насадок в вязкостном и инерционном режимах течения газа. Поскольку насадки для биофильтров

не работают в области инерционного режима течения, отбросим второе слагаемое в уравнении Эргана, после чего получим уравнение

$$\frac{\Delta P}{H} = A \frac{\mu a^2 W_0}{\varepsilon^3}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  — потеря напора на насадке, Па;  $H$  — высота насадочного слоя, м;  $A$  — коэффициент, описывающий вязкостный режим течения газа;  $\mu$  — динамическая вязкость газа, Па·с;  $\varepsilon$  — порозность насадочного слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $a$  — удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

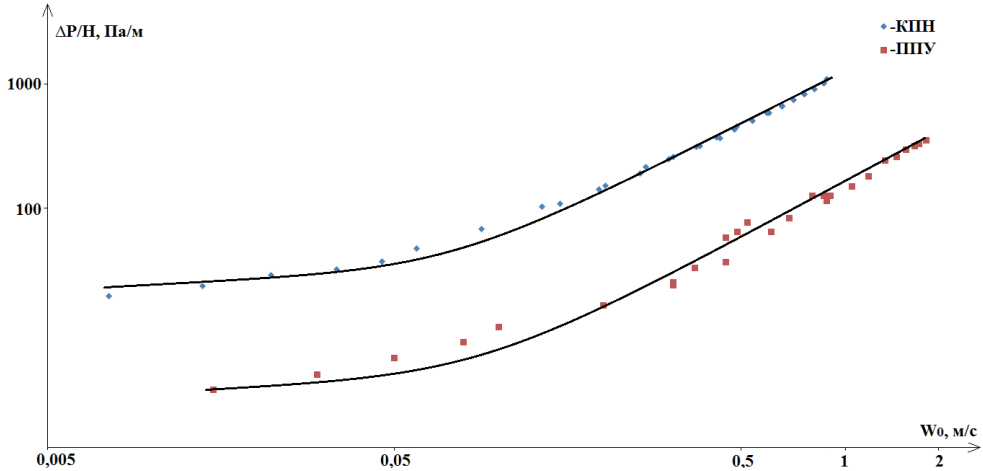


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления сухих насадок от фиктивной скорости газа

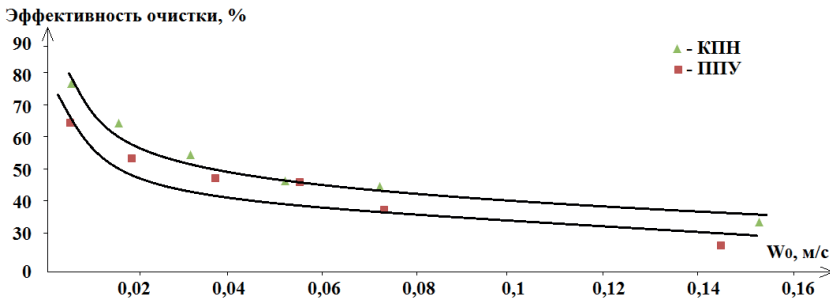


Рис. 2. Эффективность очистки воздуха от ДХМ в зависимости от скорости газоз-душного потока

Для исследуемых насадок получены следующие уравнения для определения гидравлического сопротивления:

$$\frac{\Delta P}{H} = 15 \left( \frac{\mu a^2 W_0}{\varepsilon^3} + 1 \right)$$

— для КПН;

$$\frac{\Delta P}{H} = 6 \left( \frac{\mu a^2 W_0}{\varepsilon^3} + 0,5 \right)$$

— для ППУ.

На рис. 3 представлены результаты экспериментов по мониторингу изменения гидравлического сопротивления насадок со временем. Данные s-образные графики могут быть описаны логистической функцией Верхульста, описывающей рост популяции организмов.

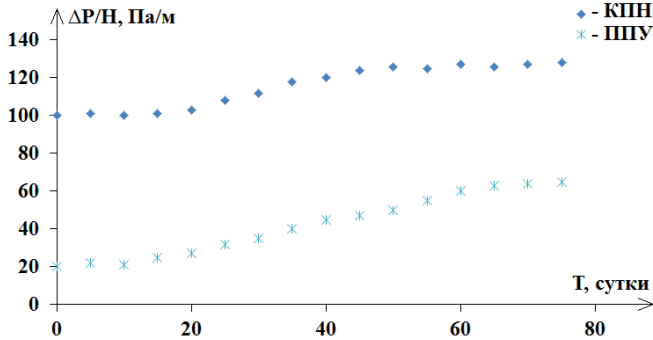


Рис. 3. Изменение гидравлического сопротивления со временем

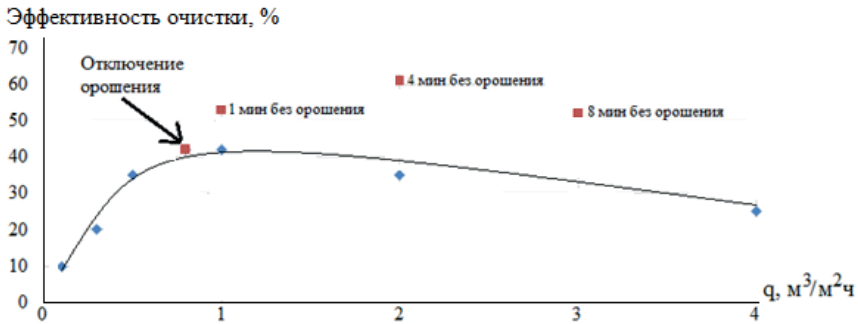


Рис. 4. Зависимость эффективности удаления ДХМ от плотности орошения на насадке КПН при  $W_0 = 0,05$  м/с

Процесс биологической очистки газа невозможно эффективно проводить без подачи воды на орошение биопленки, поскольку вода — один из обязательных источников поддержания жизнедеятельности микроорганизмов. Однако излишнее увлажнение приводит к уменьшению эффективности очистки газа. На рис. 4 представлено влияние плотности орошения на эффективность очистки газа (сплошная линия графика). При увеличении плотности орошения происходит резкое повышение эффективности удаления ЗВ, но при достижении значений более  $2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  наблюдается спад эффективности очистки, что, по нашему мнению, связано с уменьшением коэффициента массоотдачи в связи с утолщением пленки жидкости, а также снижением биодegradации в связи с уменьшением поступления кислорода к клеткам. При высокой плотности орошения возможен смыв активной биомассы, находящейся у поверхности биомассы, что также отражается на снижении эффективности удаления ЗВ.

Предположение о минимизации плотности орошения за счет отсечки (периодичности) орошения с целью поддержания высокой эффективности было проверено экспериментально. На рис. 4 видно, что отключение орошения до 4 мин приводит к повышению эффективности, затем наблюдается ее спад, связанный с высыханием биопленки. Таким образом, гравитационное стекание ограниченного объема жидкости обеспечивает минимальное количество жидкости, которого достаточно для поддержания жизнедеятельности клеток, но при этом не создаются отрицательные эффекты, описанные выше.

### Литература

- [1] Deviny J.S., Deshusses M.A., Webster T.S. Biofiltration for Air Pollution Control. Boca Raton (Fla.), Lewis Publishers, 1999, 320 p.
- [2] Dorado A., Lafuente J., Gabriel D., Gamisans X. The Role of Water in the Performance of Biofilters: Parameterization of Pressure Drop and Sorption Capacities for Common Packing Materials. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 180, iss. 1–3, pp. 693–702.
- [3] Митин А.К., Николайкина Н.Е., Пушнов А.С. Насадки для газоочистных биофильтров. *Экология и промышленность России*, 2014, № 5, с. 13–17.
- [4] Митин А.К., Николайкина Н.Е., Загустина Н.А., Пушнов А.С. Эффективность очистки газов от дихлорметана методом биофильтрации на различных насадках. *Экология и промышленность России*, 2015, № 5, с. 20–25.

УДК 614.8

## Разработка путей эвакуации населения, проживающего в крупном населенном пункте, средствами ГИС

© Муйкич Эмин, Татаринов Виктор Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[sffrombauman@mail.ru](mailto:sffrombauman@mail.ru), [viktor.tatarinov@bk.ru](mailto:viktor.tatarinov@bk.ru)

*В статье проведено исследование возможностей геоинформационных систем (ГИС) для разработки путей эвакуации населения, проживающего в крупных населенных пунктах, из зон чрезвычайных ситуаций. Впервые продемонстрирована возможность выбора путей эвакуации населения средствами ГИС на примере г. Шатуры Московской области.*

**Ключевые слова:** геоинформационные системы (ГИС), чрезвычайные ситуации (ЧС), эвакуация, население.

Предметом исследования данной работы являлась разработка способов эвакуации населения, проживающего в крупном населенном пункте, подверженном опасному воздействию лесного пожара, средствами геоинформационных систем.



Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью совершенствования мероприятий по защите населения в ЧС.

Проблема лесных пожаров остается одной из актуальных проблем современности. Наибольший урон лесам наносят неуправляемые крупные пожары. Поэтому вопросы оценки и прогнозирования как лесных, так и экстремальных пожаров остаются важными. Проблема горения лесов имеет еще и значимое экологическое значение: леса являются важной составляющей современной географической оболочки. Потому сокращение запасов лесов ведет к кризисным явлениям в глобальном масштабе.

Данные многолетних наблюдений по лесным пожарам и общая характеристика пожарной обстановки в Московской области за период с 2001 по 2011 годы представлены на рис. 1.

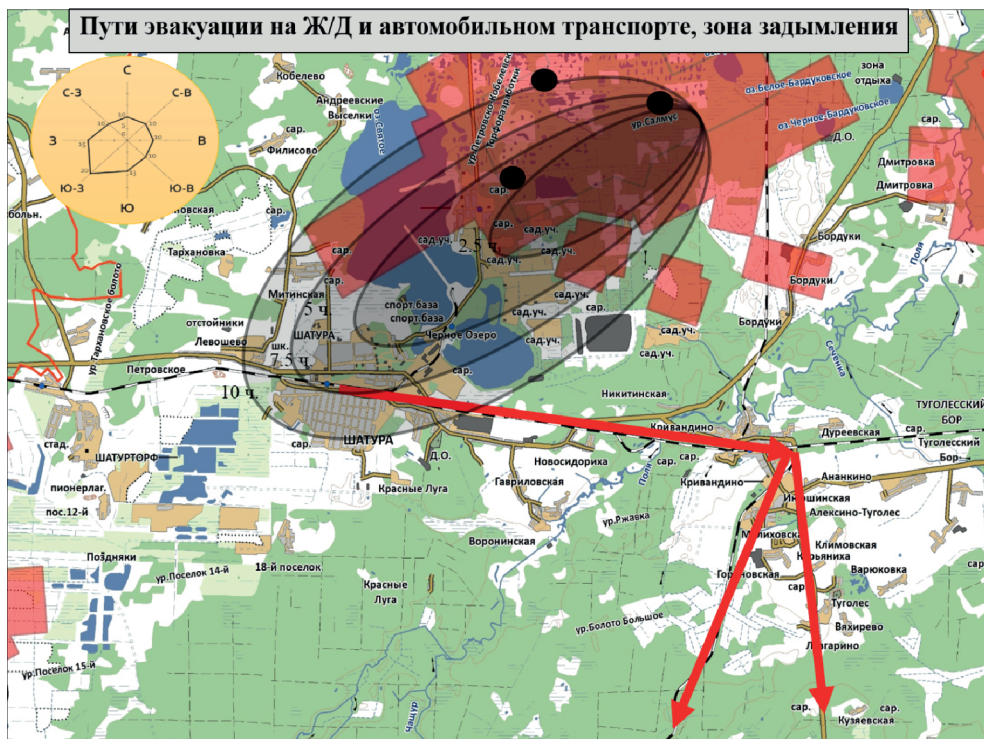


**Рис. 1.** Термоточки на карте Московской области. Термоточка — это информация о термическом явлении, получаемая со спутника

Опишем общие принципы организации эвакуации населения.

Эвакуация населения — это комплекс мероприятий по организованному вывозу (выводу) населения из зон ЧС или вероятной ЧС природного и техногенного характера и его кратковременному размещению в заблаговременно подготовленных по

условиям первоочередного жизнеобеспечения безопасных (вне зон действия поражающих факторов источника ЧС) районах. Эвакуация считается законченной, когда все подлежащее эвакуации население будет вывезено (выведено) за границы зоны действия поражающих факторов источника ЧС в безопасные районы [1–4].



**Рис. 2.** Пути эвакуации населения на ж/д и автомобильном транспорте из г. Шатура Московской области

Особенности проведения эвакуации определяются характером источника ЧС, пространственно-временными характеристиками воздействия поражающих факторов источника ЧС, численностью и охватом вывозимого (выводимого) населения, временем и срочностью проведения эвакуационных мероприятий. Указанные признаки могут быть положены в основу классификации вариантов проведения эвакуации.

Планирование, организация и проведение эвакуации населения непосредственно возлагаются на эвакуационные органы, региональные центры по делам гражданской обороны (ГО), чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, управления ГОЧС.

Планирование эвакуационных мероприятий осуществляют эвакуационные комиссии при участии управлений ГОЧС, органов исполнительной власти, а также объектов экономики.

Проведение эвакуации населения из зоны ЧС в каждом конкретном случае определяется условиями возникновения и развития ЧС, характером и пространственно-временными параметрами воздействия поражающих факторов источника ЧС.

Анализ данных, представленных на рис. 1, позволил сделать вывод о том, что самым крупным населенным пунктом Московской области, подвергающимся воздействию продуктов лесных и торфяных пожаров, является город Шатура. Этот город и был выбран в качестве объекта исследования. В левом верхнем углу рис. 2 показана роза ветров в данном районе. В правом верхнем углу представлены возможные зоны задымления в зависимости от времени, прошедшего от начала пожара. В нижней части рисунка на основе анализа дорожной сети выбраны маршруты эвакуации населения железнодорожным и автомобильным транспортом.

Таким образом, практическим итогом данной работы является разработка путей и способов эвакуации населения, проживающего в Шатурском районе, средствами ГИС.

### Литература

- [1] Холщевников В.В. Влияние закономерностей передвижения городского населения на пропускную способность пунктов доступа многофункциональных высотных зданий. *Пожаровзрывобезопасность*, 2008, № 1, с. 34-43.
- [2] Парфененко А.П. Проблемы эвакуации детей и подростков при пожарах. *Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>, вып. № 5 (33), октябрь 2010, 5 с.
- [3] Алексеев Ю.В. Об организации движения людских потоков по территории комплекса зданий и сооружений при эвакуации во время пожара и других опасных событий. *Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>, вып. № 1 (41), февраль 2012, 7 с.
- [4] Холщевников В.В., Парфененко А.П. О моделировании эвакуации людей и динамики опасных факторов пожара в целях нормирования эвакуационных путей. *Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>, вып. № 1 (53), 2014, 8 с.

УДК 628.33

## Сравнительный анализ сорбентов в процессах очистки металлосодержащих сточных вод

© Мусина Светлана Айратовна, Красногорская Наталия Николаевна

Россия, г. Уфа, Уфимский государственный авиационный технический университет

[musinasa@gmail.com](mailto:musinasa@gmail.com)

**Научный руководитель:** — д.т.н., профессор, зав.кафедрой безопасности производства и промышленной экологии ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет

*Рассмотрены основные недостатки реагентного метода очистки сточных вод как наиболее распространенного на предприятиях России. Определены области применения сорбционных методов очистки. Проведено сравнение технических и технологических характеристик различных сорбентов для удаления тяжелых металлов из сточных вод промышленных предприятий. Установлено, что необходимо проводить*

*экспериментальные исследования сорбентов в идентичных условиях, что позволит определить наиболее оптимальный сорбент.*

**Ключевые слова:** *сточная вода, реагентный метод, сорбция, адсорбент, эффективность очистки.*

Промышленные предприятия сбрасывают в поверхностные водные объекты недостаточно очищенные сточные воды, что является одним из основных источников загрязнения окружающей среды.

Раздельное отведение локальных стоков с учетом специфики загрязняющих компонентов и последующая их обработка химреагентами — это подход, который применяется при очистке сточных вод промышленных производств уже много лет. Однако у реагентного метода есть существенные недостатки. В связи с амфотерными свойствами некоторых металлов тяжело поддерживать такой диапазон pH, при котором все ионы тяжелых металлов можно было бы осадить до значений ПДК. Кроме того, причиной недостаточной эффективности реагентного метода может являться проскок взвешенных веществ, представляющих по составу карбонаты и гидроксиды металлов, на стадиях отстаивания и фильтрации [1].

Анализ литературных данных показал, что при использовании высокотехнологичных адсорбентов возможно интенсифицировать существующую технологию реагентной очистки, повысить эффективность очистки без значительных капитальных затрат и с минимальной реконструкцией имеющегося оборудования.

В качестве сорбентов используются активированные угли, синтетические сорбенты, отходы производства (зола, шлаки, опилки и др.).

Технология очистки промышленных стоков с применением активированного алюмосиликатного адсорбента «Глинт» была разработана в Санкт-Петербургском государственном университете путей сообщения под руководством профессора Е.Г. Петрова. Адсорбент позволяет в корпусе одного фильтра создать условия для осаждения катионов тяжелых металлов (никель, свинец, марганец, медь, хром 3+, железо, цинк, кадмий и др.), гуминовых веществ, а также нефтепродуктов [1].

Сорбент «Глинт» применяется в качестве фильтрующей загрузки напорных и безнапорных фильтров в системах очистки сточных вод многих промышленных предприятий. Действие адсорбента основано на использовании целого комплекса его уникальных свойств, которые обеспечивают достижение конечного результата — осаждение загрязняющих веществ на поверхности зерен материала и последующее удаление загрязнений при промывке фильтра. Степень очистки от ионов тяжелых металлов данным сорбентом высокая: 95...99 % [2].

В отличие от активированных углей неорганический сорбент глауконит гранулированный (Гл-Гр-1) обладает лучшими эксплуатационными показателями. Он регулирует кислотность и жесткость воды любого состава, не требует дополнительных затрат по промывке оборудования и его перезагрузке.

Глауконит гранулированный (Гл-Гр-1) является высокоэффективным природным сорбентом из экологически чистого минерального сырья, добываемого в Челябинской области (Кунашакский район), для физико-химической очистки почвы и сточных вод.

Глауконит применяется в качестве сорбента тяжелых металлов, радионуклидов и нефтепродуктов при очистке сточных и оборотных вод, почв, подвергающихся техногенному загрязнению, в том числе обочин дорог, скверов и газонов, расположенных вблизи городских автомагистралей с интенсивным движением автотранспорта, а также предприятий нефтеперерабатывающей промышленности, нефтеперекачивающих станций, АЗС, авторемонтных комплексов.

Сорбционная способность глауконита по отношению к тяжелым металлам (свинец, медь, цинк, кадмий, хром, никель, железо, кобальт) до 80 %.

Глауконит обладает высокой емкостью к пиридину и нафтеновым кислотам, что позволяет использовать его как селективный сорбент при очистке нефтепродуктов (осветление моторного масла) от вредных примесей [3].

КФГМ-7 — керамический фильтрующий гранулированный материал, производства ООО «Экосервис», г. Смоленск [4]. Изготавливается из высококачественного каолина марки КАХ-2, обладающего уникальными свойствами после грануляции, дегидратации, специальной термической обработки. КФГМ-7 обладает высокой сорбционной емкостью при очистке тяжелых металлов, взвешенных веществ, а также отличается низкой истираемостью, при работе в фильтрах требует четкого соблюдения технологического использования.

Сохраняет сорбционные свойства на весь период работы в фильтрах. Сорбент обладает высокой прочностью. Регенерация загрузки предусматривает только водную промывку без дополнительных капитальных затрат [5].

Технические параметры рассмотренных сорбентов приведены в таблице [2–5].

Параметр	Адсорбент		
	«Глинт»	КФГМ-7/2,0 «Стандарт»	Глауконит гранулированный Гл-Гр-1
Внешний вид	Пористые гранулы серого или светло-коричневого цвета	Гранулы от белого, светло-серого до светло-розового цвета	Гранулы коричневого цвета, цилиндрической и сферической формы
Зерновой состав зернистого адсорбента	0,63...2,0 (содержание зерен более 2,0 мм — не более 5 % по массе, содержание зерен менее 0,63 мм — не более 10% по массе)	Гранулы диаметром до 2,0 мм гранулы длиной 2...5 мм (содержание зерен менее 0,63 мм — не более 1 % по массе)	Диаметр 1,5±0,5 мм Длина 1,5 ...2,8 мм
Объемная (насыпная) масса, г/см <sup>3</sup>	0,95...1,0	0,95	0,85...1,1
Пористость, % – максимальная – минимальная	65 45	65 50	➤ 50,0
Механическая прочность, % – измельчаемость – истираемость	Не более 0,5 Не более 5,0	Не более 0,4 Не более 2,0	Не более 1,0 Не более 0,5
Суммарная удельная эффективная активность естественных радионуклидов $A_{эф}$ , Бк/кг	Не более 250	—	—
Удельная рабочая поверхность, м <sup>2</sup> /г	100...120	120	180...200
Сорбционная емкость по ионам тяжелых металлов, кг/м <sup>3</sup> (масса катионов, удерживаемых 1 м <sup>3</sup> адсорбента за один фильтроцикл — между промывками)	Не менее 4,3	4,0	Не менее 3,9

Как следует из данных, приведенных в таблице, все сорбенты имеют сходные технические и технологические характеристики, поэтому необходимо проводить экспериментальные исследования в идентичных условиях, что позволит определить наиболее оптимальный сорбент. Правильный подбор и применение сорбентов могут значительно сократить расходы предприятия на плату за загрязнение окружающей среды.

### Литература

- [1] Бирмана Ю.А., Вурдова Н.Г., ред. *Инженерная защита окружающей среды. Очистка вод. Утилизация отходов*. Москва, Изд-во АСВ, 2002, 296 с.
- [2] Ерастова В.А., Киричевский Д.С., Новиков. М. Г. Алюмосиликатный сорбент «Глинт»- сорбент нового поколения. Инженерные системы. АВОК Северо-Запад, 2008, № 2, с. 23–24.
- [3] *Сорбент Глауколит*. URL: <http://glaukos.ru/site/index/product/sorbent/> (дата обращения 30.06.2015)
- [4] Щербаков А.В. Новая загрузка для сорбционных фильтров. *Экология производства*, 2014, № 8, с. 54–55.
- [5] *КФГМ-7 сорбент 21 века. Керамические сорбенты*. URL: <http://keram-sorbent.info/?q=node/3> (дата обращения 30.06.2015)

УДК 614.835.3

## Экспресс-метод определения частоты аварийных ситуаций на объектах, осуществляющих деятельность с использованием пожаровзрывоопасных веществ (на примере складов ГСМ ОАО «РЖД»)

© Невская Елена Евгеньевна<sup>1,2</sup>, Мартынюк Василий Филиппович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина

<sup>2</sup>ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности»

[el-gny@mail.ru](mailto:el-gny@mail.ru), [e.nevskaya@safety.ru](mailto:e.nevskaya@safety.ru)

*Работа посвящена разработке концепции и формализации основных принципов определения частоты аварийных ситуаций на объектах, осуществляющих деятельность с использованием пожаровзрывоопасных веществ, на примере топливных складов горюче-смазочных материалов ОАО «РЖД». Процедура оценки частоты аварий экспресс-методом сводится к нахождению среднего для конкретного типа вещества и рода деятельности показателя вероятности аварийной ситуации и соответствующих условиям рассматриваемого объекта поправочных коэффициентов.*

**Ключевые слова:** авария, экспресс-оценка, частота аварий, показатель аварийности, число вероятности, горючие жидкости, опасный производственный объект.

Экспресс-оценка риска аварий (полуколичественная оценка) разработана на основе подходов, предложенных в международном руководстве по классификации и приоритизации рисков, связанных с крупными авариями на объектах перерабатывающей и смежных отраслей промышленности [1]. Экспресс-оценка применяется в случаях отсутствия необходимой информации для проведения количественной оценки риска, а также для ранжирования опасных производственных объектов (ОПО) по степени опасности для принятия решений по обеспечению промышленной безопасности на примере складов горюче-смазочных материалов (ГСМ) ОАО «РЖД».

Чтобы вычислить частоту аварий ( $P_a$ ) с участием опасного вещества для каждого склада ГСМ необходимо определить ожидаемый показатель аварийности  $\lambda$  — число аварий в течение года на объекте конкретного типа, путем нахождения числа вероятности  $N_s$ .

Ожидаемый показатель аварийности в случае, если частота аварий на объекте определенного типа является функцией одного переменного, можно рассчитать по формуле

$$\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} P_a \rho(u) du,$$

где  $P_a$  — частота нежелательных событий на стационарном объекте;  $\rho(u)$  — плотность распределения объектов рассматриваемого типа относительно переменной  $u$ , характеризующей условия безопасности.

Пределы интегрирования  $(-\infty, +\infty)$  означают, что интегрирование происходит по всей области определения переменной  $u$ .

Для определения частоты нежелательных событий на стационарных объектах складов ГСМ расчет проводится для каждого типа вещества с учетом:

- отдельных операций, применяемых на объекте (погрузочно-разгрузочные работы);
- систем безопасности, используемых на объекте;
- организации и управления безопасностью.

Число вероятности  $N_s$  можно рассчитать по уравнению

$$N_s = N_s^* + n_1 + n_0 + n_p,$$

$N_s^*$  — базовый для конкретного типа вещества и рода деятельности показатель вероятности аварийной ситуации, определяется по табл. 1;  $n_1$  — поправка к числу вероятности на частоту погрузочно-разгрузочных операций, определяется по табл. 2;  $n_0$  — поправка, учитывающая организационно-управленческие аспекты обеспечения безопасности, определяется по табл. 3;  $n_p$  — поправка к числу вероятности на направление ветра в сторону обитаемых зон, определяется по табл. 4.

Таблица 1

Базовые показатели вероятности аварийной ситуации  $N_s^*$

Вид вещества	Род деятельности	
	Хранение	Использование
Взрывчатые вещества	7	6
Горючие жидкости:		
давление насыщенных паров менее 0,03 МПа при 20 °С	8	7
давление насыщенных паров более 0,03 МПа при 20 °С	7	6
Токсичные жидкости	5	4

Таблица 2

**Поправка на частоту погрузочно-разгрузочных операций ( $n_1$ )**

Частота погрузочно-разгрузочных операций (в год)	Поправка
1...10	+0,5
10...50	0
50...200	-1
200...500	-1,5
500...2000	-2

Таблица 3

**Поправка, учитывающая организационно-управленческие аспекты обеспечения безопасности ( $n_0$ )**

Уровень обеспечения безопасности	$n_0$
Выше среднеотраслевого уровня (наличие автоматических систем управления и противоаварийной защиты, быстродействующих запорных или отсекающих устройств с дистанционным управлением; наличие датчиков-сигнализаторов дозврывных концентраций);	+0,5
Среднеотраслевой уровень (обвалование вокруг резервуаров, наличие одного и более выездов на автомобильные дороги общей сети или на подъездные пути склада ГСМ, молниезащита, передвижные и стационарные средства пожаротушения)	0
Ниже среднеотраслевого уровня (отсутствие системы обвалования, выездов на автомобильные дороги)	-0,5
Неудовлетворительный уровень (отсутствие систем молниезащиты, передвижных и стационарных средств пожаротушения)	-1
Отсутствие мер по обеспечению безопасности	-1,5

Таблица 4

**Поправка к числу вероятности на направление ветра в сторону обитаемых зон**

Класс воздействия	Доля территории, на которой проживают люди, %				
	100	50	20	10	5
I	0	0	0	0	0
II	0	+0,5	+0,5	+0,5	+0,5

Существование переменной  $u$  характеризует условия безопасности, относительно которой плотность распределения объектов складов ГСМ имеет форму нормального закона распределения плотности вероятности со средним значением при  $u = 0$  и единичным среднеквадратичным отклонением ( $\sigma = 1$ ):

$$\rho(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right).$$

В рамках предлагаемой методики  $N_s$  определено как «число вероятности». Это число вероятности всегда связано со значением частоты  $P_a$ . Соотношение между ними имеет вид

$$N_s = |\log_{10} P_a|.$$



Результаты пересчета числа вероятности в частоту представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Пересчет числа вероятности ( $N_s$ ) в частоту ( $P_a$ , случаев в год)**

$N_s$	$P_a$	$N_s$	$P_a$	$N_s$	$P_a$
0	$1 \cdot 10^0$	5	$1 \cdot 10^{-5}$	10	$1 \cdot 10^{-10}$
0,5	$3 \cdot 10^{-1}$	5,5	$3 \cdot 10^{-6}$	10,5	$3 \cdot 10^{-11}$
1	$1 \cdot 10^{-1}$	6	$1 \cdot 10^{-6}$	11	$1 \cdot 10^{-11}$
1,5	$3 \cdot 10^{-2}$	6,5	$3 \cdot 10^{-7}$	11,5	$3 \cdot 10^{-12}$
2	$1 \cdot 10^{-2}$	7	$1 \cdot 10^{-7}$	12	$1 \cdot 10^{-12}$
2,5	$3 \cdot 10^{-3}$	7,5	$3 \cdot 10^{-8}$	12,5	$3 \cdot 10^{-13}$
3	$1 \cdot 10^{-3}$	8	$1 \cdot 10^{-8}$	13	$1 \cdot 10^{-13}$
3,5	$3 \cdot 10^{-4}$	8,5	$3 \cdot 10^{-9}$	13,5	$3 \cdot 10^{-14}$
4	$1 \cdot 10^{-4}$	9	$1 \cdot 10^{-9}$	14	$1 \cdot 10^{-14}$
4,5	$3 \cdot 10^{-5}$	9,5	$3 \cdot 10^{-10}$	14,5	$3 \cdot 10^{-15}$

Частота аварийных ситуаций в год на объекте склада ГСМ, полученная при использовании метода экспресс-оценки, может служить основанием для проведения более детальной количественной оценки риска аварий на ОПО, если принятие конкретных решений требует этого.

**Литература**

- [1] *Manual on the Classification and Prioritization of Risks Due to Major Accidents in Process and Related Industries*. IAEA, Vienna, 1993. IAEA-TECDOC-727.
- [2] Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. *Технический регламент о требованиях пожарной безопасности*.
- [3] Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» (утв. приказом Ростехнадзора от 13.05.2015 № 188).
- [4] Лисанов М.В., Ханин Е.В., Сумской С.И. О регулировании промышленной безопасности по количественным критериям допустимого риска. *Безопасность труда в промышленности*, 2012, № 12, с. 54–62.

УДК 378.091.398

## Проблемы подготовки выпускников вуза в области промышленной безопасности

© Николаева Надежда Ивановна, Семчук Николай Николаевич,  
Гладких Светлана Николаевна, Минина Елена Сергеевна,  
Минин Иван Леонидович, Зверькова Алена Игоревна

Россия, г. Великий Новгород, Новгородский государственный университет  
имени Ярослава Мудрого

[nni.54@mail.ru](mailto:nni.54@mail.ru)

*Статья посвящена раскрытию путей формирования компетенций промышленной безопасности в вузе на современном этапе. Авторами разработана модель формирования компетенций на примере компетенций промышленной безопасности. Структура модели включает подходы (межмодульный, контекстно-компетентностный, средней), цель, задачи, принципы, компоненты педагогической технологии (научно-исследовательский, образовательно-исследовательский, социально-организационный), средства, результат, долгосрочный прогноз. Данная модель может быть использована в практической деятельности как учителей, так и преподавателей вуза.*

**Ключевые слова:** модель формирования компетенций промышленной безопасности, современная образовательная технология, модульное обучение.

Особенностью подготовки выпускников вуза в области промышленной безопасности в современных условиях является необходимость в перестройке, которая обусловлена интегрированием России в мировую образовательную систему, что определяет перспективы экономического, культурного развития страны и ее безопасности. Стратегические цели профессионального образования направлены на решение проблем интеллектуализации общества, что особенно актуально при решении вопросов промышленной безопасности в предупреждении чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Понятия «профессионализм», «компетентность» и «профессиональная компетентность» даны в работе Е.А. Солодковой [1].

Поиск перспективных методологических решений приоритетов компетенций в области промышленной безопасности в производственных условиях является одной из актуальных задач системы профессионального образования, что нашло отражение в новых федеральных государственных образовательных стандартах.

Реализация задач промышленной безопасности через образовательный процесс актуальна и должна развиваться на научной основе [2]. Построение современной педагогической технологии по модульному принципу является новой формой обучения. При этом изменяется роль производственной практики, в процессе которой студентами усваивается междисциплинарная информация по промышленной безопасности.

Актуальность поднимаемой проблемы на научно-педагогическом уровне определяется недостаточной изученностью методологических вопросов совершенствования процесса формирования компетенций промышленной безопасности в высшем образовании.

Цель исследования — научно обосновать и доказать на практике эффективность разработанных путей совершенствования процесса формирования компетенций промышленной безопасности в вузе.

Методы исследования: теоретические (сравнительно-сопоставимый, моделирование); эмпирические (педагогический эксперимент, тестирование); наблюдательные (наблюдение), статистические. В контрольную группу входило 1 744 чел., в экспериментальную — 2 274 чел.

С новых позиций в работе рассмотрен концептуальный подход к решению данной проблемы, связанный с совершенствованием процесса обучения и разработкой обобщенных общекультурных и профессиональных компетенций, которые формируются через предметный модуль безопасности жизнедеятельности (БЖД).

Дидактический процесс формирования компетенций промышленной безопасности в работе связан с поиском новых методов, форм, моделей обучения, современных педагогических технологий, повышающих качество подготовки в профессиональном образовании.

Выпускник вуза приобретает новое качество, проявляющееся в способности применять компетенции промышленной безопасности в профессиональном, социальном и личностном контексте, что в совокупности имеет важное социально-экономическое и культурное значение.

Совершенствование педагогического процесса проявляется в том, что сконструирована, научно обоснована и внедрена в образовательный процесс модель формирования компетенций промышленной безопасности. Модель реализуется через современную педагогическую технологию модульного обучения, включающую образовательно-исследовательский, научно-исследовательский и социально-организационный компоненты.

Модель формирования компетенций промышленной безопасности построена с учетом основных законов диалектики, научной организации образовательного процесса, совокупность дидактических принципов.

С новых позиций рассмотрена организация и содержание существующей концепции [3]. Приоритетными являются квалификационный принцип, контекстно-компетентностный, межмодульный и средовой подходы к формированию компетенций промышленной безопасности в высшем образовании. Модель включает стратегический, тактический и оперативный уровни; целевой, методологический, организационно-педагогический, оценочно-результативный и прогностический компоненты [4].

Организационно-педагогический компонент модели включает: разработку перспективной педагогической технологии формирования компетенций промышленной безопасности, содержание, формы и методы, обеспечивающие активную образовательную и практическую деятельность студентов и преподавателей на этапе высшего образования, и дифференциацию организационных форм для специалистов на этапе дополнительного профессионального образования.

Ключевые компетенции промышленной безопасности, которые формируются в модуле БЖД:

- готовность к применению профессиональных знаний для минимизации негативных экологических последствий, а также к обеспечению безопасности и улучшению условий труда в сфере своей профессиональной деятельности;
- способность использовать правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и норм охраны труда;

- владение сознанием и риск-ориентированным мышлением, при котором вопросы безопасности и сохранения окружающей среды рассматриваются в качестве важнейших приоритетов жизни и деятельности человека, культуры профессиональной безопасности;

- способность идентифицировать опасности и оценивать риски в сфере своей профессиональной деятельности;

- владение основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий, военных действий.

Современная педагогическая технология модуля БЖД имеет актуализацию межпредметных связей 23 модулей. Система интеграции межмодульных связей должна быть управляемой, что возможно при структурировании рабочей программы по модульному принципу. Содержание каждого учебного элемента модуля может использоваться самостоятельно с учетом существующих взаимосвязей с другими учебными элементами модуля, что отражает интеграцию научных знаний данных модулей в совершенствование педагогического процесса формирования компетенций промышленной безопасности в высшем образовании.

Приоритетный принцип современной педагогической технологии — квалификационный, который интегрирует принципы научности, синергии (согласованности действий), вариативно-личностной организации обучения, творческого развития личности, способной генерировать нестандартные идеи через новые технические и научно-исследовательские решения с целью предупреждения ЧС.

Педагогическая технология с образовательно-исследовательским процессуальным компонентом направлена на поиск проблемы в области промышленной безопасности, развитие креативности — творческих способностей личности, готовой к созданию принципиально новых идей. В технологии использованы новые виды деятельности студентов — выполнение кейс-заданий.

Этапы технологии: разработка, выполнение, анализ кейс-задания, презентация решения и его защита, общая дискуссия, подведение итогов. Современная технология с научно-исследовательским процессуальным компонентом включает организационный, содержательный и аналитический этапы. Организационно-педагогический этап — это выбор проблемы, цели и предмета исследовательской работы в области промышленной безопасности, теоретическое обоснование ее проведения; формулирование гипотезы работы, определение критериев и способов проведения исследовательской работы. Весь процесс подготовки научно-исследовательских работ студентов (НИРС) основан на навыках и умениях работы с информационными технологиями.

Содержательно-процессуальный этап связан с отбором содержания исследовательской работы, проведением исследования, сбором информации.

Аналитико-корректирующий этап включает анализ полученных данных, сверку аналитического материала с целью, задачами и гипотезой исследования; коррекцию исследовательской работы, статистическую обработку материала, осмысление, аналитическое изложение материала и выводов с последующей публикацией результатов исследований.

Результатом эффективности данного метода обучения явилось то, что по итогам конкурса НИРС кафедры «Безопасность жизнедеятельности» с участием авторов работы заняла в 2010 и 2011 гг. 3-е место, в 2012 г. — 2-е место, в 2013 г. — 1-е место, в 2014 г. — 2-е место.

Перспективная педагогическая технология с социально-организационным процессуальным компонентом — это достижение уровня компетенции промышленной безопасности, обучение в сотрудничестве, обучение коммуникабельности.

Важной составляющей образовательного процесса в рамках технологии обучения промышленной безопасности является определение риска. В данной педагогической технологии в образовательный процесс включены новые виды деятельности студентов: выполнение электронных (письменных) эссе; изложение результатов самостоятельной подготовки материала по проблеме промышленной безопасности в аудитории сокурсников с подготовкой презентаций, участие в олимпиаде по БЖД, выступление на конференциях и др. Средствами достижения цели являются современные технические средства. Студентами разрабатывается анкета, проводится социологический опрос по актуальным проблемам социальной безопасности.

В работе использованы методы оценки качества формирования компетенций промышленной безопасности. Эффективность разработанной модели формирования компетенций промышленной безопасности проверялась по критерию усвоения материала и компетенций.

Уровень усвоения компетенций промышленной безопасности определялся по коэффициенту усвоения знаний и коэффициенту успешности  $Y$ .

Методическая система может считаться эффективной, если значение коэффициента успешности больше единицы. В нашем случае значение  $Y$  оказалось равным  $1,10...1,25$ .

Установлено, что процент допустимого искажения равен 10, процент ответственности равен по каждой компетенции промышленной безопасности 60.

В ходе исследования определен уровень выраженности компетенций, который определяли как отношение минимального уровня знаний в баллах к максимальному количеству баллов. Если оценка качества знаний  $Q_k$  меньше данного показателя, то считается, что компетенция не сформирована, если больше — компетенция сформирована.

Минимальный уровень выраженности компетенций (0,6) ниже показателя среднего значения качества знаний при традиционной технологии обучения, который равен  $0,732 \pm 0,044$  ( $p < 0,05$ ) и среднего значения качества знаний при современной технологии формирования компетенций промышленной безопасности, который равен  $0,852 \pm 0,044$  ( $p < 0,05$ ).

Установлено, что качество знаний  $Q_k > 0,6$ , значит, можно говорить о сформированности компетенций.

Полученные данные свидетельствуют о результативности применения современной образовательной технологии, так как 80...90 % студентов экспериментальных групп показали хорошие и отличные знания, в то время в контрольных группах этот показатель составлял только 69...79 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная модель формирования компетенций промышленной безопасности, реализованная через современную педагогическую технологию в модуле БЖД, может считаться эффективной, что доказывает совершенствование педагогического процесса.

## Литература

- [1] Солодкова Е.А. Формирование профессиональной компетентности педагогов при разработке программы отдельного учебного предмета, курса углубленного уровня. *Научное обеспечение*
-

- системы повышения квалификации кадров. Челябинск, Челябинский ин-т переподготовки и повышения квалификации работников образования, 2013, № 2 (15), с. 100–105.
- [2] Анищенко В.А., Барангулова С.М. Модель процесса формирования профессиональной компетентности студентов через научно-исследовательскую деятельность. *Казанская наука*, 2011, № 10, с. 255–258.
- [3] Девисилов В.А. О концепции национальной образовательной политики в области безопасности. *Безопасность в техносфере*, 2008, № 4, с. 4–58.
- [4] Николаева Н.И., Гуменюк В.И. Концептуальная модель качественно новой педагогической технологии формирования профессиональной компетентности в области безопасности на основе междисциплинарного подхода. *Современные проблемы науки и образования*, 2012, № 6. URL: [www.science-education.ru/106-7344](http://www.science-education.ru/106-7344) (дата обращения 30.06.2015).

УДК: 656:168.4:504 Экология и транспортные системы

## Повышение экологической безопасности и энергоэффективности транспортной системы региона (на примере Крымского федерального округа)

© Потапченко Тимур Дмитриевич, Трофименко Юрий Васильевич

Россия, г. Москва, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

[timurpotapchenko@mail.ru](mailto:timurpotapchenko@mail.ru), [ywtrofimenko@mail.ru](mailto:ywtrofimenko@mail.ru)

*Статья посвящена актуальной проблеме повышения эффективности использования территории полосы отвода автомобильной дороги для получения электроэнергии из возобновляемых энергоресурсов, а также проблеме повышения экологической безопасности и энергоэффективности транспортной системы региона (на примере Крымского федерального округа). В статье приведено обоснование необходимости использования полосы отвода автомобильной дороги под строительство гибридной ветро-солнечной системы для обеспечения инфраструктуры автомобильной дороги необходимой электроэнергией.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, полоса отвода, гибридная ветро-солнечная электрогенерирующая система, инфраструктура дороги, Крымский федеральный округ, возобновляемые энергоресурсы, энергоэффективность системы, экологическая эффективность системы.

Целью данной работы является комплексная оценка возможности использования территории полосы отвода автомобильной дороги для повышения энергоэффективности транспортной системы и экологической безопасности Крымского федерального округа. После присоединения Крыма к России возникли проблемы с электроснабжением полуострова, в связи с чем наблюдается острая нехватка электроэнергии.

В настоящее время Крымский федеральный округ производит 1 млн МВт в год электроэнергии, при этом потребляет 6 млн МВт в год (рис. 1), поэтому необходимы срочные меры по ликвидации энергодефицита. В то же время Крымский полуостров

богат ветро- и солнечными энергоресурсами, однако для их использования необходимо выделение больших территорий, что требует изъятия весьма ценных в сельскохозяйственном и рекреационном плане земель [1]. С другой стороны, предполагается реконструкция автомобильной сети региона с повышением пропускной способности и качества автомобильных дорог. Это потребует дополнительных энергозатрат (на дорожную инфраструктуру необходимо 376,6 тыс. МВт в год) и отчуждения территорий.

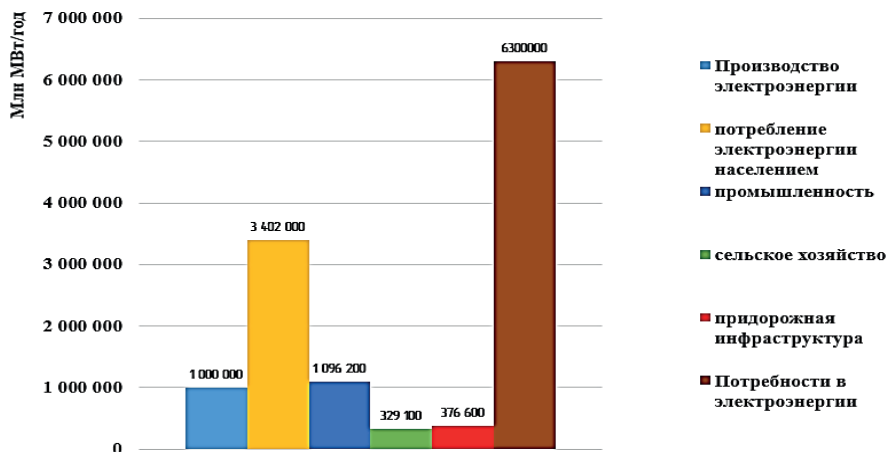
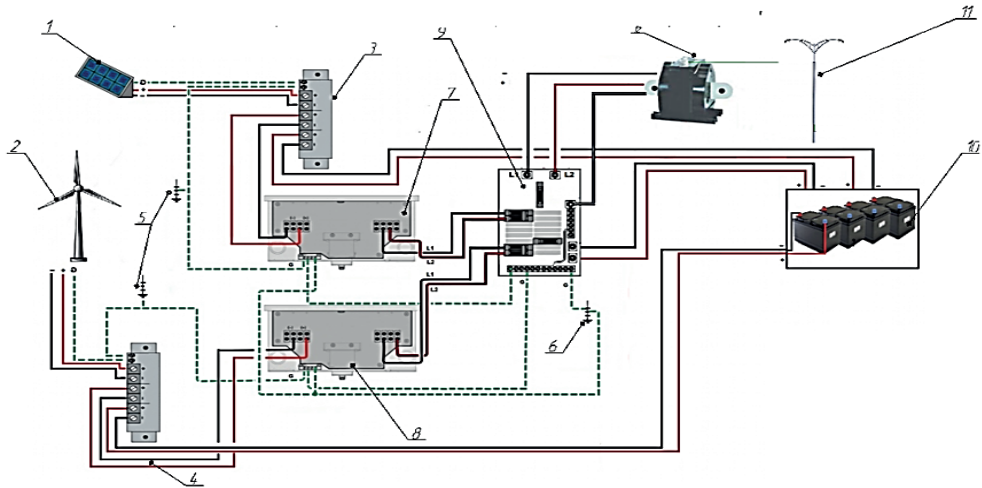


Рис. 1. Современное состояние энергетики Крымского федерального округа

В работе рассматривается проблема размещения в пределах полосы отвода автомобильной дороги (т. е. без изъятия дополнительных территорий) гибридной ветро-солнечной электрогенерирующей системы, которая будет производить электроэнергию, необходимую как для функционирования инфраструктуры дороги, так и для передачи внешним потребителям [2].

Для решения этой задачи (рис. 2) представлена схема гибридной ветро-солнечной электрогенерирующей системы, принцип работы которой заключается в следующем, на солнечную панель падает солнечный свет, фотоэлектрические элементы, из которых состоит панель, в результате фотоэлектрического эффекта производят электричество, которое поступает на регулятор заряда, защищающий от перезаряда или переразряда аккумуляторы, и затем направляет ток на инвертор для солнечной панели, который преобразует постоянное напряжение в переменное. От инвертора электроэнергия поступает на блок управления, где она распределяется к различным потребителям. Примерно такой же принцип получения электроэнергии от ветрогенератора. Таким образом, энергия солнечного света и ветра преобразуется в электрическую энергию, которая используется для обеспечения электроэнергией придорожной инфраструктуры и направляется внешним потребителям.

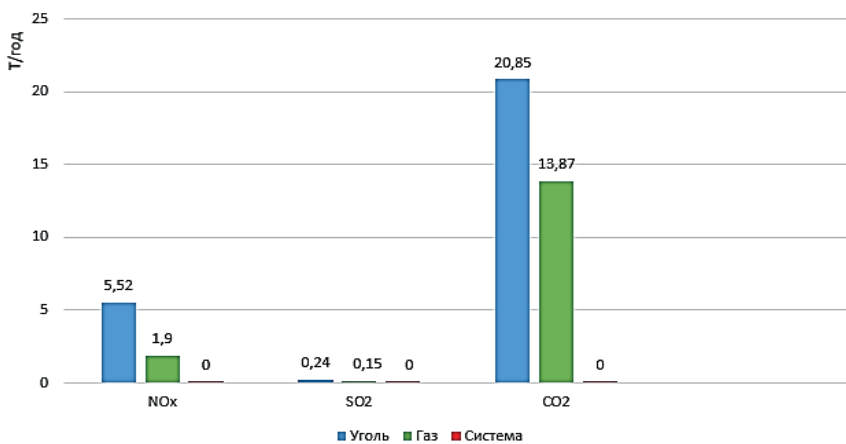
Важным показателем системы является ее энергоэффективность. Как показали предварительные расчеты, система на 1 км автомобильной дороги вырабатывает 395 тыс. МВт в год электроэнергии, при этом в год, инфраструктура дорог высших категорий на 1 км расходует 206 тыс. МВт в год электроэнергии, на основании чего можно сделать вывод о том, что система полностью обеспечивает потребности инфраструктуры автомобильной дороги в электроэнергии, при этом 189 тыс. МВт в год электроэнергии направляется внешнему потребителю [3].



**Рис. 2.** Схема гибридной ветро-солнечной системы:

1 — фотокаталитическая панель; 2 — ветрогенератор; 3 — регулятор заряда панелей; 4 — регулятор заряда ветрогенераторов; 5 — заземление для регуляторов заряда; 6 — заземление для панели управления; 7 — инвертор для панелей; 8 — инвертор для ветрогенераторов; 9 — контрольная панель; 10 — блок аккумуляторов; 11 — освещение; 12 — трансформатор

Для оценки экологической эффективности гибридной ветро-солнечной электрогенерирующей системы были проведены оценочные расчеты выбросов загрязняющих веществ при производстве эквивалентного количества электроэнергии на угольной и газовой ТЭС. Если бы 395,7 тыс. МВт в год электроэнергии были бы выработаны на угольной ТЭС, то суммарные выбросы загрязняющих веществ составили бы 26,6 тонн в год. Если бы 395,7 тыс. МВт в год электроэнергии выработалось на газовой ТЭС, то суммарные выбросы загрязняющих веществ составили бы 15,92 тонн в год (рис. 3). Таким образом, строительство гибридной ветро-солнечной электрогенерирующей системы позволит существенно сократить загрязнение атмосферы.



**Рис. 3.** Выбросы загрязняющих веществ при выработке эквивалентного уровня энергии при сжигании угля и природного газа



На основании представленной информации можно сделать вывод о том, что применение гибридной ветро-солнечной электрогенерирующей системы улучшит не только энергоэффективность транспортной сети региона, но приведет и к значительному повышению локальной и глобальной экологической безопасности.

### Литература

- [1] Зорин В.А., Даугелло В.А., Сверюгина Н.С. *Требования безопасности к наземным транспортным системам*. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009, 187 с.
- [2] Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. *Промышленно-транспортная экология*. Москва, Высш. шк., 2003, 273 с.
- [3] Бакатин Ю.П. *Экология*. Москва, Техполиграфцентр, 2008; 256 с.

УДК 614.75

## Исследование теоретических основ пожарной безопасности автогазозаправочных станций

© Свирепова Мария Сергеевна, Плуготаренко Нина Константиновна

Россия, г. Таганрог, Южный федеральный университет

[msvirepova@list.ru](mailto:msvirepova@list.ru)

*В работе проведен анализ пожарного риска автогазозаправочных станций. На основе результатов выполненного исследования для приведения проектируемой АГЗС к требуемому уровню пожарной безопасности разработаны дополнительные мероприятия, позволяющие компенсировать несоответствия в минимальных расстояниях и разместить технологическое оборудование АГЗС на отведенных площадях застройки, а также предложена схема управления пожарными рисками.*

**Ключевые слова:** *пожарная безопасность, чрезвычайные ситуации, окружающая среда, технологическое оборудование*

Вероятность возникновения природных и техногенных катастроф существенно возрастает с появлением крупных мегаполисов, ростом объемов хозяйственной деятельности, концентрацией крупных промышленных объектов и увеличением сложности производственных и технологических циклов [1].

Оценка рисков проводится в тех организациях вне зависимости от их принадлежности и организационно-правовых форм, функционирование которых представляет угрозу жизни и здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, государственному и муниципальному имуществу в случае возможности возникновения чрезвычайных ситуаций, в том числе обусловленных пожарами.

Анализ пожарного риска в зданиях можно рассматривать как процесс понимания и классификации пожарной опасности в здании и нежелательных последствий,

которые могут возникнуть в результате пожара, а также вероятность возникновения пожара.

В России существует устойчивая тенденция роста числа и тяжести последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, масштабы которых в ряде случаев таковы, что приводят к необратимым изменениям окружающей природной среды, сказываются на экономике и безопасности государства. Переход от концепции «абсолютной» безопасности к концепции «приемлемого» риска определил появление принципиально нового подхода к управлению развитию общества, состоящего в том, что удовлетворение материальных и духовных потребностей населения (качества жизни) должно осуществляться при соблюдении обязательного требования к обеспечению безопасности человека и окружающей его среды.

Управление риском представляет собой процесс достижения конституционно гарантированного уровня безопасности при одновременном формировании требующихся для этого экономических и социальных условий. В настоящее время сложилась достаточно сформированное направление в теории рисков, связанное с оценкой и управлением так называемыми техногенными рисками.

Технологическое оборудование объектов хранения и потребления горючих газов отличается повышенной пожарной опасностью, так как находится под постоянным давлением, что является объектом техногенного риска. Основная проблема обеспечения пожарной безопасности на АГЗС обусловливается высоким уровнем пожаров и аварий. Высокая вероятность возникновения пожара на АГЗС определяется частыми утечками топлива или его паров в местах наличия источника зажигания (выхлопная труба транспортного средства) [2].

Возникновение и развитие чрезвычайных ситуаций на АГЗС требует своевременной ликвидации, для чего необходимо рациональное управление силами и средствами. Основной целью является разработка схемы управления силами и средствами, привлекаемыми для ликвидации ЧС, произошедшей на территории АГЗС, находящейся в селебной зоне, вызванной взрывом газозоудшной смеси с последующим пожаром [3].

На основе результатов проводимой независимой оценки для приведения проектируемой АГЗС к требуемому уровню пожарной безопасности должны быть разработаны дополнительные мероприятия, позволяющие компенсировать несоответствия в минимальных расстояниях и разместить технологическое оборудование АГЗС на отведенных площадях застройки, а также предложена схема управления пожарными рисками.

## Литература

- [1] Hadjisophocleous G.V., Fu. Z. Literature Review of Fire Risk Assessment Methodologies. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 2004, vol. 6, Number 1, pp. 28–45.
- [2] Котляревский В.А., Кочетков К.Е., Носач А.А., Забегаев А.В. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация. Москва, АСВ, 1995, 320 с.
- [3] *Нормы пожарной безопасности НПБ 111–98* «Автозаправочные станции. Требования пожарной безопасности» (утв. приказом ГУГПС МВД РФ от 23 марта 1998 г. № 25). URL: <http://base.garant.ru/3923510/#ixzz33qjEWot1> <http://base.garant.ru/3923510/> (дата обращения 02.07.2014).

УДК 628.517.2

## Актуальные вопросы безопасности жизнедеятельности инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий

© Скуратовский Н.И.<sup>1</sup>, Сомов М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, Московский научно-исследовательский и проектный институт типологии, экспериментального проектирования

<sup>2</sup> Россия, Астраханской обл., г. Ахтубинск, Государственный летно-испытательный центр имени В.П. Чкалова

[niskskur@gmail.com](mailto:niskskur@gmail.com); [mishas09@rambler.ru](mailto:mishas09@rambler.ru)

*Рассмотрены актуальные вопросы безопасности жизнедеятельности инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий, включая характерные особенности авиационного шума, его влияние на окружающую среду и на работоспособность инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий. Подчеркнута насущная необходимость разработки фактически отсутствующих эффективных эргономичных индивидуальных и коллективных средств защиты человека от авиационного шума, учитывающих характерные особенности его спектра и экспозиции.*

**Ключевые слова:** транспортный шум, производственный шум, промышленный шум, авиационный шум, защита от шума, безопасность жизнедеятельности, эргономика.

**Введение.** Шум занимает ведущее место среди неблагоприятных факторов производственной среды, а его действие приводит к снижению работоспособности, увеличению общей и профессиональной заболеваемости. Проблемы изучения развития и профилактики шумовой патологии остаются актуальными и для авиации. Это обусловлено тем, что воздушные суда (ВС) и вспомогательное оборудование на авиационных объектах (аэродромы, авиаремонтные заводы, базы, полигоны) являются источниками высокоинтенсивного шума [1, 2]. Научно-технический прогресс, развитие и внедрение новых технологий ведут к модернизации существующих и созданию перспективных образцов авиационной техники. При этом происходит возрастание энерговооруженности летательных аппаратов, сопровождаемое увеличением риска неблагоприятного воздействия условий профессиональной деятельности на состояние здоровья обслуживающего персонала [3].

**Особенности авиационного шума.** Основным источником шума на рабочих местах инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий являются ВС [4]. Генерация шума происходит в результате работы основных и дополнительных авиационных двигателей, компрессоров, кондиционеров, а также корпуса планера во время полета. При подготовке ВС к полету, разбеге, взлете, наборе высоты доминирует шум двигателя, при крейсерском полете и посадке — аэродинамический шум, вызываемый обтеканием воздуха планера.

Анализ акустической обстановки на рабочих местах инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий позволяет выделить следующие особенности авиационного шума [5]:

- широкополосный характер шума, включая акустические колебания низко-, средне- и высокочастотного звукового диапазона;
- наличие инфразвуковой составляющей;
- уровни звукового давления, практически во всех октавных частотах превышающие 100 дБ, что позволяет классифицировать шум как высокоинтенсивный;
- спектр шума широкополосный с наличием нескольких максимумов;
- шумовое воздействие, которое носит циклический характер в течение летной смены, то есть периоды активной нагрузки чередуются с паузами от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Особенности авиационного шума обуславливают ряд проблем, которые необходимо учитывать при планировании развития авиационной техники и мест дислокации авиационных объектов [6, 7]:

- в большинстве развитых стран с каждым годом ужесточаются требования санитарных норм по шуму для рабочих мест и населения, что все больше входит в определенное противоречие с темпами развития авиационного транспорта и техническими возможностями по борьбе с шумами на авиационной технике с учетом обеспечения безопасности полетов;

- высокая энерговооруженность ВС и ряд тактико-технических требований к таким объектам вооружения и военной техники (высокая скорость и маневренность, преодоление больших расстояний и др.) не позволяют в полном объеме использовать существующие эффективные мероприятия по борьбе с шумами непосредственно в источниках, которые применяются в гражданской авиации;

- широкополосный характер авиационного шума, его высокая интенсивность и наличие инфразвука создают большие сложности по разработке эффективных средств защиты от шума;

- совершенствование ВС сопровождается увеличением времени предполетной подготовки и необходимостью использования вспомогательной техники, что приводит к увеличению акустической нагрузки на инженерно-технический состав авиатранспортных предприятий.

Таким образом, в ближайшие годы количество источников авиационного шума не только не уменьшится, а, вероятно, будет увеличиваться. Следовательно, инженерно-технический состав авиатранспортных предприятий на своих рабочих местах будет продолжать подвергаться высокой акустической нагрузке.

**Влияние на окружающую среду.** В последние годы отмечают увеличение количества и мощности антропогенных источников акустических колебаний, к которым относят наземный, воздушный и водный транспорт, шахтные вентиляторы, газо- и нефтепроводы [8]. Наличие в большинстве из указанных источников низких частот и инфразвука обуславливают их распространение на большие расстояния с незначительной потерей энергии.

Экологические аспекты воздействия акустических колебаний, в том числе и инфразвука, на окружающую природную среду исследовались в основном в связи с расширением сети автомагистралей, увеличением аэропортов и скорости полетов самолетов (звуковой удар). Тем не менее влияние шумового загрязнения на фауну при многих экологически опасных видах производственной деятельности изучено еще недостаточно. Во многом именно этим объясняется отсутствие федеральных

экологических нормативов и стандартов допустимого акустического загрязнения окружающей среды. Между тем снижение уровней шума и инфразвука, возникающих при эксплуатации крупных и протяженных технологических объектов, до природных (фоновых) значений следует рассматривать как одно из важных направлений природоохранной деятельности [9].

**Влияние шума на работоспособность инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий.** Проведенные исследования показали, что длительное действие авиационного шума способно вызывать у человека целый комплекс преимущественно неприятных субъективных ощущений. В большинстве случаев это проявлялось наличием жалоб на головную боль, головокружение, тошноту, ощущение дискомфорта, нервозность, утомление, нарушение сна, ухудшение слуха [2, 4].

Воздействие шума приводит к снижению функциональной надежности профессиональной деятельности [6, 8]. Установлено, что в особо неблагоприятной шумовой обстановке выполняют задачи профессиональной деятельности специалисты инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий, принимающие участие в обслуживании самолетов при прогонке и регулировке двигателей и находящиеся в ближнем звуковом поле. Это обстоятельство является причиной ряда авиационных инцидентов, происходящих вследствие ошибочных действий инженерно-технического состава, обусловленных снижением их работоспособности вследствие некомпенсированного влияния авиационного шума.

Поэтому актуальной является задача гигиенической нормализации условий труда инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий, а при невозможности ее решения необходимо обеспечение личного состава эффективными средствами защиты от шума (коллективными и индивидуальными) [8–10].

**Заключение.** Анализ работ, посвященных изучению авиационного шума, позволяет выделить его экологическую, гигиеническую, клиническую и социальную значимость и рассматривать в качестве ведущего физического вредного фактора, неблагоприятно влияющего на организм инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий, способствующего развитию профессиональной и профессионально обусловленной патологии, увеличению хронических заболеваний и снижению профессионального долголетия.

## Литература

- [1] Богомолов А.В., Драган С.П. Автоматизированный мониторинг и технологии обеспечения акустической безопасности персонала. *Автоматизация. Современные технологии*, 2015, № 4, с. 25–30.
- [2] Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А. Автоматизация персонифицированного мониторинга условий труда. *Автоматизация. Современные технологии*, 2015, № 3, с. 6–8.
- [3] Богомолов А.В., Скуратовский Н.И., Драган С.П., Сомов М.В. Методика эргономической экспертизы противозумных наушников. *Инженерный вестник*, 2013, № 9, с. 8.
- [4] Зинкин В.Н., Ахметзянов И.М., Солдатов С.К., Богомолов А.В. Медико-биологическая оценка эффективности средств индивидуальной защиты от шума // *Медицина труда и промышленная экология*, 2011, № 4, с. 33, 34.
- [5] Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Драган С.П. Актуальные проблемы защиты населения от низкочастотного шума и инфразвука. *Технологии гражданской безопасности*, 2015, т. 12, № 1, с. 90–96.
- [6] Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А., Ахметзянов И.М., Шешегов П.М. Риски здоровью, обусловленные кумулятивным действием авиационного шума, и

- мероприятия по борьбе с ним. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*, 2011, № 1, с. 80–88.
- [7] Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Кукушкин Ю.А., Ахметзянов И.М., Шешегов П.М. Авиационный шум как фактор эколого-социального неблагополучия. *Проблемы безопасности полетов*, 2010, № 10, с. 3–13.
- [8] Солдатов С.К., Кукушкин Ю.А., Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Кирий С.В., Шешегов П.М., Шишкин О.Ю., Казачков В.В. Методическое обеспечение оценивания и прогнозирования работоспособности операторов, подвергающихся воздействию авиационного шума. *Безопасность жизнедеятельности*, 2006, № 4, с. 11–20.
- [9] Солдатов С.К., Скуратовский Н.И. Инженерно-технические аспекты эволюции средств защиты от авиационного шума. *Технологии техносферной безопасности*, 2013, № 6 (52), с. 23.
- [10] Щербаков С.А., Кукушкин Ю.А., Солдатов С.К., Богомолов А.В., Зинкин В.Н., Шишов А.А., Кирий С.В. Методическое обеспечение и результаты исследования акустической обстановки на рабочих местах специалистов, подвергающихся воздействию авиационного шума. *Биомедицинская радиоэлектроника*, 2007, № 12, с. 21–27.

УДК 629.735

## **Снижение воздействия на почву нефтепродуктов на месте падения воздушного судна**

**© Старков Евгений Юрьевич, Климов Павел Игоревич,  
Николайкин Николай Иванович**

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
гражданской авиации

[starkoff89@mail.ru](mailto:starkoff89@mail.ru), [klimovpavel.rm@gmail.com](mailto:klimovpavel.rm@gmail.com)

*Предложено рассматривать авиационные события в гражданской авиации не только как прямую угрозу человеческой жизни, а и с позиции воздействия на окружающую среду. Приведены все виды воздействия на окружающую среду от авиационных происшествий и выбрано одно из самых негативных воздействий — разлив нефтепродуктов на территории падения воздушного судна. Предложены мероприятия по решению этой проблемы после проведенных работ по расследованию случившегося события.*

**Ключевые слова:** авиационное событие, авиационное происшествие, окружающая среда, рекультивация, воздушное судно.

Современная гражданская авиация развивается стремительными темпами. Кажется, что совсем недавно воздушный транспорт во всей отрасли занимал второстепенные роли по сравнению с другими видами, а уже сейчас невозможно представить современный мир без гражданской авиации. В Российской Федерации, как и в других развитых странах, транспорт — одна из крупнейших базовых отраслей хозяйства, важнейшая составная часть производственной и социальной инфраструктуры. Именно гражданская авиация является одним из связующих элементов территориальной

целостности страны. Одно из основных преимуществ воздушного транспорта заключается в том, что не требуется строительство магистральных сооружений: дорог, мостов, туннелей; достаточно наличия аэродромов и аэропортов в начальной и конечной точках трассы. Это дает большую экономию капитальных вложений, а также чрезвычайно важно для освоения новых районов и территорий при их вовлечении в мировой товарооборот [1].

В последние годы гражданская авиация переживает рост объемов своей деятельности. Постоянное развитие и совершенствование технологий воздушного транспорта могут повлиять на увеличение сбоев в работе, последствия которых приводят к неожиданным отрицательным последствиям. Гражданская авиация — транспорт высокого уровня опасности, поэтому обеспечение безопасности полетов является главной задачей эксплуатантов воздушного транспорта, основным показателем качества деятельности гражданской авиации. Несмотря на все принятые мероприятия, связанные с безопасностью полетов, в работе авиатехники происходят отклонения от нормы, следствием которых являются авиационные события (АС), такие как авиационные происшествия (АП), авиационные инциденты, производственные происшествия.

Благодаря грамотной стратегии развития воздушного флота, направленной на обеспечение безопасности число АС за последние 20 лет удалось заметно снизить (рис. 1), но число человеческих жертв остается примерно на одном уровне (рис. 2).

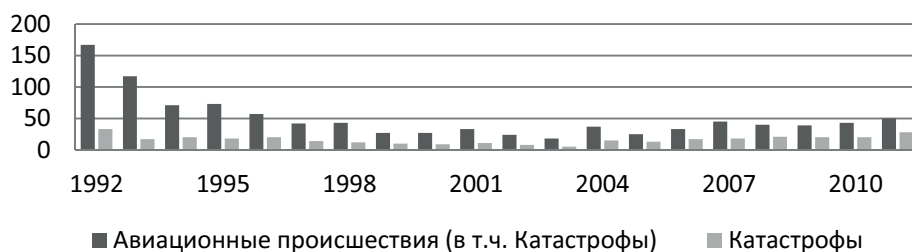


Рис. 1. Абсолютные показатели аварийности в ГА стран СНГ за период 1992–2011 гг.

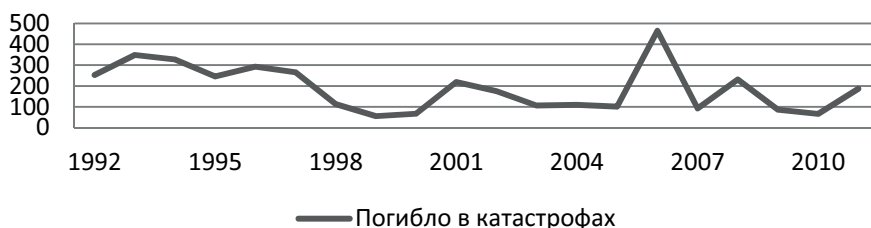


Рис. 2. Число погибших в катастрофах с воздушными судами гражданской авиации за период 1992–2011 гг.

Первое, что связано с авиационными событиями, а именно с катастрофой, это человеческие жизни. Действительно, воздушный транспорт может представлять угрозу для здоровья людей, но не стоит забывать, что наряду с гибелью пассажиров, персонала, экипажа оказывается мощное негативное воздействие на окружающую среду (ОС), носящее аварийно-залповый характер [2].

Практически полная неопределенность места и времени возникновения АС является одной из характеристик негативного воздействия на ОС наряду с объемами этого аварийно-залпового загрязнения. Одной из главных проблем последствий АС в сфере воздействия на ОС является то, что помимо прямого ущерба, который выражается в физическом, биологическом, химическом и информационном воздействии непосредственно от воздушного судна, присутствует и косвенный. Косвенный ущерб основан на действиях, связанных условиями, которые создало АС (поиск и спасание, расследование, ликвидация последствий АС). Место авиационного события обуславливается тем, что в пределах этой территории уровень влияния отрицательных факторов на окружающую среду превышает допустимые значения.

Из множества отрицательных факторов в данной работе выделено химическое загрязнение почвы нефтепродуктами, как наиболее опасного элемента для ОС. Анализ данного загрязнения сложен, так как необходимо учитывать количество и вид нефтепродуктов, находившихся в воздушном судне, экологическую ситуацию района, на котором произошло АС, значимость почв, характер падения ВС.

Опасность углеводородов нефтепродуктов как загрязнителей окружающей среды обусловлена не только биохимической активностью, но и чрезвычайной подвижностью жидких и газообразных углеводородов, способствующих их распространению далеко от источника загрязнения. Распространению углеводородов сопутствуют такие явления, как смачивание и растекание, сорбция, фильтрация через пористые среды, диффузия и т. п. Еще одним отрицательным воздействием углеводородов нефтепродуктов является изменение свойств почв, в результате чего она на длительное время теряет агрофизические и агрохимические свойства. Основная причина этого — изменение водно-воздушного режима, определяющего плодородие почвы [3].

В современном мире применяют разные методы рекультивации почв (механические методы, физико-химические методы, химические методы, биологические методы), загрязненных нефтепродуктами. Одним из самых эффективных методов с экологической и экономической позиций является углеадсорбция. Он представлен в данной работе. Авиационное событие носит практически непредсказуемый характер по месту, времени и масштабам происшествия, а метод углеадсорбции очень гибок в применении и практически не имеет ограничений по температуре, составу почв и т. п. В качестве сорбентов-детоксикантов предлагается использовать промышленные гранулированные угли типа АГ.

Активные угли типа АГ обладают активно сорбирующими центрами катионно-анионного типа, в том числе с биологически необходимыми микроэлементами, включающими соединения меди, цинка, магния, марганца, бора, которые, высвобождаясь из пор в почвенный раствор, выполняют функцию незаменимой микроэлементной подкормки [4].

После того как комиссия по расследованию АП закончит серию мероприятий по расследованию причин случившегося события на месте происшествия, ликвидацией последствий начнет заниматься административная подкомиссия, которой для решения проблем, связанных с разливом нефтепродуктов на месте падения воздушного судна, необходимо выполнить некоторые этапы работ. Первый этап — первоначальное траншеирование по периметру места АП и закладки в них специальных рукавов, заполненных активным углем. На втором этапе разрабатывают карту загрязнений места АП, после чего определяют количество нефтепродуктов в загрязненной почве, которое измеряется ИКС и люминесцентно-капиллярными методами [5]. Рассчитать количество разлитого топлива можно по следующей формуле:



$$T_{\text{ост}} = T_{\text{max}} - Qt,$$

где  $T_{\text{ост}}$  — остаточное количество топлива в баках воздушного судна определенного типа на момент АП, кг;  $T_{\text{max}}$  — максимальный запас топлива в полных баках воздушного судна определенного типа согласно его летно-техническим характеристикам, кг;  $Q$  — часовой расход топлива воздушного судна определенного типа согласно его летно-техническим характеристикам, кг/ч;  $t$  — время, в течение которого ВС находилось в полете до момента авиационного происшествия, ч,

$$t = \tau_{\text{AC}} - \tau_0,$$

где  $\tau_0$  — время вылета воздушного судна из аэропорта отправления, ч. или мин;  $\tau_{\text{AC}}$  — время совершения авиационного происшествия, ч или мин.

Дальше рассчитывают количество нефтепродуктов, впитавшихся в почву, что зависит от нефтеемкости почвы, объема нефтенасыщенной почвы и объема нефтепродуктов, разлитых в результате АС. Это необходимо сделать для расчета концентрации нефтепродуктов в почве.

На следующем этапе вычисляют количество угля, необходимого для детоксикации почвы:

$$m_{\text{а.у}} = V_{\text{п}} \rho_{\text{п}} \frac{4K_{\text{нефть}}}{K_{\text{з ПДК}} \left( \frac{K_{\text{нефть}}}{K_1} - \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_2}{K_3} - \frac{K_3}{K_4} \right)},$$

где  $m_{\text{а.у}}$  — масса активного угля типа АГ, кг;  $V_{\text{п}}$  — объем нефтенасыщенной почвы, м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{п}}$  — плотность нефтенасыщенной почвы, кг/м<sup>3</sup>;  $K_{\text{з}}$  — заданная ПДК углеводородов нефти в почве, мг/кг;  $K_{\text{нефть}}$  — концентрация нефтепродуктов в почве, мг/кг;  $K_1$ – $K_4$  — концентрации нефтепродуктов при смешении проб загрязненной почвы с активным углем соответственно в пропорциях почва: АУ = 1:1; 1:2; 1:3; 1:4, мг/кг.

После получения результатов расчета количества сорбента, необходимого для угледсорбционной детоксикации почв, в почву с использованием специальной техники вносят активный уголь и ему подобные углеродные адсорбенты дозами  $m\text{А.У}/\text{га}$  (в зависимости от результатов расчета) с последующей их заделкой на глубину 10...15 см. Далее проводят комплекс мероприятий, направленных на возвращение зараженных земель в хозяйственное землепользование.

На заключительном этапе работ по ликвидации последствий от разлитого топлива в результате АП через 2–3 недели отбирают пробы и проводят новый качественно-количественный химический анализ. При достижении (по результатам анализа) необходимых норм (ПДК нефтепродуктов в почве) участок считают детоксицированным (очищенным) и оформляют необходимые итоговые документы.

Таким образом, АС являются угрозой для жизни людей и с экологической точки зрения. Предложенные в работе мероприятия необходимы для ликвидации последствий АП, так как современный мир находится в условиях экологических проблем и каждое воздействие на ОС может быть заключительным этапом перед началом экологической катастрофы.

## Литература

- [1] Николайкина Н.Е., Николайкин Н.И., Матягина А.М. *Промышленная экология. Инженерная защита биосферы от воздействия воздушного транспорта*. Москва, Академкнига, 2006, 240 с.
- [2] Николайкин Н.И., Старков Е.Ю. Актуальность изучения влияния авиационных происшествий на окружающую среду. *Международ. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы развития науки»*, Уфа, 2014, с. 125–132.
- [3] Мурзаков Б. Г. Экологическая биотехнология для комплекса (теория и практика). Москва, Изд-во Моск. ун-та, 2005, 200 с.;
- [4] Спиридонов Ю.Я., Шестаков В.Г., Мухин В.М. Восстановление плодородия почв, загрязненных техногенными веществами. *Научно-практический журнал «Агро XXI»*, 1999, № 12, 1999, с. 22–23.
- [5] Санитарные нормы СанПиН 42-128-4433-87. *Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почве* (утв. заместителем Главного государственного санитарно-врача СССР от 30 октября 1987 г. № 4433-87).

УДК 622.337.2

## Экологические проблемы добычи и использования сланцевого газа

© Султанов С.А., студент

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[samir.sultanov.insys@gmail.com](mailto:samir.sultanov.insys@gmail.com)

*Обозначены негативные экологические последствия, связанные с добычей и использованием сланцевого газа. Приведены основные вредные воздействия на окружающую среду в результате добычи сланцевого газа методом гидроразрыва пласта. Рассмотрены возможности повышения экологичности технологий добычи и совершенствования процессов очистки сланцевого газа от вредных примесей: соединений серы и жидких фракций. Приведена оценочная информация по запасам сланцевого газа в мире. Рассмотрены перспективы потребления сланцевого газа в США, в ряде европейских стран и в России.*

**Ключевые слова:** экологические проблемы, сланцевый газ, методы добычи, технологии сероочистки, перспективы потребления.

**Введение.** Сланцевый газ — это разновидность природного газа, хранящегося в виде небольших газовых образований в толще сланцевого слоя осадочной породы Земли, который встречается на всех континентах.

Сланцы представляют собой осадочные породы, прошедшие определенные стадии преобразования. Сначала происходит накопление рыхлых осадков — как правило, в водоемах. Самыми мощными отложениями являются озерно-болотные и морские прибрежные. С течением времени осадки уплотняются (литогенез), потом

происходит формирование (диагенез), далее порода преобразуется (катагенез). Заключительная стадия — метаморфизм. Таким образом из рыхлого песка образуется сначала песчаник, потом песчано-глинистый сланец и, наконец, гнейс [1].

Сказанное выше необходимо для понимания, в каких условиях появляется и хранится в природе сланцевый газ.

Из осадочной породы сланцевый газ, по большей части состоящий из метана, можно извлечь путем вскрытия больших площадей, используя технологии гидроразрыва пласта (ГРП) и пропанового крекинга (относительно экологически чистый метод добычи).

**Метод горизонтального бурения с применением технологии гидроразрыва пласта (ГРП).** Теоретическая база технологии гидроразрыва пласта была разработана в 1953 году академиком С.А. Христиановичем совместно с Ю.П. Желтовым в Институте нефти АН СССР [2].

Метод ГРП заключается в закачивании воды и около 90 различных химических элементов в пробуренную шахту по трубам к залежам газа. Данная смесь, химически прореагировав, приводит к ГРП, после чего в породе возникают микротрещины, в которые забиваются гранулы, не позволяющие трещине вновь сойтись. Далее данную смесь откачивают, а сланцевый газ под действием перепада давления по трубам выкачивают наружу.

В настоящее время процесс бурения при добыче сланцев проводят с помощью методики сейсмического моделирования 3D GEO, которая сочетает геологические исследования и последующую компьютерную обработку (картирование) (рис. 1) [3].

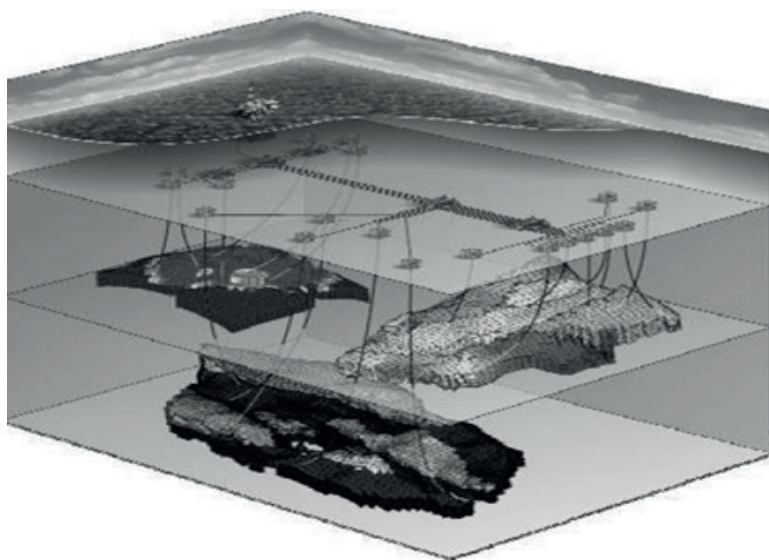


Рис. 1. Сейсмическое моделирование 3D GEO (ГРП)

Преобладающую роль при добыче сланцевого газа методом ГРП играет химическая смесь, используемая для гидроразрыва, содержащая около 90 токсичных веществ (бензол, толуол, уксусный ангидрид, соляная кислота, формальдегид, этиленгликоль метанол, ксилол, нафталин, серная кислота, бензил хлорид, кумол, свинец медь и др.), каждое из которых имеет свое предназначение. Основная про-

блема при использовании метода ГРП заключается в том, что сланцевый газ вместе с закачанными химикатами, который не удастся выкачать, начинает выходить на поверхность из недр, просачиваясь через почву, загрязняя грунтовые воды и плодородный слой. Кроме того, для добычи сланцевого газа методом ГРП необходимы большие запасы воды вблизи месторождений (для одного гидроразрыва используется смесь воды (7500 т) песка и химикатов). В результате вблизи месторождений скапливаются значительные объемы отработанной загрязненной воды. Всегда есть риск утечки токсичных жидкостей из прудов-отстойников, а также неконтролируемых фонтанных выбросов. Добыча сланцевого газа приводит к разрушению ландшафта, несет ущерб сельскохозяйственным посевам.

Затем загрязненные воды из отстойников утилизируют, закачивая их под землю, что может вызвать землетрясения. Подобные случаи были зарегистрированы в штатах Арканзас, Оклахома и Огайо в США. Землетрясения, в свою очередь, увеличивают вероятность утечек из скважин, в результате окружающий воздух загрязняется метаном и другими газами, следствием чего является усиление парникового эффекта.

**Метод пропанового фрекинга.** Вред от ГРП можно уменьшить путем применения технологии *пропанового фрекинга*. От ГРП он отличается тем, что вместо химической смеси к местам залежей сланцевого газа закачивается пропан, который полностью извлекается после гидроразрыва, поэтому загрязнять землю или воду он никак не может.

Сегодня в США и Канаде данный метод является наиболее перспективным. Крупные энергетические компании Chevron и BlackBrush Oil & Gas уже заключили соглашения о добыче сланцевого газа с использованием пропанового фрекинга. Однако специалисты выявили и отрицательную сторону данного метода: пропан крайне взрывоопасен [3].

У пропанового фрекинга есть еще один существенный минус, перечеркивающий всю его хваленую экологичность. Применение метода обходится в полтора раза дороже обычного гидроразрыва. Поэтому использовать подобную технологию можно только на месторождениях, имеющих высокую рентабельность.

Наиболее успешные сланцевые месторождения относятся к палеозойской и мезозойской эре, имеют высокий уровень гамма-излучения, который коррелирует с термической зрелостью сланцевого месторождения. В результате гидроразрыва радиация попадает в верхний слой осадочных пород, в районах сланцевой добычи газа наблюдается повышение радиационного фона [4].

**Потребительские свойства сланцевого газа.** Опыт США по добыче сланцевых газов показывает, что каждое месторождение требует индивидуального научного подхода и имеет совершенно уникальные геологические особенности, характеристики эксплуатации, проблемы добычи, а также уникальный химический состав газа. Существует совокупность геохимических параметров, которые определяют добычу сланцевого газа, его себестоимость и стоимость результирующего продукта. На себестоимость добычи существенное влияние оказывает содержание глины, которая поглощает энергию гидроразрыва, приводящую к увеличению объема используемых химикатов. Каждое месторождение имеет уникальный объем диоксида серы. Для очистки газа от серы на газсланцевых заводах выбран наиболее выгодный с экономической точки зрения способ очистки — двухступенчатая очистка: предварительное удаление сероводорода мокрым методом и тонкая очистка болотной рудой. Принципиальная схема практического применения предлагаемого способа заключается в следующем:

- влажная зола (сланцевых генераторов с сухим золоудалением или сланцевых топок) или сланцевый кокс (от камерных печей) обычным путем транспортируются к

аппаратам для поглощения углекислоты и сероводорода, в которых зола или кокс увлажняются до нужного предела и приводятся в тесное соприкосновение с очищаемым газом;

- в аппаратах происходит удаление из газа сероводорода и части углекислоты, после чего влажная зола направляется в отвал.

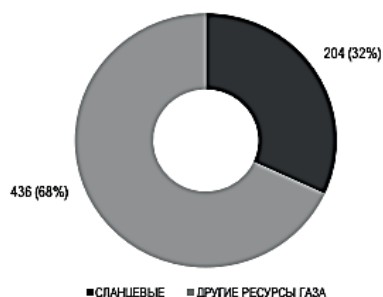
Предлагаемый способ эффективно удаляет диоксид серы, повышая тем самым энергетическую рентабельность.

**Перспективы использования сланцевого газа.** Россия — мировой лидер по доказанным газовым запасам, которые составляют 44,6 трлн м<sup>3</sup>, 21,4 % мировых запасов. Благодаря этому, а также благодаря низкой себестоимости добычи природного газа, наша страна на сегодняшний день является монополистом на газовом рынке. Однако ситуация в скором времени может кардинально измениться.

На сегодняшний день серьезную конкуренцию России на газовом рынке составляют производители сжиженного природного газа СПГ, США, Канада, Австралия, Норвегия и Катар. В результате в скором времени Россия рискует потерять свое лидирующее положение на мировом рынке газа. Согласно прогнозу МЭА, приведенному в исследовании «Золотые правила золотого века газа», доля российских и ближневосточных производителей газа на международном рынке к 2035 году упадет с нынешних 45 до 35 %. Россия при этой уступит лидерство США, на третьем месте будет Китай. Крупными экспортерами станут также Австралия и Канада.

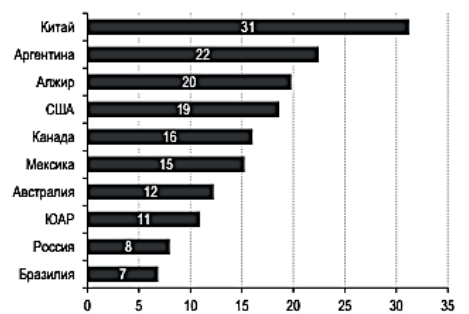
Россия находится на начальном этапе изучения вопроса о перспективах добычи газа сланцевых пород на своей территории. Предварительные оценки ресурсов сланцевого газа в РФ сильно расходятся и составляют от 20 до 200 трлн м<sup>3</sup>. В России сланцевый газ залегает в баженовской, абалакской, фроловской свитах — породах Западной Сибири. Эти породы обладают низкой проницаемостью, но высоко насыщены нефтью.

Мировые ресурсы газа, трлн. куб. м



Источник: EIA

Страны-лидеры по ресурсам сланцевого газа, трлн. куб. м



Источник: EIA

Факторы, ограничивающие разработку сланцевого газа по странам

СТРАНА	Факторы
Китай	Существуют большие проблемы с пресной водой (см. приложение — ограниченность ресурсов пресной воды), пока несовершенное лицензирование, регулируемые цены на газ (хотя и с исключениями, сделанными для сланцевого газа).
Аргентина	Практическое отсутствие буровых мощностей, ограниченный инвестиционный потенциал, связанный с необходимостью крупных вложений в газовую инфраструктуру.
Южная Африка	Недостаток буровых мощностей, ограниченное внутреннее потребление, слабый потенциал развития потребления в соседних регионах, большие ресурсы традиционного газа в регионе (Мозамбик).
Европа	Самые значительные ограничения, связанные с экологией и запретом на ГРП в ряде стран, лицензионные ограничения (землевладельцы в большинстве стран не имеют прав на недра), слабые перспективы роста энергопотребления в регионе при наличии путей доставки традиционных ресурсов из России, Африки, импорта СПГ.
Австралия	Ограниченные буровые мощности, наличие значительных традиционных ресурсов, географическая обособленность страны, делающая необходимым параллельное строительство терминалов СПГ, которые сразу делают добычу сланцевого газа менее рентабельной.

Рис. 2. Отчет EIA (2013) по запасам сланцевого газа в мире

Несмотря на большие запасы природного газа и угля в России нельзя игнорировать целесообразность изучения перспектив сланцевого газа с учетом прогнозных ресурсов, сконцентрированных в Западной и Восточной Сибири.

Согласно отчету ЕИА (2013) (рис. 2), мировые ресурсы газа составляют 641 трлн м<sup>3</sup>, 204 трлн м<sup>3</sup> (32 %) из которых залегают в сланцевых породах. Самыми богатыми по ресурсам сланцевого газа странами являются Китай, Аргентина, Алжир и США. На их долю приходится 45 % ресурсов сланцевого газа. Несмотря на это обилие ресурсов сланцевого газа и в других странах его активная добыча ведется только в США [5].

С учетом всех вышеприведенных фактов и негативных факторов, связанных с несовершенством технологии добычи и загрязнением окружающей среды, можно утверждать, что сланцевый газ все равно является наиболее перспективным энерго-ресурсом в долгосрочной перспективе.

### Литература

- [1] URL: <http://ecosalinon.com/energetika/osobennosti-tehnologii-dobychi-slancevogo-gaza.html> (дата обращения 01.06.2015).
- [2] Смольянинова С.С. Газ из сланцев: бессмысленно, бесполезно, губительно. *Академия*, 2014, № 8, С. 6–7.
- [3] Магомет Р.Д. Добыча сланцевого газа. *Записки Горного института*, Санкт-Петербург, 2014, т. 207, № 1, с. 125–130.
- [4] Лукин А.Е. Природа сланцевого газа в контексте проблем нефтегазовой литологии. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 2011, № 3, с. 70–85. URL [http://www.gazprombank.ru/upload/iblock/bb3/gpb\\_shale\\_gas\\_report.pdf](http://www.gazprombank.ru/upload/iblock/bb3/gpb_shale_gas_report.pdf) (дата обращения 08.06.2015).

УДК 628.339.066.1

## Исследование эффективности фильтрующего материала для очистки сточных вод от взвешенных веществ

© Тарасова Мария Олеговна, Козодаев Алексей Станиславович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[Mary.mgtu@gmail.com](mailto:Mary.mgtu@gmail.com)

*Статья посвящена очистке сточных вод от взвешенных веществ с помощью зернистых фильтров. В работе сформулированы требования к эффективным фильтрующим загрузкам. Исходя из требований, оценены наиболее распространенные фильтрующие загрузки и выбраны наиболее эффективные из них: кварцевый песок, сорбент ОДМ-2Ф, сорбент ас и Filter ag. Проведены экспериментальные исследования по оценке эффективности выбранных фильтрующих загрузок и их комбинаций. В экспериментах были поставлены задачи по задержанию и определению количества взвешенных веществ на поверхности беззольного фильтра после прохождения воды через фильтрующий материал.*

**Ключевые слова:** *фильтрация, поверхностный сток, фильтрующий материал, механический фильтр.*

В работе рассмотрена очистка поверхностного стока, содержащего опасные для водоемов загрязнения. Такой сток является весьма специфичным для разных территорий, однако в любой очищаемой воде присутствуют взвешенные вещества. В состав очистных сооружений поверхностного стока входят сооружения предварительной очистки (решетки, песколовки), сооружения основной очистки (отстойники, флотационные аппараты, узлы реагентной обработки) и оборудование доочистки (механические и сорбционные фильтры, УФ стерилизаторы). При эксплуатации очистных сооружений особого внимания требуют механические (зернистые) фильтры, так как они применяются для доочистки воды от взвешенных веществ. Фильтрующая загрузка — основной рабочий элемент механических фильтров, поэтому правильный выбор ее имеет первостепенное значение для нормальной работы очистных сооружений.

Основной задачей разработчиков технологии очистки является выбор наиболее эффективной фильтрующей загрузки.

В качестве основного фильтрующего материала на очистных сооружениях в настоящее время используется кварцевый песок. Однако в последнее время появилось много новых материалов, превосходящих песок по характеристикам. К сожалению, новые материалы широко не применяются из-за недостатка достоверных данных об их эффективности. Таким образом, экспериментальные исследования новых фильтрующих материалов и их комбинаций является актуальной задачей.

Допускается использовать в качестве фильтрующего материала кварцевый песок, гравий, гранитный щебень, гранулированный доменный шлак, антрацит, керамзит, полимеры [3], а также другие зернистые загрузки: Filter-ag, сорбент ас, цеолит, сорбент ОДМ-2Ф, гидроантрацит. Был рассмотрен каждый фильтрующий материал и выявлены его положительные и отрицательные стороны по разным критериям. Для оценки эффективности и выбора наиболее рациональных загрузок для фильтрации взвешенных веществ была составлена таблица (в статье не приведена).

Материалы, имеющие наибольшее количество положительных сторон, были отобраны для дальнейшего экспериментального исследования: сорбент ас, кварцевый песок, сорбент ОДМ-2Ф и Filter-ag.

В работе были поставлены задачи по задержанию и определению количества взвешенных веществ на поверхности беззольного фильтра после прохождения воды через фильтрующий материал.

Оборудование, которое использовалось в процессе эксперимента: фильтровальная колонка, колбы, беззольные фильтры, весы, фильтрующие загрузки. В начале эксперимента был создан модельный сток со свойствами, близкими к поверхностным сточным водам, после чего он был профильтрован через загрузки и комбинации загрузок (рис. 1).

Для сравнения концентрации взвешенных веществ в исходной и очищенной воде загрязненная вода была пропущена через беззольные фильтры. Это позволило провести оценку эффективности фильтрующего слоя.

Для более точного определения концентрации взвешенных веществ, оставшихся на фильтре, были сожжены беззольные фильтры, высушенные в одинаковых условиях, и в дальнейшем определен вес несгоревших загрязнений.

По формуле, представленной ниже, была рассчитана эффективность фильтрующего материала:

$$\Theta = \frac{C_{\text{вых}} - C_{\text{исх}}}{100},$$

где  $C_{\text{вых}}$ ,  $C_{\text{исх}}$  — концентрации взвешенных веществ после и до фильтрования.  
 Результаты эксперимента представлены на диаграмме (рис. 2).



Рис. 1. Процесс фильтрования

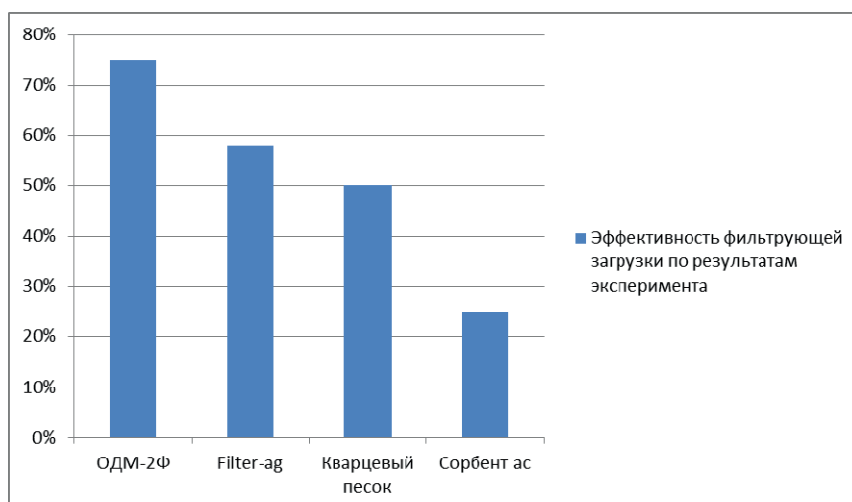


Рис. 2. Эффективность фильтрующих материалов по результатам эксперимента



Аналогично был проведен эксперимент по комбинированию фильтрующих материалов, результаты которого представлены на диаграмме (рис. 3).

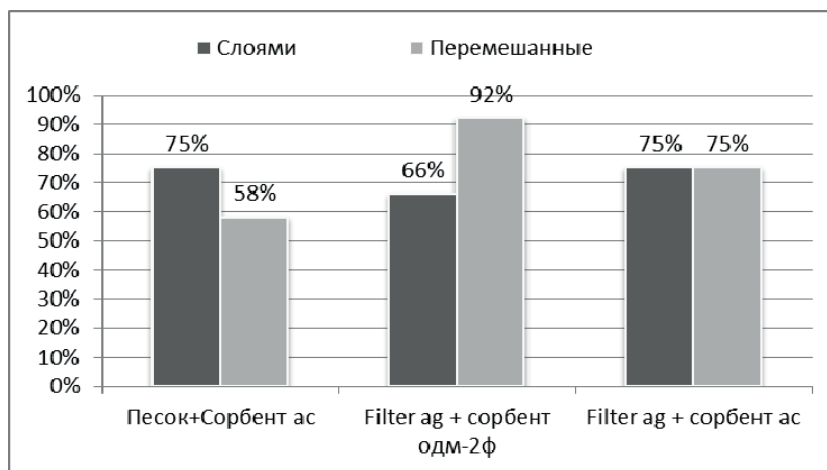


Рис. 3. Экспериментальные результаты определения эффективности комбинированных фильтрующих загрузок

По результатам проведенных экспериментов (см. рис. 2) был выявлен наиболее эффективный фильтрующий материал с наименьшей концентрацией взвешенных веществ после фильтрации. Это сорбент ОДМ-2Ф. Его эффективность составила 75 %. Этот результат можно объяснить тем, что сорбент ОДМ-2Ф по механической прочности значительно превосходит рассматриваемые материалы, обладает стабильными данными.

Впервые было проведено экспериментальное исследование комбинации современных фильтрующих материалов. Наиболее эффективной комбинированной загрузкой по результатам опыта стал Filter-ag + сорбент ОДМ-2Ф (перемешанные). Эффективность этой загрузки составила 92 %. Сорбент ОДМ-2Ф, как было уже сказано, был самым эффективным фильтрующим материалом, а Filter-ag, благодаря своим свойствам, например легкости, высокой грязеемкости, позволил добиться максимальной эффективности среди комбинированных загрузок.

### Литература

- [1] Фрог Б.Н., Левченко А.П. *Водоподготовка: учебное пособие для вузов*. Москва, Изд-во Моск. ун-та, 1996, 680 с.
- [2] Абрамов Н.Н. *Водоснабжение*. Москва, Стройиздат, 1974, 480 с.
- [3] СНиП 2.04.03–85. *Канализация. Наружные сети и сооружения: нормативно-технический материал*. Москва, 1986, 39 с.
- [4] СНиП 2.04.02–84. *Строительные нормы и правила водоснабжение. Наружные сети и сооружения: нормативно-технический материал*. Москва, 1984, 132 с.
- [5] Воронов Ю.В., Яковлев С.В. *Водоотведение и очистка сточных вод*. Москва, Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006, 704 с.
- [6] Рандольф Р. *Что делать со сточными водами*. Москва, Стройиздат, 1987, 120 с.

УДК 53.089.68, 543.08

## **Разработка методики измерений массовой концентрации табачной пыли в организованных источниках выбросов предприятий табачной отрасли**

© **Цесь Юлия Владимировна, Кустиков Юрий Анатольевич**

Россия, г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

[julchik-ces@rambler.ru](mailto:julchik-ces@rambler.ru)

*В работе рассмотрены анализаторы пыли, применяемые для контроля содержания взвешенных частиц в промышленных выбросах предприятий. Выполнен сравнительный анализ анализаторов пыли. Проведены исследования метрологических характеристик выбранного анализатора пыли на стендовом объекте и на реальном источнике выбросов. Разработана методика измерения массовой концентрации табачной пыли.*

**Ключевые слова:** промышленные выбросы, анализатор пыли, методика измерений, средства измерений, табачная пыль.

Охрана окружающей среды признана в настоящее время одной из главных государственных задач. Согласно Федеральному закону от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [1], «хозяйственная и иная деятельность органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, юридических и физических лиц, оказывающая воздействие на окружающую среду, должна осуществляться на основе следующих принципов:

- обеспечение благоприятных условий жизнедеятельности человека;
- охрана, воспроизводство и рациональное использование природных ресурсов как необходимые условия обеспечения благоприятной окружающей среды и экологической безопасности».

Однако в настоящее время число технологических процессов, связанных с приготовлением, применением и переработкой пылящих сыпучих материалов непрерывно возрастает. Пыль стала одной из наиболее распространенных вредных примесей как в атмосферном воздухе, так и в воздушной среде производственных помещений.

Цель работы заключалась в разработке методики измерений массовой концентрации табачной пыли анализатором FW 102 в выбросах табачных производств.

Задачи, которые необходимо было решить:

- 1) изучение нормативных документов, регламентирующих контроль промышленных выбросов;

- 2) анализ аппаратуры, применяемой для контроля взвешенных частиц в промышленных выбросах;

- 3) исследование метрологических характеристик анализатора пыли на испытательном стенде и реальном объекте;

- 4) разработка обобщенного алгоритма методики измерения массовой концентрации табачной пыли в выбросах табачных производств;

5) разработка текстового документа методики измерения массовой концентрации табачной пыли в источниках выбросов табачных предприятий с помощью анализатора FW 102.

Для контроля пылегазовых выбросов в промышленных условиях применяют следующие методы:

- 1) гравиметрический;
- 2) оптический;
- 3) трибоэлектрический;
- 4) электродинамический [2, 3].

В ходе работы был проведен сравнительный анализ аппаратуры, применяемой для контроля содержания взвешенных веществ в выбросах промышленных предприятий. Для исследований был выбран анализатор табачной пыли FW 102, так как он обладает наименьшей стоимостью из проанализированных, при этом требовалось оценить его возможности [4].

Основные этапы разработки методики измерений включали в себя:

- 1) выбор аппаратуры;
- 2) проведение исследований метрологических характеристик аппаратуры применительно к реальному объекту — табачной пыли:
  - а) стендовые исследования метрологических характеристик;
  - б) исследования метрологических характеристик на реальном источнике выбросов;
  - 3) разработка алгоритма методики и подготовка текстового документа методики измерений массовой концентрации табачной пыли.

Стендовые исследования проводились на базе ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Исследование метрологических характеристик анализатора включало в себя следующие этапы:

- 1) экспериментальное исследование погрешности результата измерения массовой концентрации при стабильном дисперсном составе аэрозоля;
- 2) оценка влияния дисперсного состава аэрозоля на показания анализатора FW 102;
- 3) влияние угла поворота датчика анализатора относительно оси трубопровода на показания анализатора;
- 4) оценка погрешности результата измерения массовой концентрации аэрозоля анализатором FW 102.

По данным, полученным в процессе исследования, сделаны следующие выводы.

1. Представленный на испытания анализатор FW 102 может использоваться для контроля выбросов при постоянном дисперсном составе пыли.

2. Обязательно проведение градуировки прибора и периодического контроля на источнике выбросов гравиметрическим методом или его аналогом, например, радиоизотопным анализатором массовой концентрации типа ДАСТ-1-Э, с погрешностью 10...12 %.

3. Нижний предел измерения анализатора FW 102 в лабораторных условиях при постоянном дисперсном составе пыли находится в пределах 0,7...1,0 мг/м<sup>3</sup>. Относительная погрешность измерения 20 %.

4. При исследовании метрологических характеристик анализатора FW 102 на реальном источнике выбросов ЗАО «Лиггетт-Дукат» следует выбирать источник, в котором среднее значение массовой концентрации табачной пыли не менее 0,7 мг/м<sup>3</sup>. Диаметр газохода не должен превышать 0,4 м.

Цель исследований метрологических характеристик на реальном объекте — исследование метрологических характеристик (МХ) устройства для измерения пыли — анализатора FW 102 фирмы Sick Maihak (Германия) на реальном источнике выбросов предприятия ЗАО «Лиггетт-Дукат».

В процессе работы были изучены нормативные документы, регламентирующие контроль промышленных выбросов на территории РФ, а также нормативные документы, регламентирующие контроль промышленных выбросов на территории ЕС.

Изучена аппаратура для контроля содержания взвешенных частиц в промышленных выбросах, проведен сравнительный анализ и осуществлен выбор анализатора пыли.

Проведены исследования метрологических характеристик анализатора на испытательном стенде и реальном объекте, выполнен анализ полученных результатов исследований.

Сформулированы требования и исходные данные для разработки методики измерений. Разработан обобщенный алгоритм методики измерений.

В соответствии с ГОСТ Р 8.563—96 «ГСИ. Методики выполнения измерений» разработан текстовый документ методики измерения массовой концентрации табачной пыли в источниках выбросов табачных предприятий с помощью анализатора FW 102 [5].

### Литература

- [1] Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ. *Об охране окружающей среды*.
- [2] Швыдкий В.С. *Очистка газов, справочное издание*. Москва, Машиностроение, 2001, 501 с.
- [3] Грин Х. *Аэрозоли — пыли, дымы и туманы*. Москва, Книга по требованию, 2012, 214 с.
- [4] Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. *Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности*. Санкт-Петербург, Химия, 1993, 320 с.
- [5] ГОСТ Р 8.563—96. *Методики выполнения измерений*.

УДК 628.31

## Двухступенчатый проточный флотатор для локальной очистки протоклов малого предприятия

© Чудакова Оксана Геннадьевна

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[oksiniyshka@mail.ru](mailto:oksiniyshka@mail.ru)

*Рассмотрена технологическая схема очистки сточных вод предприятия по оказанию транспортных услуг. Предложена схема, включающая в себя флотатор, насос с эжектором, сатуратор, скребковый механизм, мотор-редуктор, пульт управления с блоком автоматики. Повышение степени флотационной очистки достигается с помощью двухступенчатого проточного флотатора, имеющего две камеры флота-*

ции. Представленная конструкция очищает сточные воды от нефтепродуктов, взвешенных веществ, тяжелых металлов, поверхностно-активных веществ.

**Ключевые слова:** флотатор, проточный флотатор, сточные воды, промышленные стоки, очистка сточной воды, физико-химическая очистка, нефтепродукты, взвешенные вещества, тяжелые металлы, поверхностно-активных вещества.

Оборот воды на предприятиях необходим для полноценного его функционирования, так как она используется в холодильных установках для охлаждения оборудования или производимой продукции, в системе отопления в качестве теплоносителя, в различных промывочных ваннах, резервуарах, трубопроводах в технологическом процессе, а также для приготовления производственных растворов, уборки цехов и административных помещений, мойки автотранспорта.

Целесообразно воду на предприятиях использовать повторно в системе водоснабжения. В оборотной системе находится очищенная сточная вода, по своим показателям соответствующая нормативам. С такой водоподготовкой заметно уменьшается потребление воды из водоемов и водотоков [1].

На примере предприятия по оказанию транспортных услуг, в составе сточной воды которого присутствовали нефтепродукты, имелось большое содержание поверхностно-активных веществ, взвешенных веществ и тяжелых металлов.

Результаты расчета массы загрязняющих веществ, выносимых с территории предприятия по оказанию транспортных услуг, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Масса загрязняющих веществ

Наименование загрязняющего вещества	Концентрация загрязняющего вещества, мг/л			Масса сброса загрязняющего вещества с неорганизованным стоком, т/год
	Дождевые воды	Талые воды	Поливомоечные воды	
	$W_d = 1150,946 \text{ м}^3/\text{га}$	$W_m = 578,1 \text{ м}^3/\text{га}$	$W_n = 648 \text{ м}^3/\text{га}$	
Взвешенные вещества	250	3500	500	38,152167
Нефтепродукты	10	30	30	1,716848
БПКп	30	90	100	4,005978
ХПК	100	250	100	9,538042
Сульфаты	100	500	100	3,970524
Хлориды	200	1500	200	10,519691
Азот аммонийный	2	4,3	2	0,050014
Азот общий	4,9	10,5	4,9	0,122354
Нитраты	0,08	0,17	0,08	0,001990
Нитриты	0,08	0,17	0,08	0,001990
Кальций	43	113	43	1,181282
Магний	8	14	8	0,183552
Железо	0,3	1,7	0,3	0,012943
Медь	0,02	0,076	0,02	0,000676

Проблема очистки промышленных стоков приобретает все более серьезное значение, поскольку большинство очистных сооружений предприятий устарело и не в состоянии обеспечить качественную очистку стоков в соответствии с существующими нормативами. В настоящее время флотационные технологии получают все более широкое распространение [2].

Флотатор предназначен для флотационной очистки промышленных сточных вод предприятий нефтехимии, мясомолочной промышленности, предприятий, обслуживающих железнодорожный транспорт, масложировых производств, прачечных и других сточных вод, близких по составу загрязнений, от жиров, масел, взвешенных веществ, нефтепродуктов, органических примесей, ПАВ и других загрязнений. Обязательным требованием при очистке флотатором сточных вод, содержащих жиры, ПАВы и другие органические загрязнения, является требование их дальнейшей обработки на сооружениях биологической очистки. При очистке флотатором нефте-содержащих сточных вод рекомендуется проведение их последующей глубокой сорбционной очистки. Очистка сточных вод флотатором может осуществляться с применением различных химических реагентов (коагулянтов, флокулянтов) или без таковых в зависимости от типа очищаемых стоков и требований, предъявляемых к качеству их очистки. В зависимости от выбранной потребителем технологии обработки сточной воды флотатор может быть применен совместно с оборудованием для очистки стоков, использующим другие методы [3].

Конструкция флотатора (рис. 1) включает камеру смешения 1, емкость 2, насосный агрегат 3 с эжектором 4, сатуратор вертикального исполнения 5, скребковое колесо 6, мотор-редуктор 7, служащий для привода скребкового колеса, раму 8, пульт управления 41 с блоком автоматики 40.

Емкость флотатора 2 содержит цилиндрический корпус, переходящий в нижней части в усеченный конус 9. Кольцевое пространство между корпусом 2 и цилиндрической емкостью 10 образуют первую камеру флотации I. Вторая камера флотации II образована цилиндрической емкостью 10 с плоским дном.

Конусная часть 9 предназначена для отстаивания и сбора частиц тяжелых фракций загрязнений, оседающих в процессе движения сточной воды в первой камере флотации I. Внизу конусной части 9 расположена линия удаления осадка 12, в2, патрубков Г.

На наружной поверхности камеры смешения 1 имеется входной патрубок А с краном в1, на входе в емкость 2 — распределительный трубопровод 13. Ниже трубопровода 13 в емкости 1 установлены сопла 29а, б, служащие для ввода водовоздушной смеси, поступающей из верхней части сатуратора 5 по трубопроводу 28, и смешения ее с исходной сточной водой, поступающей из трубопровода 13.

В первой камере флотации I с противоположной стороны трубопровода 13 расположен заборный патрубок с фильтром 25, предназначенный для подачи очищаемой воды во всасывающую линию 26 насосного агрегата 3.

В центральной части второй камеры флотации II установлена вертикальная переливная труба 19 с оголовком 20. Переливная труба 19 обеспечивает перелив очищенной воды из нижней части камеры II в оголовок 20 и далее по трубопроводу 24 в переливной карман 14.

В кармане 14 на выходе трубопровода 24 имеется подвижная вертикальная переливная воронка 35, служащая для регулирования уровня воды во флотационной емкости. Через данную воронку вода переливается в карман 14 и через патрубок Б поступает на сброс.

Во второй камере флотации II установлена затопленная цилиндрическая перегородка 18, обеспечивающая восходяще-нисходящее движение воды. Первая I и вторая II камеры флотации имеют единый шламовый лоток 11 с патрубком В, через который отводится пенный продукт. Струйный эжектор 4, совмещенный с насосным агрегатом 3, обеспечивает введение в очищаемую жидкость атмосферного воздуха (через

клапан 2). Расход подаваемого воздуха регулируется дросселем 33. дополнительный клапан 3 на эжекторе 4 может быть использован для ввода раствора реагента для увеличения степени очистки воды.

Загрязненная вода из колодца или накопительной емкости подается погружным насосом через патрубок А в камеру смешения 1. Из камеры 1 стоки поступают по трубопроводу 13 в первую камеру флотации I. Ниже трубопровода 13 в первую камеру флотации I по трубопроводу 28 через сопла 29а,б поступает водовоздушная смесь от сатуратора 5.

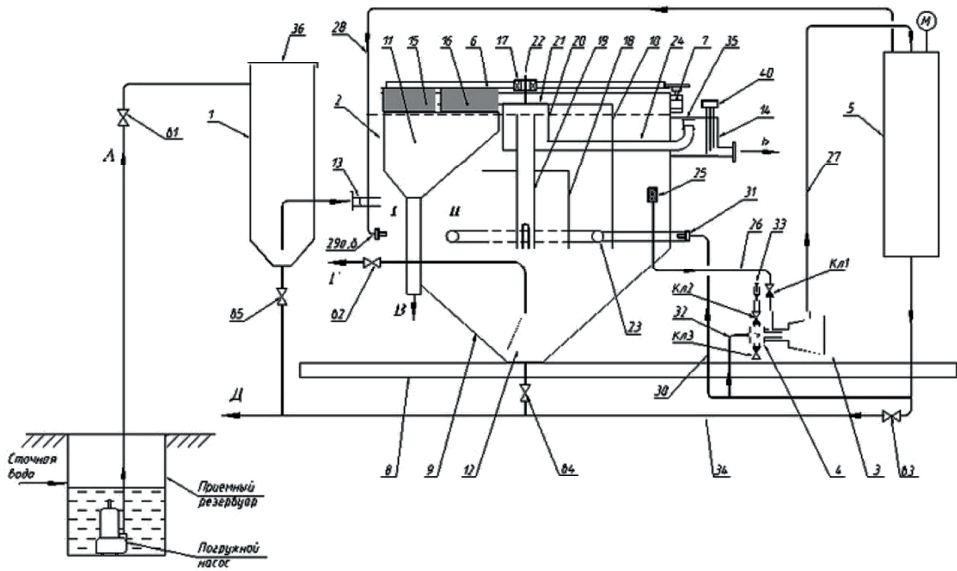


Рис. 1. Технологическая схема очистки сточных вод с двухступенчатым проточным флотатором

В первой камере флотации I очищаемая вода распределяется на два потока, обтекающих емкость 10. По мере движения воды от трубопровода 13 к заборному фильтру 25 в кольцевом пространстве происходит всплытие пузырьков воздуха вместе с прилипшими частицами загрязнений. Тяжелые частицы загрязнений оседают на дно первой камеры флотации I и собираются в конусе 9.

Предварительно очищенная вода через фильтр 25, трубопровод 26 и обратный клапан 1 поступает на насос 3 с установленным на входе эжектором 4. Рабочий поток на эжектор 4 поступает по трубопроводу 32 от сатуратора 5. В эжектор 4, через клапан 2 поступает атмосферный воздух. Клапан 3, установленный на эжекторе, может быть использован для дополнительного ввода растворов химических реагентов. Из насоса 3 по напорному трубопроводу 27 водовоздушная смесь подается в верхнюю часть сатуратора 5. Контроль давления в сатураторе осуществляется по манометру М.

В сатураторе 5 при повышенном давлении (0,5...0,6 МПа) происходит растворение воздуха в воде. Такая рабочая смесь из нижней части сатуратора 5 поступает по трубопроводу 30 через сопло 31 в распределительный коллектор 23 второй камеры флотации.

На выходе из сопла 31 происходит сброс давления, и из воды выделяется растворенный воздух в виде мельчайших пузырьков, которые захватывают частицы загрязнений и выносят их на поверхность. Поднимаясь от коллектора 23 вверх, очищенная вода проходит над перегородкой 18 и, перетекая вниз, поступает через отверстия, расположенные в нижней части переливной трубы 19, внутрь этой трубы к оголовку 20, откуда поступает по трубопроводу 24 через воронку 37 в переливной карман 14 и далее через патрубок Б на сброс.

Часть воды с избытком воздуха поступает из верхней части сатуратора 5 по трубопроводу 28 в трубопровод 13 через сопло 29, и далее на первую камеру флотации I.

Образующийся в процессе очистки воды пенный продукт, содержащий частицы загрязнений, удаляется с поверхности воды вращающимся скребковым колесом (шламоудалителем) 6 с помощью установленных на нем скребков 15 и 16, сбрасывается в шламовый лоток 11 и отводится через патрубок В специальную емкость.

### Литература

- [1] Кирсанов В.В., Чудакова О.Г. Технология и оборудование для обеззараживания промстоков. *Междунар. науч.-практ. конф. «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности»*, Казань, 2014, с. 376–378.
- [2] Алексеев Д.В., Николаев Н.А., Лаптев А.Г. *Комплексная очистка стоков промышленных предприятий методом струйной флотации*. Казань, КГТУ, 2005, 156 с.
- [3] Остапюк В.А. Технология очистки сточных вод флотацией с применением трубного сатуратора. *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2013, № S4 (13), с. 57–62.

УДК 628.31

## Проектирование метантенка для очистных сооружений с получением биогаза

© Чудакова Оксана Геннадьевна, Гаязова Зульфия Ирековна

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[oksiniyshka@mail.ru](mailto:oksiniyshka@mail.ru)

*Рассмотрена схема биологической очистки сточных вод после пивоваренного предприятия. Предложена схема, включающая в себя метантенк, в котором происходит сбраживание органического осадка. Образовавшийся биогаз из метантенка предложено очистить и использовать вторично.*

**Ключевые слова:** метантенк, биологическая очистка, сточные воды, промышленные стоки, очистка сточной воды, взвешенные вещества, органические остатки, осадок.



Экологическая обстановка и охрана водоемов от загрязнений требует постоянного совершенствования методов очистки сточных вод. Обработка и утилизация осадков является наиболее дорогостоящей и сложной технологией в работе комплексов по очистке сточных вод.

Города растут и благоустраиваются, промышленные предприятия развиваются и все это ведет к увеличению водопотребления. В связи с этим мощности существующих очистных сооружений и степень очистки сточных вод должны возрастать. Это приводит к постоянному увеличению массы осадков, выделяемых при очистке сточных вод.

Считают, что пищевые предприятия в силу специфики своей продукции не представляют заметной угрозы окружающей среде, но это не так. Поэтому очистка сточных вод, а в нашем случае обработка и утилизация осадков, важна [1].

Сточные воды пивоваренного предприятия загрязнены веществами исходного сырья, полуфабрикатов и дрожжевыми клетками. Основными показателями, по которым оценивается загрязненность сточных вод, являются: цвет, запах, реакция среды (рН), сухой остаток, содержание взвешенных частиц, биохимическое потребление кислорода (БПК), химическое потребление кислорода (ХПК).

Осадки сточных вод пивоваренного производства, образующиеся при промывке осадочных пивных жидких дрожжей, сбросе в канализацию лагерных осадков и мойке технологических емкостей, используемых на стадиях брожения и дображивания пива, являются одними из наиболее опасных для окружающей среды [2].

Из анализа очистных сооружений следует, что с учетом специфики проточка от пивоварни необходимо использовать метантенк с термофильным процессом сбраживания и внедрять его на очистные сооружения (рис. 1).

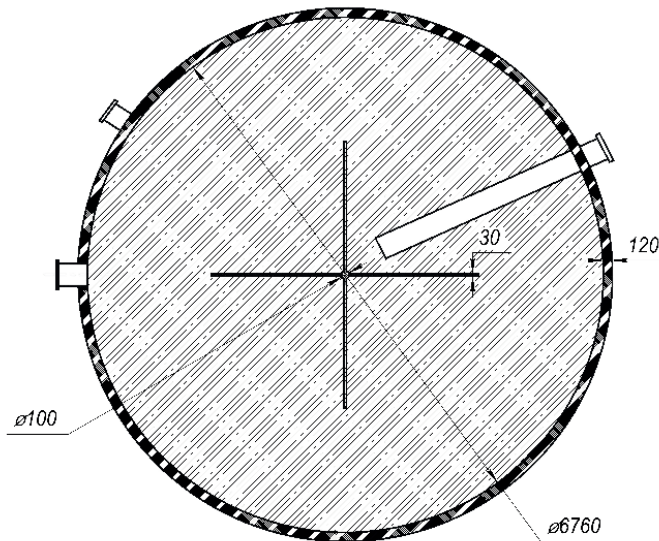


Рис 1. Метантенк с лопастными мешалками

Предполагаемая схема очистки сточных вод состоит из решеток, через которые проходит сточная вода и удаляется мусор, а также крупные механические включения.

Далее в первичном отстойнике происходит отделение легко осаждаемых взвесей и зооглейных бактерий. Усреднитель обеспечивает накопление и усреднение стока, предварительное биологическое добавление органических веществ, что способствует более эффективной дальнейшей обработке. В аэротенке сточная вода непрерывно перемешивается и аэрируется до насыщения кислородом воздуха. После чего вода поступает на вторичный осветлитель. Очищенная вода из осветлителя самотеком поступает на дезинфекцию бактерий (хлорирование). Активный ил после вторичного осветлителя поступает на илоуплотнитель.

Ключевым этапом такой схемы биологической очистки является метантенк (анаэробный реактор), где происходит обезвоживание осадков. Осадки после усреднителя, радиального отстойника и вторичного осветлителя поступают на горизонтальную центрифугу, где происходит разделение неоднородных систем. После этого суспензия поступает на гидроэлеватор и благодаря напору осадок поступает в метантенк. Сброженный осадок отводится из метантенка на иловые площадки и после подсушивания — на утилизацию. Горючий газ метан (биогаз), образующийся в процессе сбраживания осадка, отводится в газгольдер и далее может использоваться вторично, например, поступать в котельную или мини-ТЭЦ.

### Литература

- [1] Кирсанов В.В., Чудакова О.Г. О систематизации профилактической работы по повышению эффективности производственных систем опасных объектов. *Международ. науч.-практ. конф. «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности»*, Казань, 2014, с. 599–601.
- [2] Чудакова О.Г., Гаязова З.И. Эксплуатация метантенков в утилизации остатков от пивоваренных компаний. *Международ. науч.-практ. конф. «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности»*, Казань, 2014, с. 464–466.

УДК 629.735

## Анализ и совершенствование системы очистных сооружений сточных вод аэропорта

© Черепецкой Алексей Вадимович, Шипулин Юрий Александрович,  
Николайкин Николай Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
гражданской авиации

[Steam-9311@rambler.ru](mailto:Steam-9311@rambler.ru)

*Рассмотрен комплекс очистных сооружений. Их анализ показал несовершенство технологии очистки сточных вод и позволил представить более совершенные технологии очистки, которые могут быть применены и в других комплексах очистных*

сооружений аэропортов местного и международного значения и организаций страны в целом. Они могут повысить степень очистки сточных вод, используя небольшой бюджет на модернизацию.

**Ключевые слова:** адсорбция, сорбент, энергоемкость, адсорбционные показатели.

Водоснабжение аэропортов осуществляется из центральных систем водоснабжения, артезианских скважин. Водоотведение хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод осуществляется по линейным канализационным выпускам в основном в водоемы рыбохозяйственного назначения [1]. В статье показана возможность модернизации очистных сооружений.

Для очистки канализационных сточных вод в современных аэропортах используется многоступенчатая система очистных сооружений со степенью очистки сточных вод, соответствующей выполнению современных экологических требований.

Проведенный анализ результатов эксплуатации очистных сооружений показал невысокую эффективность блока фильтров доочистки, которые содержат наполнитель ОДМ-2Ф. Для повышения степени очистки блока фильтров доочистки возможно использование таких методов, как флотация, адсорбция, ионный обмен, обратный осмос, электрохимические методы. Теоретический анализ перечисленных методов показал, что наиболее целесообразно применение метода адсорбции, а именно очистка с помощью активных углей [2].

Активный уголь — материал с развитой пористой структурой, состоящий на 87...97 % (мас.) из углерода. Адсорбционную способность углей впервые заметили в конце XVIII века. Активные угли получают из разнообразного углеродсодержащего сырья: древесины, углей, полимеров, отходов пищевой промышленности, нефти [3].

По данным ряда проведенных экспериментов с активными углями, в работе было выяснено, что предъявляемым требованиям в наибольшей степени отвечают активные угли из антрацита и активные угли из растительных отходов. Анализ проведен по таким требованиям, как стоимость, адсорбционная активность и емкость по извлечению загрязняющих веществ, независимость от иностранных поставщиков адсорбентов.

Основываясь на проведенных испытаниях активных углей, авторы работы получили физико-химические показатели адсорбентов из антрацита и отходов растительного сырья, которые, как оказалось, примерно в 3 раза превосходят адсорбционные показатели сорбентов, традиционно использующихся в очистных сооружениях аэропортов.

Применение активных углей, получаемых из отходов растительного сырья и имеющих высокие адсорбционные показатели, одновременно решает проблему утилизации отходов растительного сырья. При этом активные угли из растительных отходов имеют высокие показатели механической прочности, что обеспечивает адсорбентам более долгие сроки службы.

Однако активные угли из антрацита, по сравнению с адсорбентами из растительного сырья обладают рядом преимуществ:

- очень высокими показателями адсорбционной способности;
- менее энергоемким производством, так как технологический регламент их получения включает всего четыре технологические операции;
- экономической выгодой применения по сравнению с остальными видами адсорбентов, так как запасы антрацита на территории РФ значительны — общее количество запасов в нашей стране около 34,5 млрд т.

В работе получены следующие результаты и выводы.

1. Анализ работы очистных сооружений аэропорта показал, что целесообразно повысить эффективность блока доочистки.

2. Наилучшим методом доочистки сточных вод аэропортов является метод угле-адсорбции.

3. Экспериментально получены физико-химические показатели адсорбентов для расчета оборудования.

4. В наибольшей степени предъявляемым требованиям отвечают два вида адсорбентов: из антрацита и из растительного сырья МЕКС-Т, характеристики которых превосходят показатели сорбентов, применяемых в аэропортах.

Предлагаемые для применения активные угли в 2–3 раза превосходят применяемый в настоящее время сорбент ОДМ-2Ф по следующим показателям:

- эффективности очистки сточных вод;
- удельный объем (компактности загрузки фильтров);
- стоимость.

Результаты работы показали, что в целом возможна замена пяти последовательно используемых аппаратов (фильтров) на два, что целесообразно рекомендовать для применения и в других очистных сооружениях аэропортов и организаций страны в целом.

#### Литература

- [1] Николайкина Н.Е., Николайкин Н.И., Матягина А.М. *Промышленная экология. Инженерная защита биосферы от воздействия воздушного транспорта*. Москва, Академкнига, 2006, 240 с.
- [2] Мухин В.М., Киреев С.Г., Сотникова Н.И. Получение и свойство активного угля из антрацита. XII *Всерос. угольное совещание «Инновационные направления изучения, оценки и эффективного использования минерально-сырьевой базы твердых горючих ископаемых» 27–29 апреля 2010 г.* Ростов-на-Дону, ВНИГРИУголь, 2010, с. 120–121.
- [3] Бутузова Л.Ф. Адсорбенты на основе природных углей. *Физико-химическая активация углей*. Сб. науч. тр. АН УССР. Ин-т физ.-орган. Химии.

УДК 621.039.58

## Особенности оценки риска объектов газораспределения на этапе проектирования

© Ямаева Эвелина Геннадиевна<sup>1</sup>, Фомина Екатерина Евгеньевна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, Московская обл., г. Подольск, дочернее ОАО «Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры» ОАО «Газпром»

<sup>2</sup> Россия, г. Москва, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина

[evelinamb078@gmail.com](mailto:evelinamb078@gmail.com)

*Повышение уровня промышленной безопасности объектов газораспределения является одной из важнейших задач общества, так как подземные распределительные газопроводы и пункты редуцирования газа находятся в непосредственной близости*

от населения. Решения по обеспечению промышленной безопасности таких объектов должны опираться на результаты оценки риска на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** газораспределение, проектирование, подземный газопровод, пункт редуцирования газа, оценка риска.

К объектам газораспределительной сети как технологического комплекса газораспределительной системы относятся:

- наружные распределительные газопроводы поселений от выходного отключающего устройства газораспределительной станции или иного источника газа до вводного газопровода к объекту газопотребления;
- наружные межпоселковые распределительные газопроводы от выходного отключающего устройства газораспределительной станции или иного источника газа до вводного газопровода к объекту газопотребления;
- газопроводы-вводы;
- внеплощадочные газопроводы промышленных предприятий;
- технические устройства распределительных газопроводов (запорная арматура, конденсатосборники, контрольно-измерительные приборы и автоматика, гидрозатворы, запорная арматура, контрольные трубки, отводы, компенсирующие устройства, фасонные части, устройства электрохимзащиты стальных газопроводов);
- пункты редуцирования газа (ПРГ);
- автоматизированные системы управления технологическим процессом распределения газа.

Объекты газораспределения относят к опасным производственным объектам (ОПО). С 2001 г. одним из направлений деятельности ОАО «Газпром» является газоснабжение и газификация регионов Российской Федерации.

С одной стороны, газификация России способствует снижению экономических затрат на обеспечение теплом населения и его безопасности, с другой — приносит новые опасности, связанные с повреждением оборудования объектов и развитием аварии. Повышение уровня промышленной безопасности таких объектов определяется эффективностью систем управления на действующих объектах, мероприятиями по обеспечению безопасности при проектировании, основанными на результатах анализа риска.

В соответствии с требованиями технического регламента [1] «...проектирование должно осуществляться с учетом оценки рисков аварий, пожарного риска, связанных с ними чрезвычайных ситуаций и иных неблагоприятных воздействий на людей, имущество физических и юридических лиц и окружающую среду при эксплуатации и ликвидации сетей газораспределения и газопотребления».

В настоящее время существуют нормативные документы, регламентирующие общие вопросы анализа риска ОПО. При этом для распределительных газопроводов и ПРГ отсутствует методика всесторонней оценки риска.

Оценку рисков объектов газораспределения на этапе проектирования рекомендуется проводить в процессе принятия основных технических, технологических и планировочных решений и установления срока безопасной эксплуатации объекта.

Оценку рисков объектов газораспределения (подземных газопроводов и ПРГ) при проектировании авторы предлагают провести посредством балльной оценки факторов влияния (конструктивно-технологических характеристик, особенностей

строительства, природных условий), что обеспечит принятие эффективных технических решений в проекте и, следовательно, последующую безопасную эксплуатацию.

В соответствии с действующими нормативными требованиями к проектированию и эксплуатации и анализом результатов исследований произошедших аварий, опубликованных в изданиях [2–4], в отчетах Ростехнадзора России [5] и в информационных бюллетенях [6], выделены группы факторов для подземных газопроводов и факторы для ПРГ, влияющих на безопасную эксплуатацию проектируемых объектов газораспределения.

*Примечание.* Для полиэтиленовых газопроводов отсутствует группа «Подземная коррозия».

Структуры факторов, влияющих на безопасную эксплуатацию подземных газопроводов и ПРГ соответственно, представлены на рис. 1 и 2.

Балльная оценка факторов предусматривает учет степени влияния каждого фактора на безопасность объекта. Каждому фактору соответствует шкала дискретных значений (балльно-факторная функция), отражающая возможный диапазон изменения фактора от «наихудшего» до «наилучшего» в зависимости от влияния на вероятность разгерметизации подземного газопровода или ПРГ.

Каждая группа и каждый фактор в группе характеризуются определенными относительными «вкладами» в аварийность объекта газораспределения (долями влияния), учитываемых с помощью весовых коэффициентов  $A_i$  ( $a_{ij}$ ) и  $A_g$ .

Фактическая балльная оценка ( $B$ ) анализируемого участка подземного газопровода проводится по формуле

$$B = \sum_{i=1}^k A_i \sum_{j=1}^{n(i)} a_{ij} B_{ij},$$

где  $k$  — число групп (для стальных газопроводов число групп  $k = 5$ , для полиэтиленовых  $k = 4$ );  $A_i$  — доля группы факторов, влияющих на безопасную эксплуатацию объекта;  $n(i)$  — число факторов в  $i$ -й группе;  $a_{ij}$  — доля  $j$ -го фактора в  $i$ -й группе;  $B_{ij}$  — балл, присвоенный  $j$ -му фактору в  $i$ -й группе.

Фактическая балльная оценка ( $B$ ) анализируемого ПРГ выполняется в соответствии с формулой

$$B = \sum_{g=1}^m A_g B_g,$$

где  $m$  — число факторов;  $A_g$  — доля  $g$ -го фактора, влияющего на безопасную эксплуатацию ПРГ;  $B_g$  — балл, присвоенный  $g$ -му фактору.

С целью унифицированного и формализованного подхода к учету влияния разнородных факторов на ожидаемую частоту аварий на подземном газопроводе и ПРГ диапазоны изменений «натуральных» значений разных факторов с помощью балльно-факторных функций преобразованы в 10-балльную шкалу. При этом 0 баллов соответствует наилучшему влиянию со стороны данного фактора на объект газораспределения, т. е. наименьшей вероятности нарушения его целостности, а 10 баллов — наихудшему влиянию, т. е. наибольшей вероятности нарушения его целостности.

Балльно-факторные функции определены экспертным методом с опорой на результаты анализа данных по аварийности на объектах газораспределения.

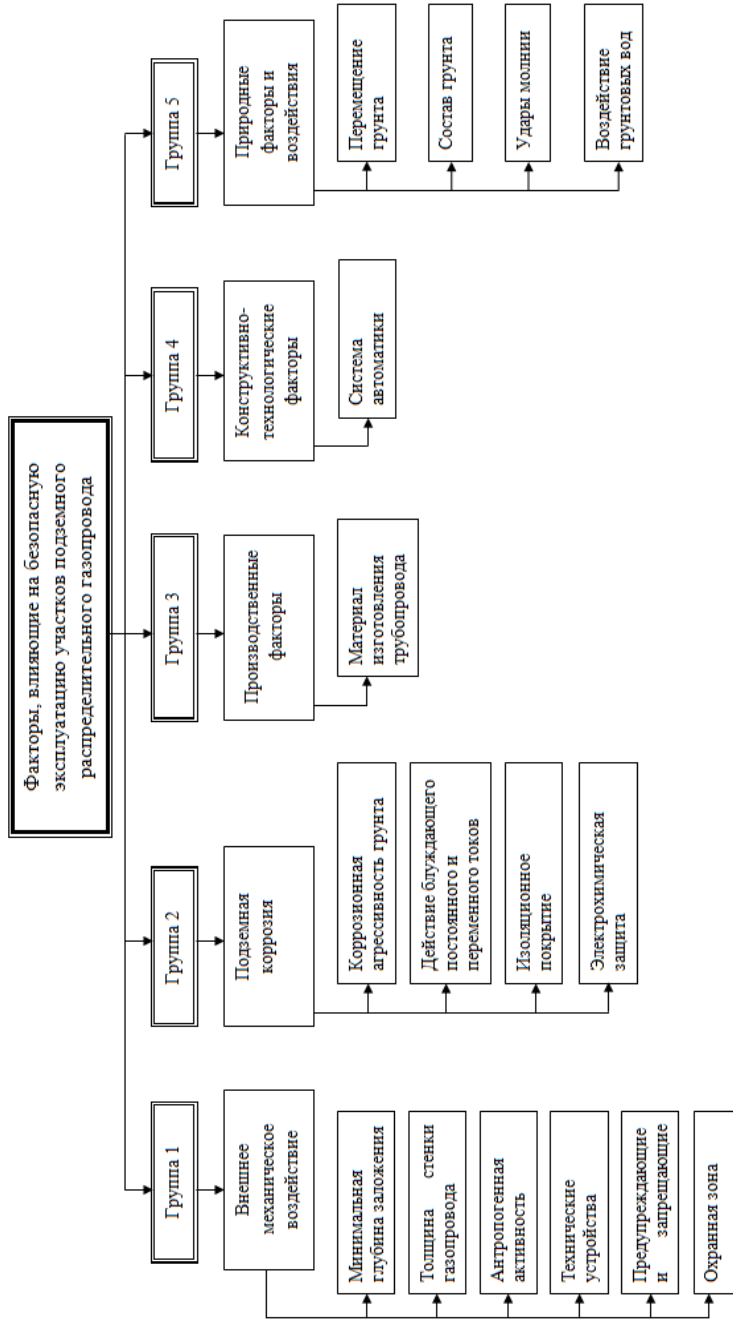
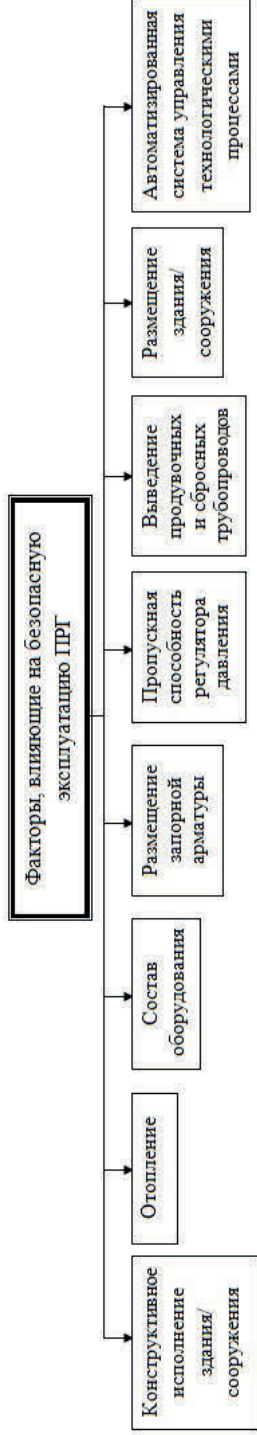


Рис. 1. Структура факторов, влияющих на безопасную эксплуатацию подземных газопроводов



**Рис. 2.** Структура факторов, влияющих на безопасную эксплуатацию ПРГ



Полученное значение фактической балльной оценки в дальнейшем используется при расчете ожидаемой частоты возникновения аварий на объекте газораспределения, что позволит на основе матрицы частота реализации — социальный ущерб, приведенной в СП 11-113-2002 [7], сделать вывод о приемлемости риска.

В случае если риск аварии на объекте газораспределения не превышает предельно допустимый уровень риска, предусматриваются мероприятия по поддержанию данного уровня риска, в противном случае необходимо внести в проект решения по его снижению.

Таким образом, посредством балльной оценки факторов влияния становится возможным количественная оценка принятых в проекте технических решений на предмет их эффективности и безопасности.

### Литература

- [1] *Технический регламент о безопасности сетей газораспределения и газопотребления* (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 29 октября 2010 г. № 870);
- [2] Красных Б.А., Мартынюк В.Ф., Сергиенко Т.С., Сорокин А.А., Феоктистов А.А., Нечаев А.С. *Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора*. Москва, ООО «Анализ опасностей», 2003, 320 с.
- [3] Прусенко Б.Е., Мартынюк В.Ф., ред. *Анализ аварий и несчастных случаев на трубопроводном транспорте*. Москва, ООО «Анализ опасностей», 2003, 349 с.
- [4] Прусенко Б.Е., Мартынюк В.Ф., ред. *Анализ аварий и несчастных случаев в нефтегазовом комплексе России*. Москва, ООО «Анализ опасностей», 2002, 308 с.
- [5] *Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору*. Москва, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2002–2013.
- [6] *Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору*. Москва, ЗАО НТЦ ПБ, 2002–2013.
- [7] Свод правил по проектированию и строительству СП 11-113-2002 «Порядок учета инженерно-технических мероприятий гражданской обороны и мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций при составлении ходатайства о намерениях инвестирования в строительство и обоснований инвестиций в строительство предприятий, зданий и сооружений».

УДК 629.78.05

## Нагрев волноводов в космических аппаратах связи при передаче СВЧ-сигналов на орбите

© Гоцелюк Ольга Борисовна, Новиков Евгений Сергеевич,  
Кудрявцев Игорь Владимирович

Россия, г. Красноярск, Сибирский федеральный университет

[kudrilya@rambler.ru](mailto:kudrilya@rambler.ru)

*Рассмотрено явление нагрева волноводов при передаче по ним СВЧ сигналов высокой мощности. Разработана расчетная схема и построена математическая модель нагрева с получением дифференциального уравнения теплового баланса волноводов в антенно-фидерных устройствах космического аппарата связи на этапе его эксплуатации на заданной орбите. Проведенные тепловые расчеты показывают необходимость учета СВЧ-нагрева на статическое и динамическое напряженно-деформированное состояние волноводов.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, антенно-фидерная система, волновод, СВЧ-сигнал, мощность, коэффициент потерь, скин-слой, нагрев.

В космических аппаратах (КА) волноводы служат для передачи электромагнитных сигналов СВЧ между антеннами и блоками связи. Современные требования по улучшению функционально-эксплуатационных параметров КА обуславливают необходимость повышения мощности передаваемых сигналов по его волноводно-распределительным системам (ВРС). При этом наземные испытания ВРС, проведенные в АО «ИСС», показали, что при передаче СВЧ-сигналов мощностью 10 кВт и выше происходит значительный нагрев волноводов. При эксплуатации КА на орбите передача сигналов высокой мощности происходит регулярно, следовательно, нагрев будет представлять собой дополнительное термоциклирование, которое необходимо учитывать в составе периодического нагрева от солнечного излучения и его влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) ВРС.

Ситуация осложняется тем, что возможности для рассеивания избыточного тепла в условиях открытого космоса весьма ограничены, особенно при негерметичном

исполнении КА, когда все его элементы и системы подвергаются воздействию солнечного излучения, а конвективный обмен практически отсутствует.

Проведенный обзор литературы [1–6] по данной проблеме показал, что все авторы игнорируют необходимость учета выделения тепла. Считаем, что такая ситуация является допустимой только для СВЧ-сигналов небольшой мощности, однако при передаче сигналов большой мощности данным нагревом пренебрегать нельзя.

В процессе распространения электромагнитной волны по волноводу происходит рассеивание части его энергии передаваемого сигнала в тепло. Причин затухания сигнала несколько, но преобладающими являются потери в тонком электропроводящем слое на внутренних стенках волновода [1, 2]. В теории волноводов [3, 4] принимается идеальная электрическая проводимость его материала, в этом случае электрические силовые линии расположены строго перпендикулярны к стенкам конструкции волновода.

В реальных материалах, вследствие наличия у них электрического сопротивления, вектор напряженности электрического поля будет наклонен в сторону распространения сигнала и у этого поля появится тангенциальная составляющая. В результате этого, все составляющие электромагнитного поля вдоль осевой линии волновода (ось  $z$  на рис.1) будут уменьшаться на  $\Delta P$ , Вт, по экспоненциальному закону [7]:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} - P_{\text{вх}} e^{-2\alpha l} = P_{\text{вх}} (1 - e^{-2\alpha l}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент потерь, Дб/м;  $l$  — длина волновода, м.

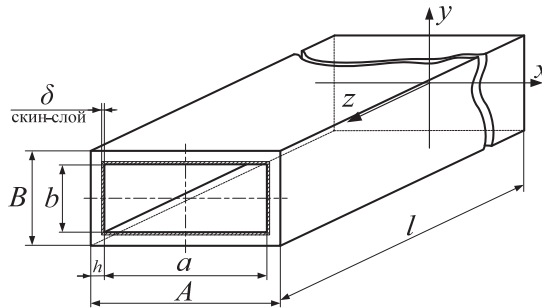


Рис. 1. Прямой элемент волновода

Значение коэффициента потерь  $\alpha$  можно определить опытным путем (эмпирически), либо с помощью теоретических зависимостей, полученных разными авторами. Для удобства применения построены диаграммы, определяющие значение коэффициента потерь при различных сочетаниях исходных данных [1]. Однако, как указывают сами авторы [1, 2], действительные значения коэффициента потерь будут больше расчетных на 10...30 % вследствие неучтенных потерь.

Процесс нагрева волновода можно разбить на два этапа: разогрев тонкого скин-слоя при кратковременном сигнале и нагрев всей конструкции волновода.

**Этап I. Джоулево тепло.** При передаче электромагнитного сигнала, в течение малого начального периода времени будет происходить интенсивный нагрев скин-слоя за счет протекания в нем наведенных токов. Толщину скин-слоя  $\delta$ , м, можно определить как

$$\delta = \frac{10^{-3}}{2\pi} \sqrt{\frac{10\rho}{f\mu}}. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  — удельное сопротивление материала волновода, Ом · м;  $f$  — частота передаваемого сигнала, Гц;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала скин-слоя.

Для большинства применяемых для волноводов материалов (алюминий, медь, серебро и др.) толщины скин-слоя весьма малы — 1,0...0,5 мкм.

Будем считать что уменьшение мощности  $\Delta P$  передаваемого по волноводу сигнала будет происходить только из-за его преобразования в тепловую энергию. Данный процесс адиабатический и его расчет можно проводить на основании закона Джоуля — Ленца [7]:

$$I^2 R dt = CM dT, \quad (3)$$

или

$$dT = \frac{\Delta P(t) dt}{CM} = \frac{(1 - e^{-2\alpha l}) P_{\text{вх}}(t) dt}{CM}, \quad (4)$$

где  $T$  — температура нагрева, °С;  $t$  — время нагрева, с;  $C$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С);  $M$  — масса тела, кг.

Если подводимую мощность усреднить и принять постоянной во времени (эффективная мощность  $P_{\text{эфф}}$ ), то выражение (4) примет следующий вид:

$$\Delta T = \frac{(1 - e^{-2\alpha l}) P_{\text{эфф}} \Delta t}{CM}. \quad (5)$$

где  $\Delta T$  и  $\Delta t$  — конечные изменения температуры, °С, и времени, с.

Полученные выражения (4) и (5) определяют линейную зависимость нагрева скин-слоя от времени и подводимой мощности.

**Этап II. Уравнение теплопроводности.** По мере прогрета стенок волновода на его температурное поле начнет влиять теплообмен с окружающей средой, поэтому этот процесс уже нельзя считать адиабатическим.

Примем допущение, что при передаче электромагнитного сигнала по волноводу происходит равномерный разогрев всех поверхностей его внутренних стенок, которые в результате будут представлять изотермическую поверхность  $S$  (рис. 2, а). Следовательно, распространение тепла в волноводе при передаче электромагнитного сигнала будет происходить только в одном направлении — по нормали  $\vec{n}$  в сторону наружных стенок (см. рис. 2, а). Краевыми эффектами в углах соединения пластин будем пренебрегать.

Выделение тепла  $\Delta Q$  в скин-слое при прохождении по нему электромагнитного сигнала можно смоделировать источником тепла интенсивностью  $W(t)$ .

Принятый подход позволяет принять для расчета температурного поля волновода одномерную модель распространения тепла и исследовать тепловое равновесие только элементарной площадки  $dS$  стенки волновода (рис. 2, б) [7]:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{W(t)}{c_1 \gamma_1}, \quad (6)$$

где  $a_2$  — коэффициент температуропроводности материала стенок волновода;  $c_1$  — удельная теплоемкость материала скин-слоя, Дж/(кг · °C);  $\gamma_1$  — удельная плотность материала скин-слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $W(t)$  — интенсивность источника тепла в скин-слое, Вт/м<sup>3</sup>:

$$W(t) = \frac{\Delta P(t)}{V} = \frac{\Delta P(t)}{S\delta} = \frac{(1 - e^{-2\alpha l})P_{\text{вх}}(t)}{S\delta}.$$

Для получения однозначного решения дифференциального уравнения (6) необходимо задать краевые условия, которые включают начальное и граничные условия на краях элементарной площадки  $dS$  стенки волновода.

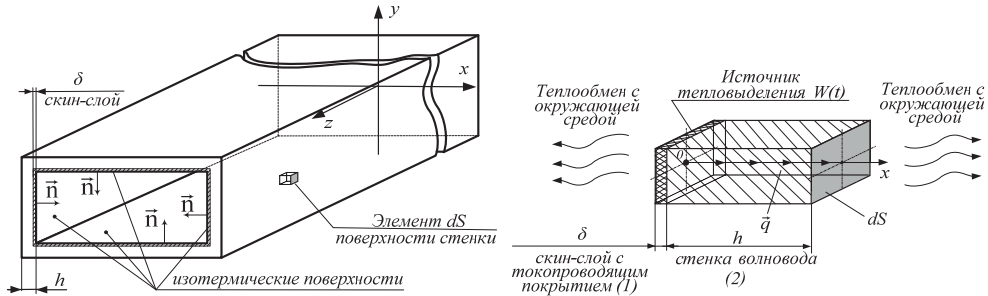


Рис. 2. Расчетная схема нагрева волновода:  
 а — волновод; б — элемент  $dS$  стенки волновода

В качестве начального условия можно принять однородное температурное поле

$$T(x, t = 0) = T_0 = \text{const}. \quad (7)$$

Условия эксплуатации волноводов в составе КА связи, имеющего открытую платформу, на заданной орбите предполагают, что они будут функционировать в среде вакуума, в котором конвекция практически отсутствует, а преобладающим способом переноса тепловой энергии конструкции волноводов будет лучистый теплообмен. В этом случае вместо условия конвекции на внешних поверхностях стенок волновода необходимо задать условие лучистого теплообмена, которое согласно закону Стефана-Больцмана имеет вид заданного теплового потока [6]:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x = h, t)}{\partial x} - \sigma_2 [T_{\text{окр}2}^4 - T_2^4(x = h, t)] = 0, \quad (8)$$

где  $\sigma_2$  — приведенный коэффициент лучеиспускания, Вт/(м<sup>2</sup> · °C).

Полученное дифференциальное уравнение (6) с краевыми условиями (7), (8) позволяет определять температурные поля прямолинейных участков волновода для любых встречающихся на практике его размеров, материала и характеристик СВЧ-сигнала.

Способы решения дифференциального уравнения (6) к настоящему времени хорошо изучены и его можно решить как аналитическими методами, так и численными.

Тепловой расчет волноводов с криволинейной продольной осью затруднен сложностью выбора значений коэффициентов потерь  $\alpha$ , поскольку для этих случаев его значения в известной литературе [1–5] не приводятся. Однако следует отметить, что в последнее время появляются работы, в которых численными методами выполняются исследования распространения электромагнитных полей в криволинейных волноводах [8].

Таким образом, получена расчетная схема и дифференциальное уравнение, описывающее температурное состояние волноводов при передаче СВЧ-сигнала. Выполнено решение задачи аналитически методом разделения переменных и численным методом конечных разностей по явной схеме. Сравнение результатов расчета показало их удовлетворительную сходимость, а также необходимость учета СВЧ-нагрева на статическое и динамическое НДС волноводов КА связи на орбите.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2875.2015.8*

### Литература

- [1] Ефимов И.Е. *Волновые линии передачи*. Москва, Связь, 1979, 232 с.
- [2] Кинг Р., Мимно Г., Уинт А. *Передающие линии, антенны, волноводы*. Москва, «Книга по требованию», 2012, 360 с.
- [3] Воскресенский Д.И., ред. *Устройства СВЧ и антенны*. Москва, Радиотехника, 2006, 378 с.
- [4] Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. *Техническая электродинамика*. Москва, Радио и связь, 2000, 536 с.
- [5] Котельников И.А. О затухании в волноводе. *Журнал технической физики*, 2004, т. 74, вып. 9, с. 91–96.
- [6] Sophocles J. *Orfanidis Electromagnetic Waves and Antennas*. 2008, 1188 p.
- [7] Карташов Э.М. *Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости*. Москва, Либроком, 2012, 656 с.
- [8] Finnveden S. Waveguide finite elements for curved structures. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, no 312, pp. 644–671.

УДК 523.41

## Новые параметры исследования Солнечной системы космическими аппаратами

© Демьянов Кирилл Анатольевич, Плеханов Петр Георгиевич

Россия, г. Самара, Самарская машиностроительный колледж

[Skb.smk@yandex.ru](mailto:Skb.smk@yandex.ru)

*Теоретически обосновано существование неизвестной ранее закономерности увеличения средних расстояний поясов малых и более крупных объектов (астероидов и плутоиды). На основании закономерности получены новые параметры Солнечной системы.*

**Ключевые слова:** *Солнечная система, малые тела, пояс астероидов, пояс Койпера.*

На современном этапе существует проблема по определению окраины Солнечной системы. В настоящее время окраину Солнечной системы определяют расстоянием орбит объектов внешней окраины пояса Койпера (среднее расстояние от Солнца 60 а.е.). Открытый американским астрономом наблюдателем М. Брауном объектом «Седна» с удаляющейся от Солнца на расстояние 900 а.е. ошибочно считается объектом внешней окраины облака комет Оорта. В астрономической лаборатории СКБ СМК (г. Самара) получена неизвестная ранее закономерность распределения поясов

малых тел Солнечной системы (пояс астероидов, пояс Койпера и др. гипотетических поясов) в соотношении  $R_{n+1}/R_n = 20$ .

**Существование закономерности увеличения средних расстояний пояса астероидов и пояса Койпера.** В статье рассмотрено соотношение среднего расстояния пояса астероидов, равного 3 а.е., и среднего расстояния пояса Койпера, равного 60 а.е. Определено, что среднее расстояние пояса Койпера больше среднего расстояния пояса астероидов в 20 раз. По этим данным выдвинуто предположение о существовании неизвестной ранее закономерности распределения пояса астероидов и пояса Койпера от Солнца:

$$\frac{R_2}{R_1} = b = 20, \quad (1)$$

где  $R_2$  — среднее расстояние второго пояса 60 а.е. (пояса Койпера);  $R_1$  — среднее расстояние пояса астероидов — 3,0 а.е.;  $b$  — величина закономерного увеличения средних расстояний поясов — 20.

Зная закономерность распределения поясов в Солнечной системе за время ее формирования, можно предположить о существовании третьего пояса между поясом Койпера и облаком комет Оорта.

**Определение среднего расстояния гипотетического третьего пояса малых тел в Солнечной системе.**

Получив закономерность в распределении поясов ( $b = 20$ ), можно предположить, что другие пояса малых тел Солнечной системы распределены от Солнца по данной закономерности  $R_{n+1}/R_n = 20$ . Следовательно, можно определить среднее расстояние третьего пояса малых тел в Солнечной системе по формуле

$$R_3 = R_2 \cdot 20.$$

Здесь  $R_3$  — среднее расстояние третьего пояса;  $R_2$  — среднее расстояние второго пояса — 60,0 а.е. (пояс Койпера).

Подставляя среднее расстояние пояса Койпера 60,0 а.е., получим среднее расстояние предполагаемого третьего пояса  $R_3 = 1\ 200$  а.е.

Внутренняя граница третьего пояса равна 800 а.е., а внешняя (от Солнца) граница — 1 600 а.е. Полученные параметры третьего пояса свидетельствуют о том, что открытый американским астрономом М. Брауном объект «Седна» с орбитой, удаляющейся на расстояние ~ 900 а.е. от Солнца, и является первым открытым объектом.

**Определение среднего расстояния облака комет Оорта.** Зная значение закономерного распределения от Солнца в Солнечной системе всех поясов малых и крупных объектов не трудно определить среднее расстояние гипотетического облака комет Оорта по формуле

$$R_4 = R_3 \cdot 20,$$

где  $R_4$  — среднее расстояние облака комет Оорта;  $R_3$  — среднее расстояние третьего пояса,  $R_3 = 1\ 200$  а.е.;  $b$  — постоянная величина закономерного увеличения средних расстояний всех поясов Солнечной системы,  $b = 20$ .

Подставляя данные  $R_3 = 1\ 200$  а.е., получим  $R_4 = 24\ 000$  а.е.

Установлено, что среднее расстояние облака комет соответствует расстоянию, которое предполагал Оорт.

Параметры всех поясов Солнечной системы представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Параметры всех поясов Солнечной системы

Параметр	Первый пояс астероидов	Второй пояс (пояс Койпера)	Третий пояс (пояс по гипотезе Плеханова)	Четвертый пояс (пояс комет Оорта)
Среднее расстояние пояса и его границы, а.е.	3,0 (2,5–3,5) Церера, Веста и др.	60 (55,0–65,0) Плутон и др.	1 200 (800–1600) «Седна» и др.	24 000 (22 000–26 000) Кометы

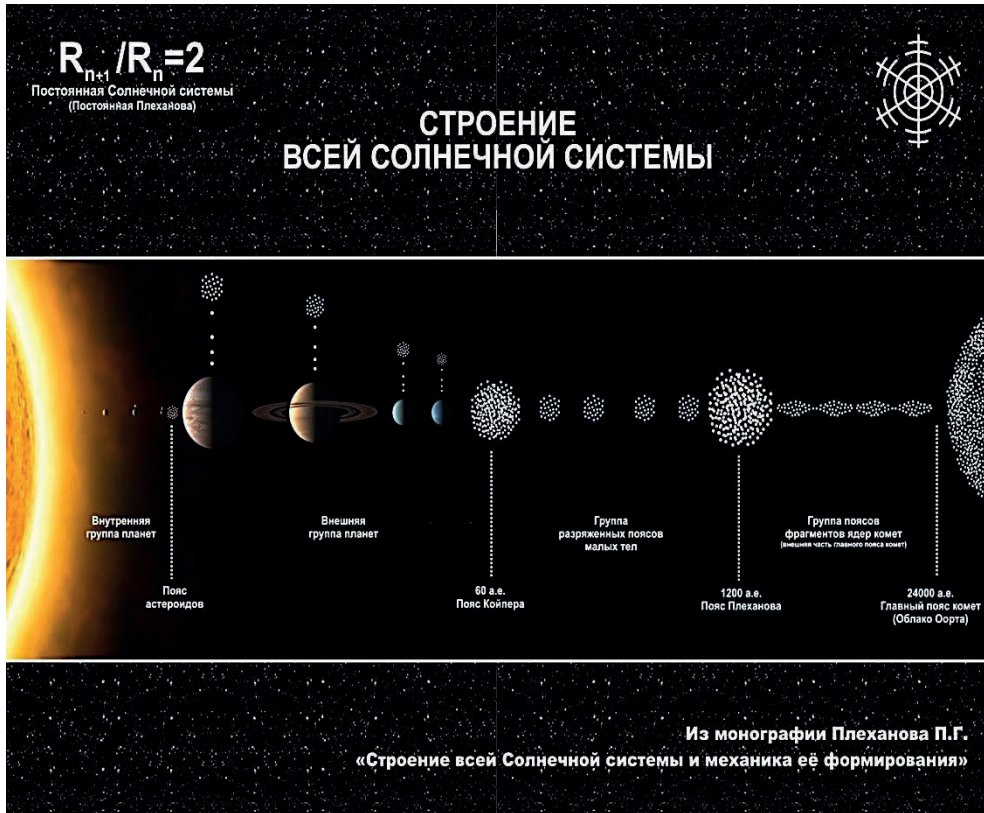


Рис. 1. Строение Солнечной системы

Таким образом, на основании неизвестной ранее закономерности увеличения (1) в данном исследовании получены сенсационные фундаментальные выводы:

- в Солнечной системе существует только четыре пояса малых тел;
- средние расстояния поясов, как и расстояния планет в группах, имеют закономерность увеличения;
- в Солнечной системе за пределами пояса Койпера существует третий пояс, а «Седна» является его первым открытым объектом.



## Литература

- [1] Плеханов П.Г. *Солнечная система (строение и кометная гипотеза происхождения)*: Самара, Изд-во Инкома-пресс, 2011, 116 с.
- [2] Уральская В.С. Крупнейшие транснептуновые объекты. *Земля и Вселенная*, 2006, № 2, с. 41–48
- [3] Шмидт О.Ю. *Четыре лекции о происхождении Земли*. Москва, АН СССР, 1957.

УДК 533.6.011

## Исследование методов снижения динамических нагрузок в задаче обтекания летательного аппарата с установленным тормозным щитком

© Епихин Андрей Сергеевич, Калугин Владимир Тимофеевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[andy\\_e@bk.ru](mailto:andy_e@bk.ru)

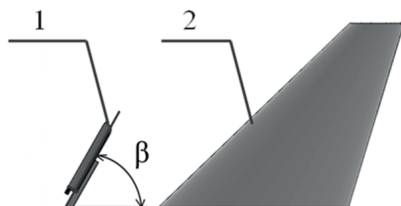
*Показана возможность применения открытого пакета OpenFOAM для исследования нестационарных вихревых течений, вычисления аэродинамических характеристик органов управления полетом. Представлены результаты численных расчетов обтекания как самолета в целом, так и тормозного щитка, установленного на его корпусе. Для снижения пульсационных нагрузок предложены варианты перфорации тормозного щитка, а также видоизменение его кромок.*

**Ключевые слова:** пакет OpenFOAM, нестационарные вихревые течения, аэродинамические характеристики, тормозной щиток, перфорация, видоизменение кромок.

При дозвуковом обтекании элементов летательного аппарата (ЛА) происходит нестационарный срыв потока, который приводит к появлению пульсационных силовых нагрузок, что необходимо учитывать в расчете аэродинамических характеристик. Вихревые течения, генерируемые различными надстройками крыла, фюзеляжа или фонаря ЛА, могут воздействовать на элементы конструкции ЛА, что вызывает их тряску, вследствие периодических ударных нагрузок. Это приводит к вибрации обшивки, стенок топливных баков, к колебаниям несущих поверхностей и органов управления ЛА. Проведенный анализ научных исследований и публикаций показал, что существуют различные методы уменьшения пульсационных нагрузок, к которым относятся видоизменение кромок органа управления [1, 2] или его перфорация [3].

Для численного моделирования обтекания тормозного щитка 1, установленного на различных углах  $\beta$ , и расположенного за ним килевого стабилизатора 2 (рис. 1) был использован открытый пакет OpenFOAM — свободно распространяемое программное обеспечение с открытым исходным кодом, поддерживающее параллельные вычисления для моделирования задач механики сплошных сред, реализованное на

языке программирования C++. Трехмерная неструктурированная расчетная сетка из гексаэдров, построенная вокруг модели создавалась с помощью утилиты snappyHexMesh, являющейся частью пакета OpenFOAM. В рассматриваемой задаче использовался решатель pisoFOAM, который применяется для расчета нестационарных несжимаемых турбулентных течений и использует алгоритм PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators — неявный метод с разделением операторов) для связи уравнения скорости и давления и модель турбулентности LES.



**Рис. 1.** Схема расчетной модели:  
1 — тормозной щиток; 2 — килевой стабилизатор

В результате численного моделирования установлено, что нестационарный срыв потока с кромок тормозного щитка, приводит к существенным силовым нагрузкам на килевом стабилизаторе. Для их уменьшения предложены и проанализированы различные варианты тормозных щитков с видоизмененными кромками и перфорацией. Получено, что видоизменение кромок тормозного щитка приводит к перестройке структуры течения и изменению пульсационных нагрузок на килевом стабилизаторе, в свою очередь, перфорация обуславливает дробление поля течения, и как следствие, уменьшение динамических нагрузок, максимальной амплитуды коэффициента поперечной силы и частоты.

### Литература

- [1] Мертоль А.Б., Клеemann Ф., Вебер К., Фишер М. *Способ и устройство для создания аэродинамического сопротивления на самолете*. Пат. Российская Федерация. № 2455196. 2010.
- [2] Бендер К. *Тормозной щиток для самолета*. Пат. Российская Федерация. № 2425780. 2011.
- [3] Епихин А.С., Калугин В.Т., Чернуха П.А. Аэродинамические характеристики стабилизирующих поверхностей при дозвуковом вихревом обтекании. *Науч. вестник Московского гос. техн. ун-та гражданской авиации*, 2013, № 188 (2), с. 19–23.

УДК 629.7

## Методика расчета условий попадания космического аппарата в тень от Земли в процессе его выведения на заданную орбиту

© Корянов Всеволод Владимирович, Топорков Алексей Геннадьевич,  
Казаков Виктор Поликарпович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[kafsm3@bmstu.ru](mailto:kafsm3@bmstu.ru)

*Рассмотрен вопрос определения максимального времени нахождения космического аппарата (КА) в тени и полутени от Земли при различных траекториях его перехода с орбиты ожидания на геостационарную орбиту. Представлены формулы для преобразования координат КА в эклиптическую систему координат и сформулированы условия попадания КА в тень и полутень от Земли.*

**Ключевые слова:** орбита ожидания, тень от Земли, космический аппарат, радиус пятна полутени, геостационарная орбита.

Одной из наиболее сложных задач, возникающих при создании телекоммуникационных спутниковых систем связи, является сохранение формы рефлектора зеркальной антенны в процессе выведения космического аппарата (КА) на заданную орбиту. Известно, что максимально допустимый уровень деформаций рефлектора антенны не должен превышать одной шестнадцатой доли рабочей длины волны. В связи с тем, что основным источником искажения формы служат термические деформации, возникающие вследствие неравномерности освещенности рефлектора на различных участках траектории, необходимо провести анализ условий освещенности КА в процессе его выведения на орбиту.

Настоящая работа посвящена разработке методики условий попадания КА и оценке времени возможного нахождения аппарата в тени от Земли при его переходе с орбиты ожидания на заданную орбиту. Радиус круговой орбиты ожидания, наклонение плоскости орбиты и долгота восходящего узла считаются заданными. Рассмотрены различные начальные положения Солнца в момент старта КА с орбиты ожидания.

Вопросам освещенности спутников Земли стали уделять большое внимание после запусков первых аппаратов на орбиту. Это было обусловлено тем, что первые спутники Земли выводились на низкие орбиты, поэтому они достаточно длительное время находились в тени от Земли. В этих условиях панели солнечных батарей не вырабатывали энергию.

В работах [1, 2] впервые были поставлены вопросы определения времени нахождения низкоорбитальных спутников в тени от Земли, сформированы упрощенные алгоритмы оценки времени пребывания спутников в тени от Земли, даны условия входа в тень и выхода из тени низкоорбитального спутника. Частично вопросы времени нахождения в тени для орбит спутников связи рассмотрены в [3]. Основное внимание авторы этой работы уделили вопросам передачи информации, зонам обзора

и т. д. Так, в [4] основное внимание уделено определению параметров траектории при многовитковом маневре на этапе дальнего наведения, предполагая, что цель находится на освещенной стороне. Оценка вероятности нахождения цели в тени от Земли не проводится. Условия входа в тень и выхода из тени для спутников различного назначения приведены в [5], однако алгоритм оценки размеров пятна тени в зависимости от расстояния до Земли не представлен. Алгоритм расчета пятна тени от Земли и времени нахождения в тени для низкоорбитального спутника приведен в [6]. При этом вводится допущение о цилиндрической форме области тени.

Анализ рассмотренных работ показал, что необходимо разработать математическую модель определения размеров тени и полутени от Земли и времени точного нахождения КА в этих областях для различных вариантов перехода с орбиты ожидания на геостационарную орбиту.

Рассмотрим определение радиусов пятен тени и полутени на заданном расстоянии от центра Земли. Центр пятен тени и полутени расположены по направлению Солнце — Земля. В соответствии с рис. 1 получим формулы для расчета радиусов пятен тени  $R_T$  и полутени  $R_{ПТ}$ .

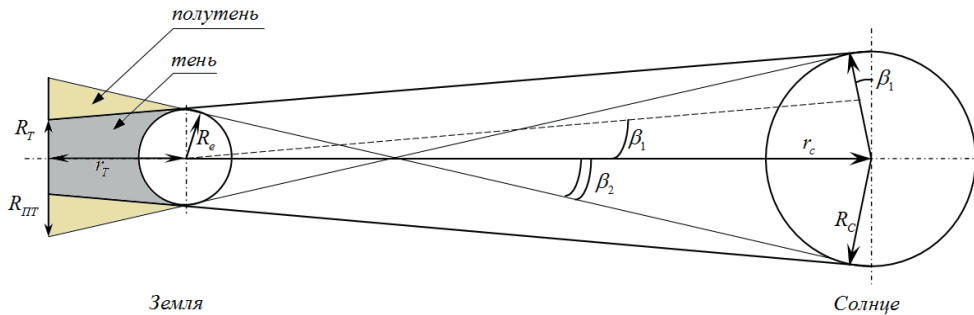


Рис. 1. Схема определения радиусов пятен тени и полутени

Для угла направления линии тени  $\beta_1$  запишем следующие соотношения:

$$\sin \beta_1 = \frac{R_c - R_e}{r_c}; \quad \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{R_e - R_T}{r_T},$$

где  $R_c$  — радиус Солнца;  $R_e$  — экваториальный радиус Земли;  $r_c$  — расстояние между центром Солнца и Земли;  $R_T$  — радиус пятна тени;  $r_T$  — расстояние от центра Земли до центра пятна тени.

После преобразования этих формул получим уравнение для определения радиуса пятна тени:

$$R_T = R_e - \frac{r_T}{r_c \cos \beta_1} (R_c - R_e). \quad (1)$$

Оценим значение угла  $\beta_1$  для среднего расстояния от Земли до Солнца:

$$R_c = 6,9598 \cdot 10^5 \text{ км}; \quad R_e = 6378 \text{ км}; \quad r_c = r_{c \text{ ср}} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ км}.$$

Отсюда  $\beta_1 = 0,2641^\circ = 15,85'$ , т. е. угол  $\beta_1$  очень мал.

Для угла направления линии полутени  $\beta_2$  запишем следующие соотношения:

$$\sin \beta_2 = \frac{R_C + R_e}{r_C}; \quad \operatorname{tg} \beta_2 = \frac{R_{\text{ит}} - R_e}{r_T}.$$

Преобразовав эти формулы, получим уравнение для определения радиуса пятна полутени:

$$R_{\text{ит}} = R_e + \frac{r_T}{r_C \cos \beta_2} (R_C + R_e). \quad (2)$$

При среднем расстоянии от Земли до Солнца угол  $\beta_2$  имеет следующее значение:

$$\beta_2 = 0,2690^\circ = 16,14'.$$

Рассмотрим условия попадания КА в пятна тени и полутени. Для этого введем геоцентрическую эллиптическую систему координат (СК)  $O_1x_1y_1z_1$ . Центр этой СК совпадает с центром Земли. Ось  $O_1x_1$  находится в плоскости эклиптики и направлено на центр текущего положения Солнца. Ось  $O_1z_1$  перпендикулярна к плоскости эклиптики. Ось  $O_1y_1$  составляет с осями  $O_1x_1$  и  $O_1z_1$  правую СК.

Переход между инерциальной СК  $O_1XYZ$  и  $O_1x_1y_1z_1$  осуществляется через матрицу перехода  $A$ :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} \cos U_1 & \sin U_1 \cos \varepsilon & \sin U_1 \sin \varepsilon \\ -\sin U_1 & \cos U_1 \cos \varepsilon & \cos U_1 \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{bmatrix},$$

$\varepsilon$  — наклон эклиптики к экватору;  $U_1$  — угловое положение Солнца относительно оси  $O_1X$ .

Дифференциальные уравнения пространственного движения КА на участке перехода с орбиты ожидания на геостационарную орбиту (ГСО) записываем в проекциях на оси АГЭСК в соответствии с работой [1].

В результате интегрирования дифференциальных уравнений движения КА получаем текущее значение координат  $(X, Y, Z)$  в функции времени. Используя соотношения (3), находим проекции координат КА  $(x_1, y_1, z_1)$  в геоцентрической эллиптической СК.

Условия попадания КА в пятна тени и полутени:

$$\begin{aligned} x_1 &< 0; \\ \sqrt{y_1^2 + z_1^2} &\leq R_T; \\ R_T &< \sqrt{y_1^2 + z_1^2} \leq R_{\text{ит}}. \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрены условия освещения КА при его выведении с орбиты ожидания до ГСО при использовании двухимпульсного перехода.

Полученные результаты расчетов показали, что при фиксированных значениях параметров орбиты ожидания, условия освещенности поверхности КА при его движении по переходной эллиптической орбите во многом определяются начальным положением Солнца в момент старта с орбиты ожидания. Время нахождения КА в тени от Земли в основном зависит от величины нормальной составляющей скорости, которая при двухимпульсном переходе будет максимальной в апогее переходной орбиты. Поэтому следует избегать попадания КА в тень от Земли на конечном этапе выведения. При соответствующем выборе момента старта КА с орбиты ожидания и положения Солнца можно избежать попадания аппарата в тень от Земли на конечном участке переходной орбиты.

### Литература

- [1] Нариманов Г.С., Тихонравов М.К., ред. *Основы теории полета космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1972, 608 с.
- [2] Эльясберг П.Е. *Введение в теорию полета искусственных спутников Земли*. Москва, Наука, 1965, 540 с.
- [3] Чернявский Г.М., Бертенев В.А. *Орбиты спутников связи*. Москва, Связь, 1978, 240 с.
- [4] Баранов А.А. Алгоритм расчета параметров многовитковых маневров дальнего наведения. *Космические исследования*, 1990, т. 28, вып.1, с. 69–76.
- [5] Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. *Баллистика и навигация космических аппаратов*. Москва, Дрофа, 2004, 544 с.
- [6] Зеленцов В.В., Казаковцев В.П. Основы баллистического проектирования искусственных спутников Земли. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012, 174 с.

УДК 621.528.1

## Выбор режима работы криогенных экранов для имитаторов космического пространства больших объемов

© Куксова Наталья Вадимовна, Петров Илья Владимирович,  
Нестеров Сергей Борисович

Россия, г. Москва, ОАО «Научно-исследовательский институт  
вакуумной техники имени С. А. Векшинского»

[nataliya.kuksova@gmail.com](mailto:nataliya.kuksova@gmail.com)

*Предложен способ расчета основных параметров криогенных экранов (КЭ) для имитаторов космического пространства больших объемов. Рассмотрены условия течения криоагента в КЭ с точки зрения оптимизации его эксплуатационных характеристик. Показано, что гидравлический режим криогенного экрана определяет теплопередачу от ребра КЭ к теплоносителю. Представлена система уравнений для расчета распределения температуры криоагента по длине трубки КЭ.*

**Ключевые слова:** криогенные экраны, тепловой расчет, гидравлический расчет, принудительная циркуляция криоагента, имитаторы космического пространства.

Режим работы большинства современных криогенных экранов (КЭ) [1] больших вакуумных камер (ВК) предусматривает теплоотвод от испытываемых объектов за счет реализации скрытой теплоты фазового перехода криоагента. Циркуляция криоагента в таких КЭ возникает благодаря изменению его плотности.

Наряду с очевидными преимуществами, подобные схемы азотообеспечения имеют следующие недостатки:

- неравномерность температурного поля КЭ;
- наличие вибраций при кипении криоагента в КЭ;
- невозможность получения температуры поверхности КЭ ниже точки кипения криоагента при рабочем давлении КЭ. В большинстве КЭ для обеспечения циркуляции криоагента необходимо повышенное давление на входе в систему, что приводит к повышению температуры кипения криоагента. Таким образом, температура поверхности КЭ, как правило, не опускается ниже  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2].

Кроме того, тепловые параметры криоагента близки к параметрам насыщения. В таких условиях возможно локальное вскипание криоагента, обусловленное гидродинамическими эффектами, что может приводить к гидроударам.

Перечисленные недостатки можно устранить, выбрав режим работы КЭ с принудительной циркуляцией криоагента.

Задача обеспечения данного режима работы КЭ решается путем проведения совместного гидравлического и теплового расчета.

Задача гидравлического расчета КЭ сводится к следующему:

- нахождение площади сечения каждой трубки КЭ. Это обеспечит одинаковый расход теплоносителя в трубках;
- обеспечение турбулентного режима течения теплоносителя в трубках путем задания перепада давления на КЭ. При турбулентном режиме течения будет происходить наилучшее перемешивание теплоносителя в каждом сечении трубки КЭ;
- получение максимального коэффициента теплоотдачи от внутренней стенки трубки к теплоносителю.

Главной задачей теплового расчета является определение зависимости, характеризующей распределение температуры теплоносителя по длине каждой трубки КЭ. Данная зависимость рассчитывается на основании полученных из гидравлического расчета значений перепада давления, внутреннего и наружного диаметров трубок при заданной рабочей температуре поверхности КЭ.

Основная система уравнений (1) для данного расчета решена численным способом в работе [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q_{кэ} h_p}{\pi} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{1}{2\lambda_{тр}} \ln \left( \frac{d_{тр.н}}{d_{тр.вн}} \right)}; \\ \frac{q_{кэ} h_p}{\pi d_{тр.н}} = \alpha_{2н} (T_{5н} - T_{6н}); \\ \frac{q_{кэ} h_p}{\pi d_{тр.н}} = \alpha_{2к} (T_{5к} - T_{6к}); \\ \frac{\pi(T_4 - T_6)}{\frac{1}{2\lambda_{тр}} \ln \left( \frac{d_{тр.н}}{d_{тр.вн}} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{тр.вн}}} = c_{p,a} G \frac{dT_6}{dx}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $q_{кэ}$  — плотность потока тепловой нагрузки на КЭ, Вт/м<sup>2</sup>;  $h_p$  — высота ребра, м;  $T_4$  — текущая температура внутренней поверхности ребра, К;  $T_5$  — текущая температура внутренней поверхности стенки трубки КЭ, К;  $T_6$  — текущая температура теплоносителя в трубке КЭ, К;  $\lambda_{тр}$  — коэффициент теплопроводности стенки трубки КЭ (Вт/м·К);  $d_{тр.н}$  — наружный диаметр трубки КЭ, м;  $d_{тр.вн}$  — внутренний диаметр трубки КЭ (м);  $\alpha_{2н}$ ,  $\alpha_{2к}$  — коэффициенты теплоотдачи от внутренней стенки трубки к теплоносителю в начале и на конце трубки КЭ (Вт/м<sup>2</sup>·К);  $T_{5н}$ ,  $T_{5к}$  — значения температур внутренней поверхности стенки в начале и на конце трубки КЭ, К;  $T_{6н}$ ,  $T_{6к}$  — значения температур теплоносителя в начале и на конце трубки КЭ, К;  $c_{р.а}$  — теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К;  $G$  — расход теплоносителя через трубку КЭ, кг/с.

Таким образом, выбор режима работы КЭ с принудительной циркуляцией криоагента позволит получить следующие преимущества:

- равномерность температурного поля. Будет получена вследствие равномерности теплоотдачи по длине трубки КЭ при обеспечении во всех трубках одинакового расхода криоагента;
- отсутствие фазового перехода вибрации, возникающие с кипением криоагента;
- температура поверхности КЭ ниже традиционных значений. Это можно достигнуть путем увеличения циркуляции криоагента через КЭ и понижения температуры криоагента.

#### Литература

- [1] Нестеров С.Б., ред. *Расчет и конструирование криоэкранов стендов для тепловой отработки и испытания космических аппаратов*. Москва, НОБЕЛЛА, 2013, 89 с.
- [2] Кравченко С.В., Нестеров С.Б., Романько В.А., Тестоедов Н.А., Халиманович В.И., Христинич В.В. *Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов*. Москва, НОБЕЛЛА, 2012, 31 с.
- [3] Куксова Н.В., Петров И.В. К расчету криогенных экранов. *Вакуумная техника, материалы и технология: Мат. IX Междунар. науч.-техн. конф.* Москва, 2014, с. 268–275.

УДК 629.7.027.2+629.782

## Оценка работоспособности посадочного устройства с краш-опорами при посадке возвращаемого аппарата на жесткий грунт

© Луковкин Роман Олегович, Щеглов Георгий Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[LukovkinRO@ya.ru](mailto:LukovkinRO@ya.ru)

*Представлены результаты численного моделирования процесса посадки возвращаемого аппарата на перспективном посадочном устройстве с краш-опорами. Проведен анализ динамических и кинематических характеристик посадочного устройства*



для различных начальных условий посадки. Результаты расчета модельных задач показывают работоспособность рассматриваемого посадочного устройства в широком диапазоне начальных условий при значительной экономии массы по сравнению с посадочным устройством традиционной рычажно-стержневой конструкции.

**Ключевые слова:** космический аппарат, посадочное устройство, краш-опора, численное моделирование.

Посадочное устройство (ПУ) предназначено для гашения с безопасным уровнем перегрузок оставшейся после этапа торможения кинетической энергии космического аппарата (КА) и является важнейшим звеном в обеспечении многозаповности конструкции проектируемых перспективных возвращаемых аппаратов (ВА). Для ВА, совершающих посадку на грунт, наибольшее распространение получила традиционная конструкция ПУ, состоящая из нескольких опор стержневой конструкции с сотовым энергопоглотителем [1]. Главным недостатком данного типа ПУ является большое количество элементов, не участвующих в поглощении остаточной энергии аппарата, что увеличивает жесткость опор и массу ПУ. В процессе контакта с посадочной поверхностью по пассивным элементам конструкции часть потока нагрузки передается в обход энергопоглотителей на узлы крепления опор, что может приводить к увеличению уровня пиковых перегрузок ВА и накоплению в процессе эксплуатации местных повреждений корпуса.

В работе [2] представлена конструкция деформируемой краш-опоры с непараллельными ветвями энергопоглотителей, позволяющая увеличить эффективность работы ПУ. В настоящей работе, рассматривается процесс деформирования складного ПУ, состоящего из четырех таких опор.

Целью работы являлась оценка работоспособности посадочного устройства при различных начальных условиях посадки на жесткий грунт, определение динамических и кинематических характеристик переходного режима посадки, выявление характерных особенностей процесса деформирования краш-опор.

Представленные результаты численного моделирования в программе MSC Dytan процесса пластической деформации ПУ в ходе посадки показывают работоспособность рассматриваемого ПУ в широком диапазоне начальных условий. Порядок средних перегрузок, действующих на центр масс ВА, оказывается близким к уровню перегрузок при использовании ПУ традиционной конструкции [3]. При этом эффективно гасятся пиковые ударные нагрузки и достигается экономия массы.

Автор благодарит за поддержку центр компетенции компании MSC.Software при МГТУ им. Н.Э. Баумана.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-01197А).*

## Литература

- [1] Баженов В.И., Осин М.И. *Посадка космических аппаратов на планеты*. Москва, Машиностроение, 1978, 159 с.
- [2] Щеглов Г.А., Луковкин Р.О. Анализ динамики пластически деформируемых опор посадочного устройства космического аппарата. *Вестник Московского авиационного института*, 2014, т. 21, № 3, с. 63–72.
- [3] Бакулин В.Н., Кокушкин В.В., Борзых С.В., Воронин В.В. Динамика процесса посадки космического аппарата с рычажно-тросовым посадочным устройством. *Вестник Московского авиационного института*, 2012, т. 19, № 5, с. 45–50.

УДК 623.623.52

## **Разработка методики оценки состояния гидравлических приводов летательных аппаратов с применением технологий упреждающего обслуживания**

© Попельнюк Илья Александрович, Гареев Альберт Минеасхатович

Россия, г. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

[Osni204@yandex.ru](mailto:Osni204@yandex.ru), [gareevalbert@mail.ru](mailto:gareevalbert@mail.ru)

*Рассмотрены вопросы внедрения упреждающих технологий обслуживания для оценки состояния гидравлических приводов летательных аппаратов. Установлен внутренний параметр гидравлического привода, определяющий его состояние. Получена зависимость указанного параметра от внешнего параметра гидропривода, величину которого возможно измерять в процессе эксплуатации. Полученная зависимость положена в основу алгоритма оценки состояния гидравлического привода, который планируется реализовать на автоматизированном стенде для испытания и регулирования гидравлических приводов, разрабатываемом на базе кафедры эксплуатации авиационной техники СГАУ.*

**Ключевые слова:** гидравлический привод, летательный аппарат, упреждающее обслуживание, рабочая жидкость, частички загрязнений, золотниковая пара, зазор.

В настоящее время летательные аппараты (ЛА) находят широкое применение в различных сферах человеческой деятельности, что объясняется экономической эффективностью их использования, а также незаменимостью при проведении определенных видов работ. Не следует забывать, что ЛА имеют ряд особенностей, одна из которых заключается в том, что даже незначительная неисправность, возникшая в полете может привести к происшествию и даже катастрофе. Поэтому к ЛА предъявляются особые повышенные требования, обусловленные обеспечением их надежности и безотказности.

Современные ЛА — сложные технические объекты, состоящие из множества составных элементов, поэтому, не смотря на все принимаемые меры, на их борту возникает множество отказов и неисправностей. В связи с этим актуален вопрос внедрения в систему эксплуатации технологий упреждающего обслуживания. Согласно определению, упреждающее обслуживание это деятельность по своевременному выявлению и устранению первоначальных симптомов отказа. Оно основано на отслеживании тенденций деградации работы объекта с целью получения функциональных симптомов, возникающих на ранних стадиях предотказного состояния. Однако для того чтобы упреждающее обслуживание было эффективным, необходимо иметь соответствующие методы, средства диагностирования и контроля объектов ЛА и технологии их реализации, позволяющие получать необходимую информацию в «реальном» масштабе времени. Таким образом, для внедрения технологий упреждающего обслуживания для конкретного объекта необходимо выбрать некий его параметр, изменение которого напрямую связано с изменением его технического состояния.

В процессе технической эксплуатации необходимо контролировать значение выбранного параметра относительно нормы, а по результатам контроля судить о техническом состоянии объекта в целом.

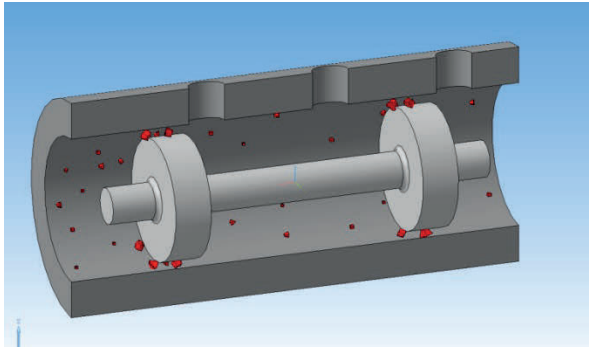
В настоящее время на кафедре «Эксплуатация авиационной техники» СГАУ ведется разработка методики оценки состояния гидравлических приводов, которые в настоящее время широко используются в авиационной и космической промышленности, с применением технологий упреждающего обслуживания.

Гидравлический привод — устройство, состоящее из гидropередачи, системы управления и вспомогательных устройств [1]. Его параметр и величина связаны с фактическим техническим состоянием — временем движения исполнительного штока. В случае отклонения этого параметра от нормы, гидропривод перестанет нормально функционировать, следовательно, можно говорить об отказе либо неисправности в нем. Нормативное значение данного параметра оговорено в НТД, а по его изменению можно сделать вывод об изменении технического состояния гидропривода в целом. Для реализации технологий упреждающего обслуживания необходимо установить связь между временем движения исполнительного штока и неким внутренним параметром гидропривода — величиной зазора между управляющим золотником и его гильзой (величина зазора в управляющей золотниковой паре гидропривода). Опуская промежуточные элементы логической цепи, можно сказать о том, что исполнительный шток гидропривода приводится в движение в результате перемещения управляющего золотника в гильзе под внешним воздействием. Отсюда следует, что время движения исполнительного штока прямо пропорционально времени движения управляющего золотника, т. е.

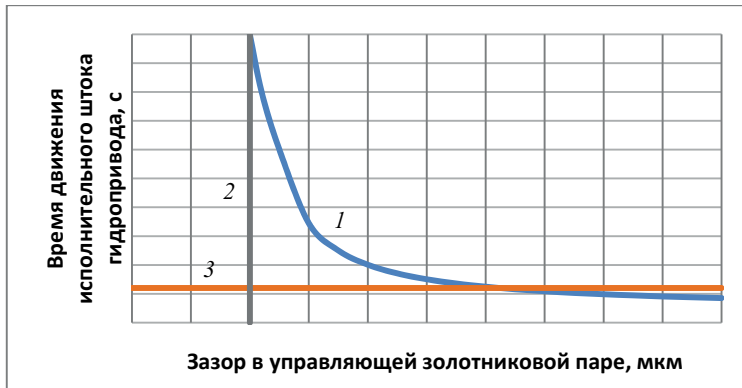
$$t_{\text{и.ш}} = k_{\text{зад}} t_{\text{з.р.у}},$$

где  $t_{\text{и.ш}}$  — время движения исполнительного штока;  $k_{\text{зад}}$  — коэффициент задержки;  $t_{\text{з.р.у}}$  — время движения золотника ручного управления.

Причины увеличения времени движения многочисленны и разнообразны. Согласно [2] работоспособность гидравлических агрегатов зависит от различных факторов (давление, температура, вязкость РЖ и т. д.), но главным образом — от чистоты рабочей жидкости (РЖ). Частицы загрязнений вместе с РЖ под большим давлением циркулируют по системе, попадают в зазор между управляющим золотником и гильзой, контактируют с их поверхностями (рис. 1). Вследствие этого с течением времени происходит их износ и изменяется их геометрия, что в свою очередь вызывает изменение величины зазора в золотниковой паре. Нарушение геометрии и изменение зазора обуславливает появление радиальной неуравновешенной силы, которая прижимает золотник к гильзе и перекашивает их оси [3]. В результате этого явления увеличивается сила трения в паре и нарушается нормальный ход золотника в гильзе. С течением времени возможно заклинивание золотника в гильзе из-за превышения модуля силы трения над модулем усилия страгивания золотника. Для каждого конкретного гидропривода, пользуясь методикой расчета, изложенной в [3] и данными из технического паспорта и инструкции по эксплуатации агрегата, можно рассчитать величину минимально допустимого зазора в управляющей золотниковой паре, при котором сохраняется работоспособность гидропривода. Используя результаты расчета, устанавливаются зависимость между временем движения управляющего золотника, а значит и исполнительного штока, от величины зазора в управляющей золотниковой паре. В общем случае зависимость величины зазора в паре от времени движения исполнительного штока имеет вид, представленный на рис. 2.



**Рис. 1.** Воздействие частиц загрязнений, содержащихся в РЖ, на детали золотниковой пары гидравлического привода



**Рис. 2.** Зависимость времени движения управляющего золотника от величины зазора в паре:  
 1 — зависимость времени движения исполнительного штока от величины зазора;  
 2 — минимально допустимый зазор в управляющей золотниковой паре; 3 — максимально допустимое время движения штока

В процессе технической эксплуатации ЛА необходимо всего лишь замерять время движения исполнительного штока, по результатам чего, используя полученную зависимость, можно с определенной точностью установить величину зазора в управляющей золотниковой паре, оценить его фактическое техническое состояние и спрогнозировать появления отказа в будущем.

На сегодняшний день в рамках научной работы, проводимой на кафедре «Эксплуатация авиационной техники» СГАУ, получена зависимость времени движения исполнительного штока гидравлического привода КАУ-30Б от величины зазора в управляющей золотниковой паре. Полученные результаты планируется внедрить в алгоритм оценки состояния гидропривода КАУ-30Б на стенде по испытанию и регулированию гидравлических приводов, оснащенный автоматизированной системой управления с применением контролера реального времени Compact Rio компании National Instrument.

## Литература

- [1] Некрасов Б.Б. *Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах*. Москва, Машиностроение, 1967, 368 с.
- [2] Гареев А.М., Злобина Ю.П., Попельнюк И.А., Гареев Т.М. *Упреждающее обслуживание гидравлических систем летательных аппаратов*. Самара, Изд-во Самарского научного центра Российской академии наук, 2014, 168 с.
- [3] Башта Т.М. *Машиностроительная гидравлика: справочное пособие*. Москва, Машиностроение, 1971, 671 с.

УДК 629.7.022

## Стратосферный технологический летательный аппарат для отработки реактивного двигателя

© Попов Александр Сергеевич<sup>1</sup>, Ефремов Денис Иванович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> Россия, г. Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

[www-sm2@yandex.ru](mailto:www-sm2@yandex.ru), [reg@netwind.ru](mailto:reg@netwind.ru)

*Описана конструкция летательного аппарата для проведения технологического эксперимента по отработке электронагревного реактивного двигателя в условиях невесомости и низкого давления окружающей среды. Эксперимент должен проводиться в стратосфере в свободном падении путем сбрасывания рассматриваемого летательного аппарата со стратостата. Результаты эксперимента предназначены для использования при создании компактного реактивного двигателя для сверхмалых космических аппаратов класса микро, нано и пико.*

**Ключевые слова:** *стратосферный эксперимент, моделирование невесомости, электронагревный реактивный двигатель, наноспутник, CubeSat, resistodjet.*

Современная тенденция к миниатюризации электронных компонент обусловила появление в космонавтике аппаратов сверхмалого класса и технологических спутников на базе таких аппаратов. Так, например, широкое распространение приобрела концепция CubeSat, где космический аппарат, собирается из стандартного набора деталей, подобно сборке из конструктора [1]. Это существенно упрощает процесс разработки изделия, хотя стоимость килограмма полезного груза, доставленного на орбиту, а также процедура оформления документации остаются по-прежнему емкими. Особенностью малых аппаратов является отсутствие, как правило, двигательной установки на борту. Это связано с тем, что в настоящее время существует очень ограниченный ассортимент двигательных установок габаритных размеров, которые можно было бы разместить на КА данного класса. Работы по созданию такого двигателя ведут различные организации во всем мире. В частности, в [2] рассмотрен про-

ект реактивного двигателя, работающего на разложении гидразина посредством катализатора. Двигатель создан методом аддитивных технологий и выполнен в размерах одного модуля аппарата класса CubeSat. В работе [3] предложен двигатель аналогичных размеров, но использующий в качестве рабочего тела этиловый спирт, что делает его более экологически чистым. При этом он менее требователен к технологии изготовления. Для отработки данного двигателя требуется проведение ряда экспериментов, в том числе летных. Некоторые космические технологические эксперименты могут быть проведены в условиях суборбитального или стратосферного полета, как альтернатива орбитального.

В данной работе рассмотрен летательный аппарат (ЛА), поднимаемый на высоту 25 км при помощи стратостата и проводящий технологический эксперимент по отработке электронагревного реактивного двигателя, описанного в [3], в условиях невесомости и пониженного давления окружающей среды. ЛА создан на платформе Arduino и представляет собой цилиндр диаметром 60 мм, ориентированный своей осью по направлению к центру Земли. Достигнув заданной высоты, ЛА включает пару реактивных двигателей, создающих момент силы относительно продольной оси цилиндра. Целью эксперимента является определение характеристик рассматриваемого реактивного двигателя. Величину тяги двигателей, установленных на ЛА, а также их удельный импульс можно вычислить, измерив ускорения при помощи трехосевых акселерометров, и угловые скорости с помощью трехосевых датчиков угловых скоростей, установленных на борту ЛА.

Данный ЛА изготовлен в рамках студенческого проекта и получил название «Метелица». Одной из особенностей конструкции ЛА «Метелица» является его цилиндрическая форма малого диаметра. Такая геометрия обусловлена необходимостью снижения дисбаланса при вращении цилиндра вокруг продольной оси, а также снижения силы лобового сопротивления ЛА при его свободном падении со стратостата. В связи с данной особенностью сборка и обслуживание бортовой аппаратуры осуществляется через верхний торец аппарата через крышку, в роли которой выступает парашютный контейнер.

Вся компоновка ЛА разбита на отдельные блоки, соединенные между собой кабелями с электрическими разъемами, позволяющими отсоединить каждый из блоков для его проверки или ремонта.

Верхним блоком, закрывающим корпус, является парашютный контейнер, в котором размещен парашют, выбрасываемый вышибным ракетомодельным зарядом по команде с контроллера платы Arduino в соответствии с циклограммой полета.

Вторым по счету сверху блоком является приборный блок, где размещены две платы Arduino. Одна из них управляет проведением эксперимента и записывает телеметрию на SD-карту, установленную в специальный адаптер, а вторая отправляет выборочные данные по радиоканалу на дополнительный ЛА, размещенный на воздушном шаре. В приборном блоке также размещена плата с реле, через которые происходит коммутация цепей с большими токами, необходимыми для срабатывания устройств разделения, раскрытия парашюта и подогрева рабочего тела в реактивном двигателе. В приборном блоке на отдельной плате установлены трехосевой гироскоп, трехосевой акселерометр и компас, выполняющий роль датчика угла.

Третьим блоком является двигательный блок с двумя реактивными электронагревными двигателями, расположенными таким образом, чтобы создавать пару сил, закручивающую ЛА вокруг продольной оси. Внутри двигательного блока рас-

положен независимый аккумулятор большой емкости, рассчитанный на большой ток в цепи.

Всего на ЛА размещено две группы аккумуляторов: один аккумулятор в двигательном блоке, и два, соединенных последовательно, — в навигационном. Такое разделение сделано с целью снижения резких скачков тока в цепи при включении мощных потребителей, что позволит снизить риск сбоя в работе программы. Ниже двигательного блока размещен навигационный с двумя аккумуляторами и ГЛОНАСС-GPS трекером, установленным на ЛА с целью определения его координат после посадки для возможности подбора. Трекер использует химический источник тока, независимый от других электрических цепей ЛА.

Все блоки соединены между собой при помощи винтов и позволяют разбирать изделие на составляющие для его ремонта или диагностики. Между приборным блоком и двигательным размещена специальная переходная рама, которая облегчает соединение блоков при помощи кабелей. На нижнем торце ЛА расположен зеленый светодиод силой света в 500 кд, при помощи которого в эксперименте предполагалось осуществлять визуальный контроль полета ЛА с Земли. На верхнем торце ЛА установлены четыре красных светодиода, срабатывающие одновременно с включаемыми на ЛА устройствами. С их помощью можно с воздушного шара контролировать правильность проведения эксперимента, а также определить угловую скорость вращения ЛА посредством обработки видеозаписи с шара. Для того чтобы получить такую видеозапись, над аппаратом «Метелица» был размещен дополнительный ЛА, на борту которого установлена видеокамера для визуального контроля проведения эксперимента, а также радиоприемная аппаратура для приема телеметрии с ЛА «Метелица». Вдоль образующей цилиндра корпуса ЛА установлены четыре белых светодиода, с помощью которых также можно определить угловую скорость вращения ЛА при визуальном контроле как с воздушного шара, так и с Земли, посредством телескопа, при условии подходящих метеоусловий и расположения стратостата не за горизонтом по отношению к земному наблюдателю. Цвета светодиодов подобраны с учетом наибольшей контрастности диодов при наблюдении ЛА с шара и с Земли.

## Литература

- [1] *Begin your CubeSat Mission with the CubeSat Kit*. URL: <http://www.cubesatkit.com/index.html> (дата обращения 01.07.2015).
- [2] *Project introduction*/ URL: <http://www.mcps-precise.com> (дата обращения 01.07.2015).
- [3] Pavlov A., Popov A. Resistojet for micro and nano satellites (IAC-13,E2,1,2,x17608). Proceedings of 64<sup>th</sup> International Astronautical Congress? Beijing, China, 2013.

УДК 621.7

## Экспериментальная оценка механических характеристик прочности металлокомпозитного бака высокого давления

© Середин Валентин Игоревич, Лепихин Анатолий Михайлович

Россия, г. Красноярск, Специальное конструкторско-технологическое бюро  
«Наука» Красноярского научного центра Сибирского отделения  
Российской академии наук

[mk3valentine@mail.ru](mailto:mk3valentine@mail.ru)

*Представлены результаты экспериментальной оценки характеристик механических свойств материалов металлокомпозитного бака высокого давления. Описана методика и выполнен анализ испытаний на растяжение образцов из титанового сплава и испытаний на изгиб композитного материала. Изложена методика испытаний титанового лайнера внутренним гидравлическим давлением до разрушения. Выполнен анализ данных, полученных по результатам разрушающих испытаний лайнера.*

**Ключевые слова:** механические свойства, титановый сплав, композитный материал, прочность.

В работе в качестве объекта исследования рассмотрен металлокомпозитный ксеноновый бак высокого давления, являющийся составной частью электрореактивной двигательной установки, которая применяется в космических летательных аппаратах. Бак состоит из тонкостенной металлической оболочки эллиптической формы (лейнера) с глухим и расходным фланцами, расположенными на полюсах. Лейнер изготавливается путем раскатки по оправке листов титанового сплава с последующей сваркой и обеспечивает герметичность сосуда высокого давления. На лейнер намотана композитная оболочка на основе стекловолокна и эпоксидной смолы. Композитная обмотка обеспечивает прочность бака.

Чтобы оценить прочность и надежность металлокомпозитного ксенонового бака высокого давления, необходимо определить значения характеристик механических свойств материалов, из которых он изготовлен. Для решения этой задачи была разработана методика проведения экспериментальных испытаний и оценки результатов.

Для определения значений характеристик механических свойств титанового сплава, из которого изготовлен лейнер, был вырезан ряд плоских образцов в области экватора и торца лайнера. Испытания проводились на статическое растяжение с автоматической фиксацией диаграмм деформирования металла в процессе нагружения.

Для получения значений характеристик механических свойств композитного материала были изготовлены образцы двух типов. Первый тип образцов вырезался из верхней части бака, второй тип — вблизи экватора бака. Также образцы имели различное направление укладки волокон. Испытания образцов из композитного материала проводились на четырехточечный изгиб с приложением ступенчатой нагрузки и фиксацией соответствующего значения линейного перемещения.



Разрушающие испытания металлического лейнера проводились в следующих целях: определить фактические значения деформаций и перемещений лейнера, оценить наличие или отсутствие роста дефектов в лейнере, установить наличие процессов ползучести в титане и получить значения максимальной разрушающей нагрузки лейнера.

Испытания лейнера до разрушения выполнялись посредством его ступенчатого нагружения внутренним гидравлическим давлением. Для проведения измерений в процессе испытаний на поверхности лейнера были размещены датчики акустико-эмиссионного контроля, на фланцах лейнера установлены датчики линейных перемещений, вдоль меридиана на лейнер наклеены тензодатчики, давление регистрировалось посредством цифрового и аналогового манометров. Также фиксировалось изменение геометрии контура лейнера.

По результатам испытаний на статическое растяжение образцов из титанового сплава получены следующие значения характеристик механических свойств: условный предел текучести, временное сопротивление разрушению, относительное сужение после разрыва и разрушающая деформация.

По результатам испытаний на четырехточечный изгиб образцов из композитного материала получены диаграммы нагрузка–перемещение, рассчитаны значения модулей упругости для двух типов образцов вырезанных из композитной оболочки бака.

По результатам испытаний внутренним гидравлическим давлением до разрушения титанового лейнера получены следующие данные: найдено давление, при котором возникают источники акустической активности; установлено наличие упруго-пластических деформаций в области сварного шва лейнера, установлено образование дефектов формы на экваторе, определено значение разрушающей деформации.

### Литература

- [1] ГОСТ 1497—84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Введ. 01.01.86. Москва, Изд-во стандартов, 1984, 28 с.
- [2] Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 432с.
- [3] Махутов Н.А. *Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность*. Москва, Машиностроение, 1981, 272 с.
- [4] Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. *Оптимальное армирование оболочек вращения из композитных материалов*. Москва, Машиностроение, 1977, 145 с.
- [5] Любин Дж., ред. *Справочник по композиционным материалам*: В 2 кн. Кн. 1. Москва, Машиностроение, 1988, 448 с.
- [6] Фудзии Т., Зако М. *Механика разрушения композиционных материалов*. Москва, Мир, 1982, 232 с.
- [7] Фитцер Э., Дифендорф Р., Калнин И. и др. *Углеродные волокна и углекомпозиаты*. Москва, Мир, 1988, 336 с.

УДК 629.7.054.07

## Исследование статистических характеристик ошибок БИНС на базе микромеханических датчиков в составе малогабаритных управляемых ракет

© Скоробогатский Сергей Валерьевич, Тищенко Дмитрий Владимирович,  
Слободчиков Владимир Николаевич

Россия, г. Москва, АО «Конструкторское бюро точного машиностроения  
имени А.Э. Нудельмана»

[ise.90@mail.ru](mailto:ise.90@mail.ru)

*Оценено влияние статистических характеристик датчиков первичной информации на точность бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Разработана математическая модель летательного аппарата и БИНС, приведены основные положения используемой методики статистического моделирования. В качестве примера рассмотрено влияние линейных перегрузок, уходов и дрейфа нулей датчиков угловой скорости и ускорений в составе БИНС на ошибки определения положения летательного аппарата в пространстве.*

**Ключевые слова:** бесплатформенная инерциальная навигационная система, ошибки датчиков, датчик угловых скоростей, датчик линейных ускорений, координаты, математическая модель.

В процессе эволюции высокоточного оружия наибольшее развитие и перспективы получили управляемые снаряды с головками самонаведения (ГСН), которые позволяют реализовать принцип «выстрелил-забыл» и обеспечить минимальные промахи, включая прямые попадания, независимо от дальности, а также снизить требования по располагаемой перегрузке.

Ограниченность дальности захвата современных фотоприемников оптических ГСН не позволяет обеспечить захват целей до старта ракеты на требуемых дальностях. В связи с этим возникает необходимость захвата цели на траектории. Для реализации автоматического захвата цели на траектории и последующего перехода на самонаведение (реализации принципа «выстрелил — забыл») используются инерциальные навигационные системы (ИНС) [1, 2]. В управляемых снарядах и ракетах малого калибра использование платформенных ИНС, традиционно применяемых в системах наведения баллистических ракет, невозможно в связи с их большими массой и габаритами.

Современные технологии позволяют производить электромеханические датчики малого размера [3], на основании которых возможно создание бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). В отличие от платформенных ИНС данные системы имеют достаточно малые размеры, что позволяет использовать их для решения задач наведения в данных классах боеприпасов.

Эффективность использования БИНС на борту управляемых ракет (УР) малого калибра в основном определяется погрешностью определения текущих декартовых и угловых координат УР в процессе наведения. Они, в свою очередь, кроме ошибок выставки, во многом определяются погрешностями замеров ускорений и угловых

скоростей датчиками, устанавливаемыми в БИНС. Характеристики датчиков, влияющих на ошибки замеров, имеют случайную составляющую. Поэтому влияние ошибок замеров на конечный результат определяется их случайным сочетанием, а объективная оценка должна даваться в виде статистических характеристик ошибок замера координат УР по БИНС во время процесса наведения.

Для проведения таких оценок разработана статистическая модель динамики УР с БИНС в составе системы управления.

Модель УР, представленная на рис. 1, реализуется следующими блоками: блок алгоритма управления, блок динамики и кинематики [4], блок БИНС и блок расчета статистических характеристик ошибок БИНС. Управляющее воздействие  $\bar{\delta}_{\text{пр}}$  формируется алгоритмом управления, реализующим тестовую программу полета. Управляющее воздействие подается на вход блока расчета динамики полета ракеты. Выходными данными блока являются следующие параметры: скорость ракеты  $v$ , угловые скорости  $\dot{\Theta}$ ,  $\dot{\Psi}$  вектора скорости ракеты, угловые скорости корпуса ракеты  $\omega_{x1}$ ,  $\omega_{y1}$ ,  $\omega_{z1}$  для трех координатных осей связанной системы координат и перегрузки  $n_{x1}$ ,  $n_{y1}$ ,  $n_{z1}$  УР. Параметры вектора скорости УР передаются в блок кинематики вместе с текущими углами ориентации корпуса УР —  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\gamma$ . В блоке кинематики выполняется расчет реальных координат ракеты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  в декартовой системе координат, имеющей точку отсчета, совмещенную с точкой старта УР, а также расчет углов ориентации:  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\gamma$ .

Математическая модель БИНС включает модель датчиков (триада акселерометров и триада ДУС) и модель решения навигационной задачи. Входными сигналами модели датчиков являются перегрузки, измеряемые по трем осям системы координат и угловые скорости по трем осям аппарата (УР), рассчитываемые в блоке динамики. Также на вход блока датчиков подаются случайные погрешности и ошибки измерения. Набор погрешностей и их статистические характеристики определяются типом используемых датчиков. В модели учитываются следующие погрешности: смещение триад датчиков по осям, неортогональность осей датчиков, коэффициент влияния ортогональной перегрузки на ДУС, отклонения масштабных коэффициентов ДЛУ и ДУС, не нули и скорости дрейфа нулей датчиков. Выходом модели датчиков являются показания датчиков угловых скоростей  $\omega_x^b$ ,  $\omega_y^b$ ,  $\omega_z^b$  и перегрузок  $n_x^b$ ,  $n_y^b$ ,  $n_z^b$ . Данные значения вместе с погрешностями начальной выставки поступают на вход блока решения навигационной задачи. Данный блок рассчитывает декартовые координаты УР относительно инерциальной системы координат —  $X^b$ ,  $Y^b$ ,  $Z^b$ , привязанной к точке старта, и углы, определяющие положение корпуса УР относительно переносной системы координат —  $\psi^b$ ,  $\theta^b$ ,  $\gamma^b$ .

Далее выполняется сравнение идеальных расчетных координат и углов УР с координатами, полученными с БИНС, и рассчитываются статистические характеристики ошибок используемой БИНС в соответствующем блоке статистической модели.

Статистическое моделирование процесса полета УР, с использованием БИНС, проводится по следующей методике:

- задаются случайные значения параметров датчиков и реализации шумов, влияющих на результаты измерений;
- реализуется процесс наведения УР с фиксацией ошибок БИНС в данной реализации;
- процесс наведения повторяется снова с новой комбинацией случайных факторов и шумов;

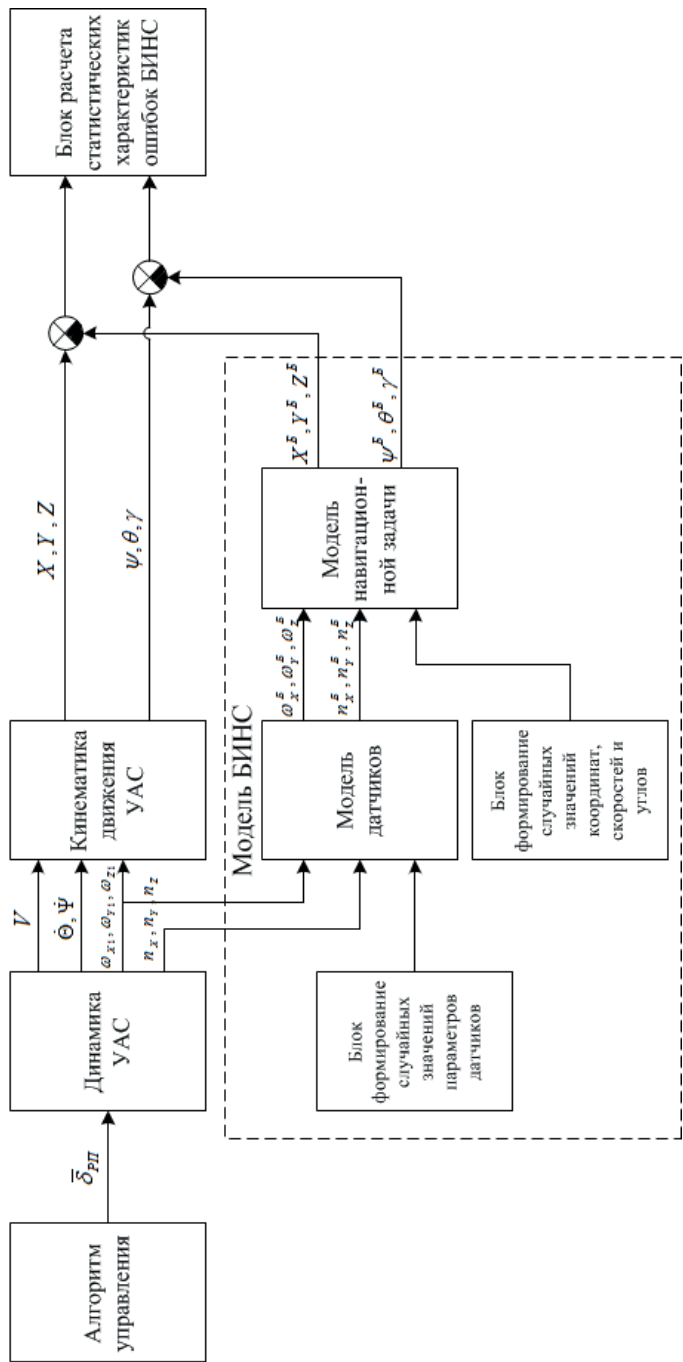


Рис. 1. Структурная блок-схема статистической модели УР с БИН

• после завершения требуемого числа реализаций по фиксированным ошибкам БИНС в каждой реализации рассчитываются статистические характеристики ошибок БИНС по трем декартовым координатам и трем угловым координатам.

В качестве примера приведено влияние основных погрешностей датчиков на точность определения координат УР, имеющей траекторию, приведенную на рис. 2. Общее время полета УР составляет 22 с, дальность полета — 6,3 км.

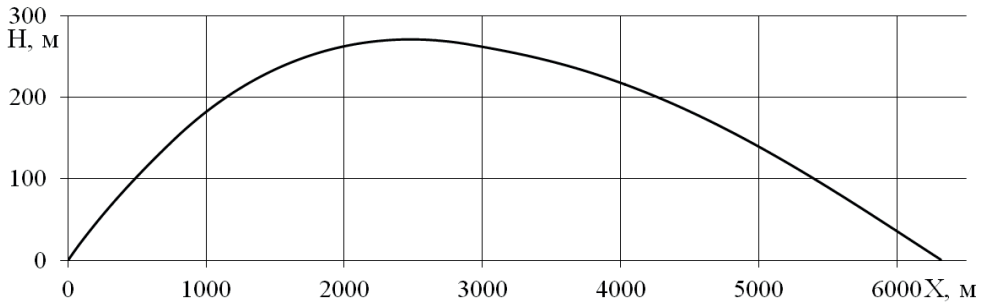


Рис. 2. Траектория УР в вертикальной плоскости

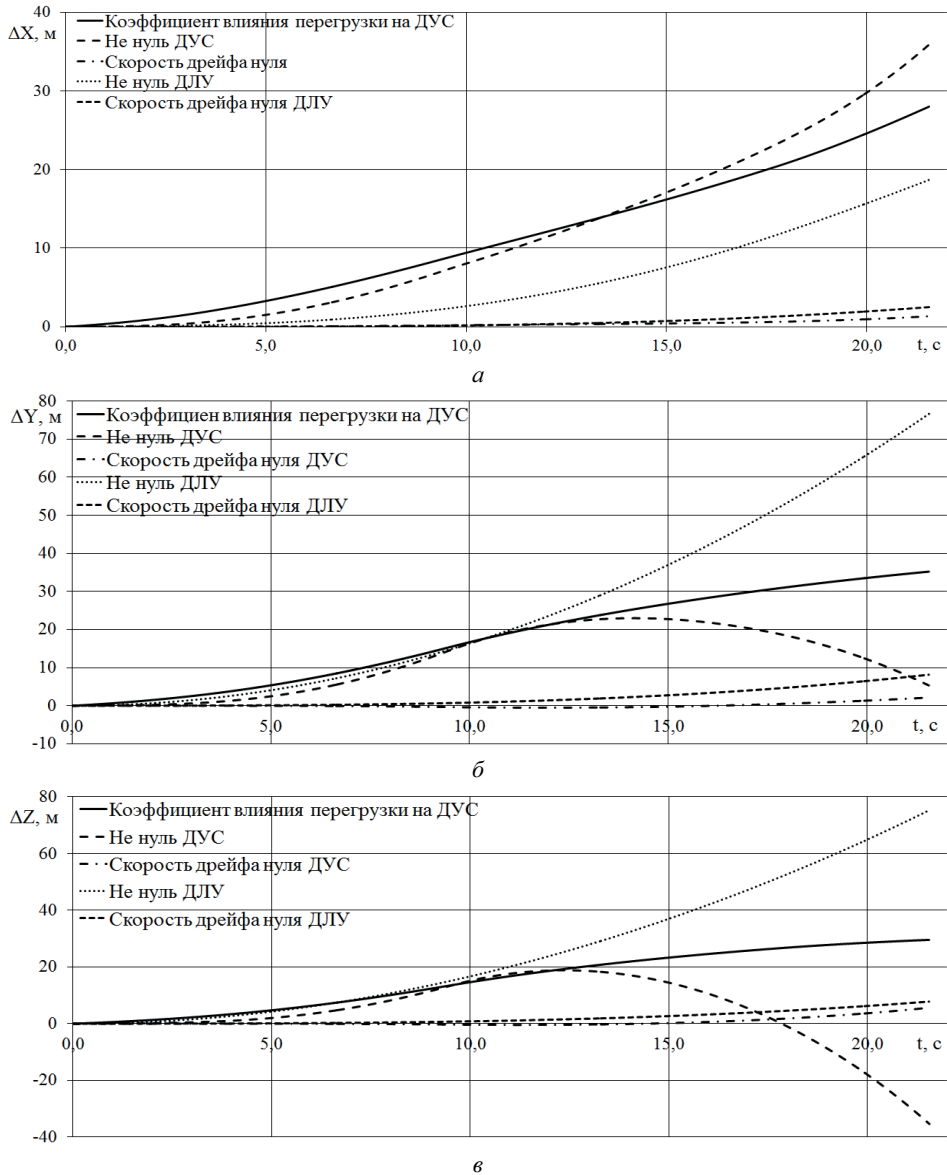
Значения погрешностей, характерных для датчиков отечественного производства, совместно с ошибками определения линейных и угловых координат УР в пространстве при помощи БИНС на конец полета приведены в табл. 1. Зависимость ошибки БИНС по трем декартовым координатам от времени полета УР, вызванные одной из пяти рассматриваемых ошибок датчиков, представлены на рис. 3.

Таблица 1

Параметр	Значение $2\sigma$	Ошибка БИНС на конец наведения					
		$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta \gamma$ , град	$\Delta \theta$ , град	$\Delta \psi$ , град
Коэффициент влияния ортогональной перегрузки на ДУС	0,02 °/с/g	21,55	28,01	35,21	0,002	-0,014	0,014
Не нуль ДУС	0,26 °/с	35,94	23,92	37,28	0,097	0,1	0,106
Не нуль ДЛУ	0,034g	18,70	76,87	75,95	0	0	0
Скорость дрейфа нуля ДУС	0,003 °/с <sup>2</sup>	1,33	2,19	5,63	0,012	0,012	0,012
Скорость дрейфа нуля ДЛУ	0,5 mg/c	2,50	8,15	7,79	0	0	0

Из анализа табл. 1 видно, что наибольшее влияние на точность определения положения в пространстве по данным БИНС оказывают уходы нулей ДЛУ и ДУС, а наименьшее — дрейфы нулей ДЛУ и ДУС. В данном примере приведен небольшой объем исследованных характеристик датчиков, однако хорошо видно влияние максимальных ошибок приведенных параметров на точность определения координат БИНС.

Максимальная пространственная ошибка БИНС по дальности реализуется при «не нуле» ДЛУ и составляет 110 м (1,7 % дальности полета). «Не нуль» ДУС дает ошибку 57 м (0,9 %). На рис. 3 видно, что влияние ошибок триад датчиков на определение координат УР по БИНС имеют, в большинстве своем, квадратичную зависимость от времени полета УР. Ошибки определения углов положения корпуса УР имеют линейные зависимости и поэтому на рисунке не приведены.



**Рис.3.** Ошибки определения координат УР БИНС:  
 а — по оси X; б — по оси Y; в — по оси Z

Разработанная статистическая модель позволяет оценить влияние как отдельных параметров БИНС, так и их совокупности, на конечный результат решения навигационной задачи с учетом условий управляемого полета. Модерирование позволит прогнозировать результат применения первичных преобразователей угловой скорости и ускорения в составе БИНС до изготовления опытного образца, сократив расходы на экспериментальную отработку изделия.

### Литература

- [1] Бромберг П.В. *Теория инерциальных систем навигации*. Москва, Наука, 1979, 296с.
- [2] Лысенко Л.Н. *Наведения и навигация баллистических ракет*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 672 с.
- [3] Требухов А.В., Бахонин К.А., Соловьев В.М., Редькин С.П., Алехин А.В., Масленников А.В., Соловьев Ю.В., Темляков Н.А. Разработка инерциальных чувствительных элементов для систем ориентации и навигации летательных аппаратов. *Оборонная техника*, 2014, № 5–6, с. 134–144.
- [4] Коротков О.В., Воропаев С.Н., Гуцал В.Г., Скоробогатский С.В. Математическая модель малогабаритной высокоточной ЗУР с лазерной системой наведения. *Известия РАРАН*, 2012, № 3 (73), с. 42–50.

УДК 621.372.83.001.24

## **Автоматизированная система индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов**

© Тынченко Вадим Сергеевич, Лаптенко Валерий Дмитриевич

Россия, г. Красноярск, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева

[vadimond@mail.ru](mailto:vadimond@mail.ru)

*Описана автоматизированная система для индукционной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов. В качестве аппаратного обеспечения системы применяется промышленный компьютер, который управляет индукционным генератором по информации с пирометров, измеряющих температуру теплового процесса. Программное обеспечение (Windows-приложение) обладает широким функционалом как по настройке параметров процесса пайки, так и по визуализации результатов с возможностью регистрации и документирования параметров процесса.*

**Ключевые слова:** автоматизированное управление, волноводный тракт, индукционная пайка, бесконтактное измерение температуры, оптимизация технологии.

На ряде предприятий аэрокосмической отрасли Российской Федерации при производстве волноводных трактов радиотехнических систем космических аппаратов связи используется технология индукционной пайки, позволяющая улучшить массо-

вые и эксплуатационные характеристики волноводных трактов из алюминиевых сплавов. Однако существующая технология пайки обладает рядом недостатков, таких как ручное управление режимом пайки и присутствие оператора в зоне электромагнитного воздействия оборудования. Поддержание температуры нагрева изделия должно производиться в узких интервалах и с большим быстродействием, что существенно затрудняет качественное выполнение технологического процесса и нередко приводит к прожогам и оплавлениям элементов волноводных трактов [1].

Индукционная пайка тонкостенных волноводных трактов широкого диапазона типоразмеров в настоящее время затруднительна, особенно в условиях расширения номенклатуры трактов и увеличения объемов производства [2].

Анализ перечисленных выше особенностей индукционной пайки обусловил необходимость модернизации и автоматизации используемого оборудования, создания системы программного управления процессом, системы пирометрии и интеграции их в единый комплекс, позволяющий точно воспроизводить и, при необходимости, автоматически вносить корректировки в процесс индукционной пайки элементов волноводных трактов.

В целом постановка задачи по модернизации оборудования для индукционной пайки тонкостенных волноводных трактов сводится к следующему:

1) разработка силовой части оборудования (генератор, согласующее устройство, индуктор), позволяющей выполнять концентрированный нагрев тонкостенных волноводных труб с более массивными фланцами и соединительными муфтами из алюминиевых сплавов;

2) создание системы бесконтактной пирометрии, позволяющей осуществлять контроль изменения температуры на нагреваемых объектах из алюминиевых сплавов;

3) создание программного управления комплексом оборудования, позволяющего осуществлять изменение мощности, подаваемой на индуктор в зависимости от показаний системы пирометрии (обратная связь по температуре).

Созданный комплекс автоматизированного оборудования для индукционной пайки включает в себя силовую часть и стенд управления, с помощью которых можно с необходимой точностью воспроизводить требуемые технологические параметры нагрева.

В состав силовой части установки СЧУ-16 входит высокочастотный безтрансформаторный генератор с рабочей частотой 66КГц (ВБГ-16), модернизированное согласующее устройство (СУ(М)), комплект индукторов с рабочими окнами различных сечений.

Основу стенда управления составляет промышленный компьютер IPPC-9171G-07ВТО компактной помехозащищенной конструкции, позволяющий использовать для соединения с внешними устройствами ввода/вывода информации интерфейсную плату PCI-1710 и дополнительные разъемы RS-232. Так же компьютер оборудован сенсорным экраном, что делает работу оператора более удобной.

При создании модернизированного комплекса оборудования было принято решение об использовании бесконтактных пирометрических датчиков. При выборе пирометров исходили из следующих условий:

- погрешность контроля температуры не должна превышать 0,5 % измеряемой величины;
- диаметр контролируемой области не должен превышать 1,5 мм для обеспечения возможности контроля температуры волновода в зазоре индуктор–волновод;

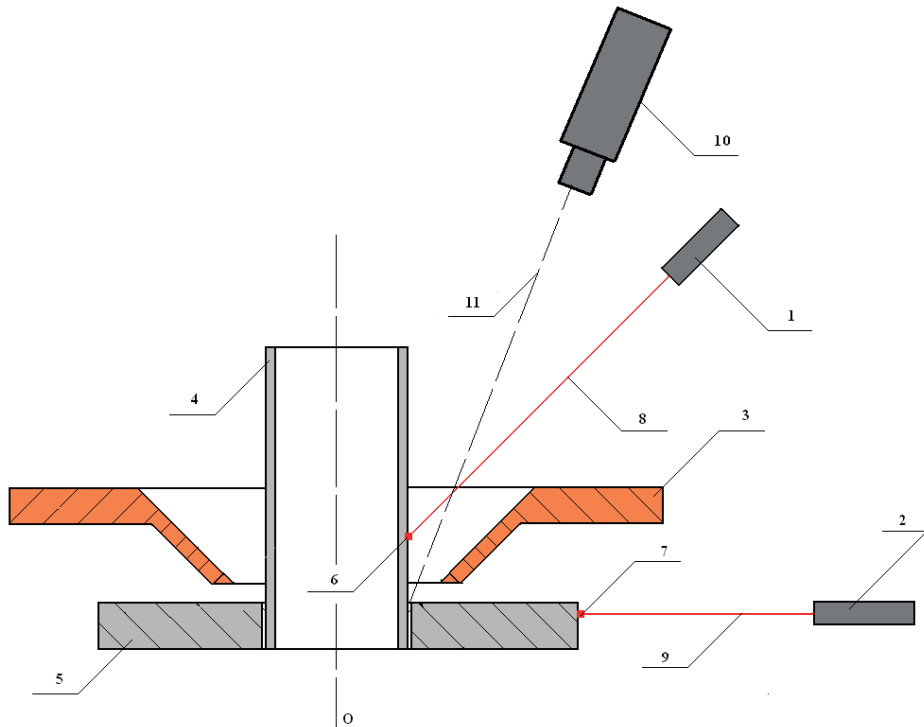


• пирометр должен обладать помехозащищенностью в условиях действия электромагнитных полей, действующих при индукционной пайке.

Исходя из перечисленных условий были выбраны пирометры AST A250, работающие в требуемом диапазоне температур с погрешностью 0,3 % и диаметром зоны обзора 1 мм. на расстоянии 200 мм. Оптическая головка соединена с электронным блоком световолоконным кабелем длиной 3 м, поэтому на пирометр не действуют электромагнитные поля индукционного генератора.

Для автоматизации процесса индукционной пайки использовалось два пирометра, один из которых направлен на волноводную трубу, а другой — на фланец. Схема контроля температуры представлена на рис. 1 [3].

Видеокамера, изображенная на рис. 1, служит для дистанционного визуального наблюдения за процессом пайки.



**Рис. 1.** Схема расположения пирометрических датчиков и видеокамеры:

1 — пирометр для контроля нагрева волноводной трубы; 2 — пирометр для контроля нагрева фланца (муфты); 3 — индуктор; 4 — волноводная труба; 5 — фланец (муфта); 6 — точка контроля нагрева волноводной трубы; 7 — точка контроля нагрева фланца (муфты); 8 — луч пирометра 1; 9 — луч пирометра 2; 10 — видеокамера; 11 — ось видеозахвата

Программный продукт, предлагаемый для автоматизации процесса индукционной пайки, представляет собой Windows-приложение, работа которого возможна в операционных системах Windows XP/7/8/8.1. Программный продукт разработан на языке C++ с применением объектно-ориентированного подхода [4].

Структурная схема программной системы представлена на рис. 2.

Система состоит из пяти модулей:

- 1) основной модуль (Soldering.cpp), отвечающий за запуск системы, авторизацию пользователей и обработку исключительных ситуаций;
- 2) модуль, реализующий главную форму приложения (mainform.cpp), отвечает управление процессом пайки, визуализацию ее результатов и их сохранение;
- 3) модуль настройки пирометров (pyroform.cpp), реализует алгоритмы управления параметрами пирометров, их инициализации и настройки;
- 4) модуль-класс (Pyro\_class.cpp), реализует на основе объектно-ориентированного подхода хранение и обработку информации с пирометров;
- 5) библиотека управления платой PCI1710 bdaqctrl.h.

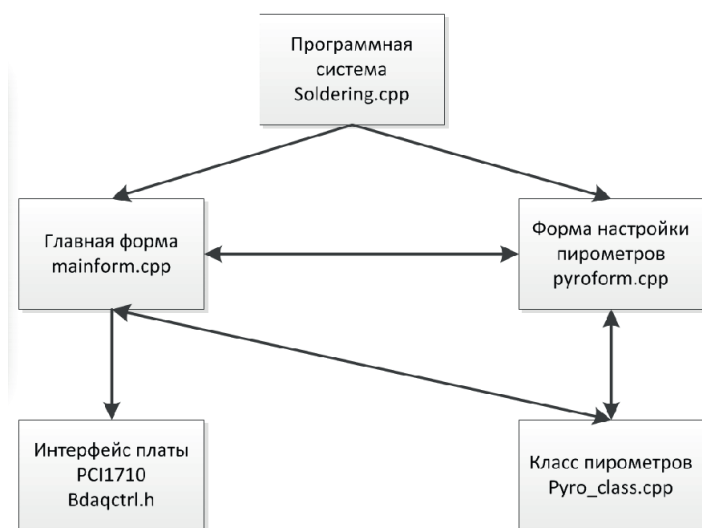


Рис. 2. Схема программного продукта

Главное окно программной системы представлено на рис. 3. Пользователю предоставлены возможности по настройке параметров процесса индукционной пайки (1), управления лазерными указателями пирометров (2), запуску и остановке процесса. Также пользователь, с помощью меню может выполнять настройку пирометров, сохранять результаты запуска и работать с базой данных параметров процесса.

Внедрение разработанной автоматизированной системы позволяет повысить качество волноводных трактов и, соответственно, надежность работы систем спутниковой связи. Заложенные в основу алгоритмы управления на основе измерения температуры позволяют оптимально управлять мощностью нагрева и фиксировать момент пайки волноводного тракта, что снижает влияние человеческого фактора в наиболее критичных аспектах процесса. Кроме этого внедрение такой автоматизированной системы пайки снижает время нахождения оператора в зоне влияния электромагнитных полей и воздействия опасных паров вредных веществ.

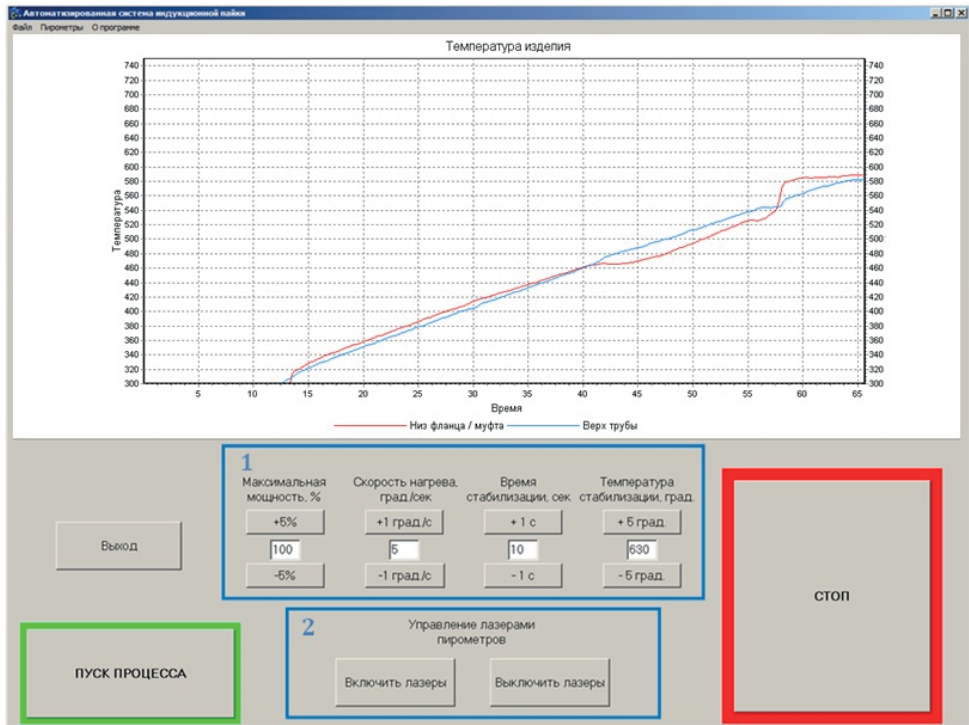


Рис. 3. Главное окно программной системы

Оборудование испытано и используется в производстве ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева.

### Литература

- [1] Злобин С.К. Применение индукционного нагрева при пайке элементов волноводно-распределительных трактов из алюминиевых сплавов. *Решетнёвские чтения: Матер. XVII Междунар. научн. конф.* Красноярск, СибГАУ, 2013.
- [2] Лаптенко В.Д., Злобин С.К., Михнев М.М., Бочаров А.Н., Долгополов Б.Б. Особенности производства волноводно-распределительных трактов антенно-фидерных устройств космических аппаратов. *Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та*, 2013, № 6.
- [3] Тынченко В.С., Злобин С.К., Михнев М.М., Лаптенко В.Д., Серегин Ю.Н., Бочаров А.Н., Дубец Ю.П., Долгополов Б.Б. Автоматизированное оборудование и технология для пайки волноводных трактов космических аппаратов. *Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та*, 2014, вып. 4 (56), с. 219–229.
- [4] Тынченко В.С., Бочаров А.Н., Серегин Ю.Н., Лаптенко В.Д. Модуль взаимодействия с аппаратным обеспечением АСУ «Пайка». Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015611846, 2015.

## О необходимости запуска космического аппарата на расстояние 100–800 а.е. от Солнца

© Хожателев Владислав Вячеславович, Плеханов Петр Горгиевич

Россия, г. Самара, Самарский машиностроительный колледж

[skb.smk@yandex.ru](mailto:skb.smk@yandex.ru)

*Обоснована необходимость разработки космического аппарата для подтверждения гипотезы о существовании в Солнечной системе за пределами пояса Койпера группы из четырех протопланетных поясов на расстоянии 100-200-400-800 а.е. от Солнца.*

**Ключевые слова:** Солнечная система, пояс Койпера, группа планет, группа протопланетных поясов, околосолнечный протопланетный диск.

По существующей гипотезе О. Ю. Шмидта (1944) Солнечная система формировалась одновременной аккумуляцией всех планет и только планет и только в пределах околосолнечного протопланетного диска [1, 2]. Однако эта гипотеза не объясняет природу наблюдаемых двух групп совершенно разных планет (по четыре планеты в группе), пояса астероидов и пояса Койпера, не объясняет природу наблюдаемой закономерности увеличения расстояний планет.

Происхождение групп планет носит катастрофический характер (разрушение гипотетической планеты «Фазтон»), а круговых орбит планет — случайный характер.

В работах [3, 4] обосновано предположение о том, что в околосолнечном протопланетном диске существовали две группы протопланетных поясов (по четыре пояса в группе), в которых аккумуляровались наблюдаемые в Солнечной системе две группы по четыре совершенно разных планет. Гипотеза аккумуляция групп планет в группах протопланетных поясов приводит к выводу о существовании в Солнечной системе за пределами пояса Койпера разряженной группы из четырех протопланетных поясов на расстояниях 100–200–400–800 а.е. от Солнца. В гипотетической группе разряженных поясов, сформированной вне солнечного протопланетного диска, аккумуляция группы планет не состоялась.

Для подтверждения существования гипотетической группы протопланетных поясов (гипотеза Плеханова) в работе теоретически обоснованы наблюдаемые факты, свидетельствующие о существовании группы поясов. Обосновывается необходимость разработки космического аппарата, который бы мог достичь до поясов, расположенных на указанных расстояниях, определить их плотность и подтвердить гипотезу о их существовании.

Для обоснования существования в Солнечной системе группы разряженных протопланетных поясов проводится исследование соотношений расстояний планет внутренней группы и планет — гигантов внешней группы. Соотношения расстояний планет в группах показаны в табл. 1.

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что соотношения расстояний планет в группах  $b$  больше единицы, но меньше числа два:

$$2 > b > 1.$$

Соотношения расстояний соседних между собой пар планет в группах.

Пары планет внутренней группы	Группа $b$	Пары группы планет-гигантов	Группа $b$
Венера — Меркурий	1,87	Сатурн — Юпитер	1,84
Земля — Венера	1,38	Уран — Сатурн	2,00
Марс — Земля	1,52	Нептун — Уран	1,58

Наблюдаемое соотношение расстояний планет в группах близкое к числу два приводит к выводу о том, что группа планет аккумулировалась в группе протопланетных поясов и их средние расстояния имели соотношение, равное числу два:

$$R_{n+1}/R_n = 2,$$

где  $R_n$  — среднее расстояние предыдущего пояса в группе протопланетных поясов;  $R_{n+1}$  — среднее расстояние последующего пояса группы протопланетных поясов.

На основе законов Кеплера, Лагранжа и Лаверье в [1] получено неизвестное ранее свойство комет, которое обосновывает существование механизма формирования и распределения в околосолнечном протопланетном диске вокруг Солнца групп протопланетных поясов, средние расстояния которых имели закономерность увеличения в соотношении равному числу два  $R_{n+1}/R_n = 2$ . В докладе [2] Шмидт не случайно отметил о том, что в математических расчетах часто встречается число два.

Полученное в [1] соотношение  $R_{n+1}/R_n = 2$  и свойство малых тел (комет) формировать группу протопланетных поясов обосновывает существование в прошлом групп протопланетных поясов и физику их формирования. Открытие космическим аппаратом группы протопланетных поясов подтвердит гипотезу Плеханова, которая впервые объясняет, что происхождение планет группами формирует:

- природу круговых орбит планет;
- природу возникновения наблюдаемой закономерности увеличения расстояний планет в группах.

### Литература

- [1] Витязев А.В. Образование планетной системы Солнца. *Природа*, 1991, № 9.
- [2] Шмидт О.Ю. О планетных расстояниях. *ЛАН СССР*, 1944, т. 46, № 9.
- [3] Плеханов П.Г. *Солнечная система XXI века*. Самара, Изд-во СГПУ, 2003, 194 с.
- [4] Плеханов П.Г. *Солнечная система (строение и происхождение)*. Самара, Инсома-прес, 2011, 128 с.

УДК 621.373.826, 621.384.3, 629.783

## Применение лазерных технологий в ракетно-космической технике

©Щелоков Евгений Алексеевич<sup>1</sup>, Бадюков Сергей Александрович<sup>1</sup>,  
Данилин Александр Иванович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Россия, г. Самара, АО «Ракетно-космический центр «Прогресс»

<sup>2</sup>Россия, г. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева (Национальный исследовательский университет)

e-mail: riddick41666@mail.ru

*Приведены существующие лазерные системы, применяющиеся в космической технике, и типы регистраторов параметров движения микрометеороидов. Указаны недостатки этих устройств и предложен новый метод регистрации на основе устройства микрометра. Показан порядок действий, которые необходимо учесть при разработке нового метода регистрации космических частиц. Предложена схема расположения рабочих элементов.*

**Ключевые слова:** лазерные технологии, ракетно-космическая техника, микрометеороид, регистратор, микрометр.

В настоящее время в радиотехнике широкое применение нашли лазерные системы, например, приведенные ниже:

Система	Назначение
Беззапросная квантово-оптическая система (БКОС)	Сличение шкал времени средствами оптической лазерной локации
«Сентинел-1А» (космический аппарат)	Передача данных с помощью лазерных технологий

Одним из важных факторов воздействия на функциональные возможности КА являются потоки микрометеороидов и космического мусора. Наука развивается по пути совершенствования методов регистрации параметров микрометеороидов. В настоящее время известно множество способов реализации подобных систем: на основе чувствительных PVDF пленок (при регистрации происходит деградация рабочей области), на основе приемников с зарядовой связью (дорогостоящие системы) и т. д.

Как следует из представленных выше данных, лазерные системы используются для наземных целей и в космической промышленности. Однако до сих пор их не применяют в исследованиях параметров микрометеороидов.

Предлагается замена существующих типов детекторов параметров движения микрометеороидов на систему с применением лазерных технологий. В основу нового метода положена технология, применяемая в датчиках положения. Внешний вид одного из таких устройств представлен на рис. 1.

В качестве научно-технического решения, устраняющего основные проблемы при создании такого устройства, предлагается следующий ряд работ:

- 1) проработка структурной и принципиальной схемы устройства;
- 2) проработка возможности применения лазерных технологий в условиях космического пространства;
- 3) анализ предлагаемой конструкции;
- 4) анализ возможных погрешностей.

Основной задачей регистратора является получение достоверной информации о характеристиках микрочастиц и возможность ее обработки.

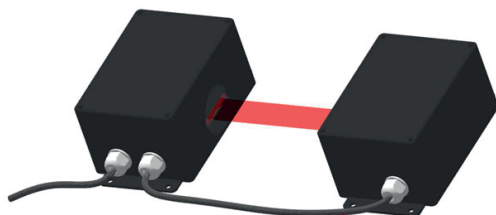


Рис. 1. Оптический микрометр

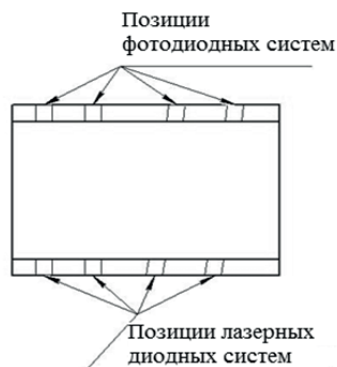


Рис. 2. Схема расположения основных элементов устройства

Предполагаемая схема расположения рабочих элементов разрабатываемого устройства приведена на рис. 2.

### Литература

- [1] Щелоков Е.А. Бояркина У.В. Оптикоэлектронный детектор параметров микрометеороидов. *Конкурс науч.-техн. работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики»*, Москва, 2014, с. 236–238.
- [2] *Оптический микрометр*. URL: <http://www.prizmasensors.ru/production/lsten> (дата обращения 15.03.2015).
- [3] Щелоков Е.А., Калинин Е.С. Фотозлектронный преобразователь параметров микрометеороидных тел в околоземном пространстве. *III Всерос. форум школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Космическое приборостроение»: сб. науч. тр.*, Томск, 2015, с. 145–146.

УДК 623.746.174

### Определение функционального состояния лопасти несущего винта вертолета при выполнении боевого задания

© Афанасьев Николай Александрович, Агаев Заур Нурадинович

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

[agaev.79@yandex.ru](mailto:agaev.79@yandex.ru)

*Предложен способ определения функционального состояния лопасти несущего винта вертолета, при выполнении боевого задания с учетом боевых повреждений.*

**Ключевые слова:** вертолет, лопасть несущего винта, система интеллектуальной поддержки экипажа.

Как показывает опыт боевых действий, из всех частей планера, лопасть несущего винта вертолета (НВ), является элементом, вносящим наибольший вклад в уязвимость летательного аппарата (ЛА) [1]. Это объясняется следующим:

1) наличие относительно большой площади НВ (в плане) по сравнению с другими частями планера увеличивает вероятность попадания снарядов и осколков в него;

2) НВ создает подъемную силу и тягу, необходимую для осуществления перемещения ЛА в атмосфере, а также позволяет осуществлять продольное и поперечное управление ЛА на всех режимах полета, то его разрушение во многих случаях приводит к сбитию ЛА;

3) несимметричные повреждения НВ обуславливают развитие резонансных явлений на лопастях и возникновению флаттера.

Лопасть — самая нагруженная часть вертолета. На лопасти несущего винта действуют следующие силы [1]:

- аэродинамические силы: подъемная сила в вертикальной плоскости и сила лобового сопротивления в плоскости вращения;
- изгибающий момент;
- центробежная сила;
- крутящий момент;



- инерционные силы;
- собственный вес.

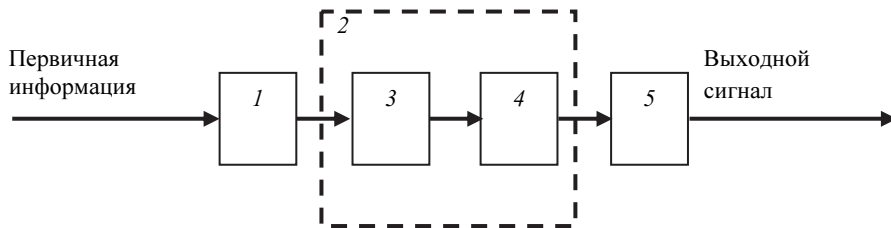
В процессе вращения лопасть совершает изгибные колебания как балка, однако дополнительно на нее действует центробежная сила, которая по своему характеру является восстанавливающей. Растягивая лопасть, она стремится вернуть ее в неизогнутое состояние. Центробежная сила вызывает растяжение лонжерона. Под действием центробежной силы, значение которой составляет десятки тонн, в поперечном сечении лонжерона возникают большие нормальные напряжения.

Известно [2], что среди всех боевых повреждений частей планера 80 % составляют мелкие повреждения, не приводящие непосредственно к сбитию ЛА. В настоящее время наблюдается тенденция обстрела вертолета с нескольких огневых точек, что приводит к накоплению ущерба или, при выводе ЛА за допустимые после повреждения режимы полета, долома конструкции лопасти НВ вертолета. При воздействии по вертолету средств поражения (СП) летчик может судить о состоянии основных систем (топливная, гидросистема, силовая установка) по показаниям приборов в кабине и принять решение о дальнейшем ходе выполнения всех этапов боевого задания, чего он не может сделать при повреждении силовой схемы лопасти НВ.

В условиях информационного вакуума (при пробоинах в элементах конструкции лопасти НВ) летчик не в состоянии продолжать выполнение полетного задания с требуемым уровнем безопасности полета. Поэтому одной из актуальных задач является диагностика отказов элементов и агрегатов ЛА и его подсистем, а также оценка степени опасности выявленных отказов и принятие ответственных решений по выбору дальнейшего режима полета ЛА.

В данной ситуации существует возможность разрушения лопасти НВ при создании предельных перегрузок в процессе маневрирования.

Одним из важнейших направлений в обеспечении безопасности полета является оснащение лопастей НВ вертолета техническими средствами, позволяющими свести к минимуму вероятность ошибки экипажа.



**Рис. 1.** Схема функциональная СИПЭ:

1 — датчик первичной информации; 2 — вычислитель; состоящий из блока обработки информации (3), блока формирования команд (4); 5 — исполнительное устройство

Для решения данной задачи предлагается встроить в лонжерон лопасти НВ датчики напряжения и деформации, которые будут точно прогнозировать функциональное состояние лопасти НВ вертолета в процессе выполнения боевого задания. Сигнал от датчиков будет поступать в бортовую интеллектуальную систему поддержки экипажа (СИПЭ), что позволит летчику управлять вертолетом после воздействия по ЛА СП противника. Схема функциональная СИПЭ показана на рис. 1.

## Литература

- [1] Вильдгрубе Л.С. Вертолеты. *Расчет интегральных аэродинамических характеристик и летно-технических данных*. Москва, Машиностроение, 1977, 152 с.
- [2] Володко А.М., Горшков В.А. *Вертолет в Афганистане*. Москва, Воениздат, А/О «РЕАМ-Билдинг», 1993, 216 с.

УДК 621.396.621

## Разработка алгоритма управления приводами наведения антенного поста системы управления корабельным артиллерийским комплексом

© Былдин Алексей Юрьевич, Жураковский Валерий Николаевич

Россия, г. Москва, Научно-исследовательский институт  
специального машиностроения при МГТУ им. Н.Э. Баумана

[sm2-2@inbox.ru](mailto:sm2-2@inbox.ru)

*К системам управления огнем предъявляются серьезные требования в точности и эффективности. Для удовлетворения этим требованиям необходима в частности высокая точность управления положением антенны. Предложен разработанный алгоритм управления приводами наведения антенного поста системы управления корабельным артиллерийским комплексом. Рассмотрены устройство и принципы работы приводов, проанализированы их основные особенности. С учетом описанных особенностей разработан алгоритм управления приводами. В настоящее время алгоритм внедрен в комплекс программного обеспечения системы управления артиллерийским комплексом, устанавливаемом на новейших российских кораблях.*

**Ключевые слова:** корабельная РЛС, привод, антенный пост, стопор, стягивание, система управления огнем, артиллерийский комплекс.

Данное исследование посвящено разработке алгоритма управления приводами наведения антенного поста системы управления корабельной артиллерийской установкой. Приводы наведения обеспечивают угловое перемещение приемной антенной решетки по курсовому углу (КУ) и углу места (УМ). К системам управления огнем предъявляются высокие требования в части точности и эффективности. Для удовлетворения этим требованиям необходима, в частности, высокая точность управления положением антенны.

Целью работы является анализ особенностей приводов наведения антенного поста и разработка алгоритма управления приводами с учетом этих особенностей.

В системах обзора [1] или сопровождения по углу с механическим приводом антенны обычно используются отдельные оси вращения по КУ и УМ соответственно. Как правило, привод состоит из усилителей, фильтров и двигателя, наводящего ось антенны на цель. На привод подается напряжение сигнала ошибки слежения. В системах сопровождения необходимо подавать такое напряжение, чтобы вызванное им

перемещение луча антенны снижало ошибку наведения оси антенны на цель до нуля. Привод имеет два датчика: положения и рассогласования. При достаточно малых ошибках наведения для управления используются данные с датчика рассогласования, а при больших — данные с датчика положения.

При малой ошибке наведения на привод сразу подается напряжение, соответствующее этой ошибке. Для перемещения на большие углы необходимо постепенно подводить привод к требуемому положению, иначе будут происходить переходные процессы с сильными колебаниями и большим временем установки. Движение привода разбивается на три участка: разгон, равномерное движение и торможение. Разгон и торможение осуществляются с постоянным угловым ускорением. Максимальная угловая скорость и угловое ускорение определяются характеристиками конкретного привода. В процессе движения привода может быть изменено требуемое положение, например, по команде оператора или по полученному целеуказанию. В этом случае необходимо произвести пересчет параметров движения привода.

Важная особенность приводов наведения антенного поста — наличие электрических и механических стопоров в крайних положениях, что обуславливает необходимость ограничения управляющих воздействий, подаваемых на привод, а также переброс антенны при переходе через крайние положения. Рабочая зона привода КУ —  $-185...185^\circ$ , привода УМ —  $-60...180^\circ$ . Датчик положения по КУ устроен таким образом, что при любых углах сохраняется однозначность измерения, т. е., к примеру, напряжения на датчике при положениях  $178$  и  $-182^\circ$  различаются, хотя КУ при этом один и тот же, отличие состоит лишь в том, с какой стороны расположен ближайший стопор. При приближении антенны к крайнему положению по КУ необходимо осуществлять переброс антенны по КУ на  $360$  градусов, чтобы она оказалась с противоположной стороны от стопора. При переходе требуемого положения по УМ через крайнее верхнее значение необходимо осуществлять переброс антенны по КУ на  $180^\circ$ .

Специфика управления корабельной системой — необходимость отработки качек. Специфика систем, размещаемых на подвижном основании, подробно рассмотрена в [2]. Данные о качках (угловые значения и скорости бортовой и килевой качек) поступают от внешней системы в режиме реального времени. На основе этих данных, а также данных о текущем положении рассчитывается необходимое смещение положения антенны. Если частота поступления данных о качках ниже частоты выдачи управляющих воздействий на привод, осуществляется экстраполяция с использованием скоростей качек.

В некоторых случаях возникает задача плавного подведения антенны к цели для ее захвата и сопровождения. Рывки привода могут привести к срыву сопровождения. Разработанный алгоритм плавного перемещения приводов аналогичен принципу максимума Понтрягина [3]. Если есть тело, движущееся по инерции, которое нужно остановить в заданной точке за минимальное время, это можно сделать, разогнав и/или тормозя тело с максимальным ускорением. В качестве фазовых координат выбирается ошибка положения привода  $\delta$  и скорость ее изменения  $\varepsilon$ . Задача состоит в том, чтобы наискорейшим образом перевести привод в точку  $\delta = 0$ ,  $\varepsilon = 0$ , подавая на него управляющий сигнал, ограниченный по ускорению. Данная процедура называется втягиванием. В алгоритме втягивания по осям откладывается относительная скорость и положение привода относительно точки, характеризующей заданное положение, точка может иметь ненулевую скорость, так как цель может перемещаться в пространстве. При таком подходе гарантированно происходит достижение цели, даже если она движется с непостоянным ускорением. На выходе алгоритма имеем ускоре-

ние привода, которое дважды интегрируется, и полученное рассогласование прибавляется к текущему положению приводов.

Разработанный алгоритм управления приводами был реализован программно и проверен на специальном испытательном стенде, включающем в себя антенный пост, прибор обмена и компьютер с управляющей программой, а также на реальной системе в ходе предварительных и ходовых корабельных испытаний. Специфические принципы и методы, использованные при программной реализации алгоритма, описаны в [4]. В настоящее время алгоритм внедрен в комплекс программного обеспечения системы управления артиллерийским комплексом, устанавливаемый на новейших российских кораблях.

### Литература

- [1] Жураковский В.Н., Кондрашов К.С. Алгоритм разделения подвижных и малоподвижных объектов в малогабаритной обзорной РЛС. *Спецтехника и связь. РОСНОУ. Научно-технический журнал*, 2015, № 2. URL: <http://www.st-s.su/archive/articles/1606328590> (дата обращения 28.06.2015).
- [2] Былдин А.Ю., Жураковский В.Н., Кондрашов К.С. Алгоритм защиты от активных помех в РЛС на подвижном основании. *Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 10. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/737934.html> (дата обращения 28.06.2015).
- [3] Понтрягин Л.С. *Принцип максимума в оптимальном управлении*. Москва, Едиториал УРСС, 2004, 64 с.
- [4] Кондрашов К.С., Жураковский В.Н., Силин С.И. Принципы проектирования встраиваемых систем на основе программных средств. *Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 11. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/738746.html> (дата обращения 28.06.2015).

УДК 629.424.1

## Оценка технического состояния тепловозного дизеля в эксплуатации

© Валиев Мухаммад Шералиевич, Файзыбаев Шерзад Собирович

Республика Узбекистан, г. Ташкент, Ташкентский институт  
инженеров железнодорожного транспорта

[valiev.m.sh@gmail.com](mailto:valiev.m.sh@gmail.com)

*Повышение эксплуатационной экономичности и надежности тепловозов требует непрерывного контроля технического состояния их оборудования в процессе эксплуатации. Для непрерывного контроля коэффициента избытка воздуха в цилиндре дизеля может использоваться широкополосный датчик содержания кислорода в отработавших газах (ОГ), предназначенный для косвенной оценки состава смеси, сгорающей в цилиндрах двигателя, по содержанию кислорода в ОГ.*

**Ключевые слова:** датчик содержания кислорода, коэффициент избытка воздуха, топливная аппаратура, цилиндро-поршневая группа.

Задача достоверной оценки качества рабочего процесса в цилиндрах тепловозного дизеля и технического состояния определяющих его узлов топливной аппаратуры и цилиндро-поршневой группы в настоящее время решается в основном стационарными средствами диагностики, чаще всего на основании анализа индикаторной диаграммы рабочего процесса. Использование такого подхода для непрерывного контроля технического состояния тепловозного дизеля при эксплуатации невозможно по ряду причин, одной из которых является отсутствие технической возможности непрерывного измерения давления в цилиндре дизеля, которое необходимо для снятия индикаторной диаграммы. В связи с этим актуальной является задача разработки методов интегральной оценки качества рабочего процесса в цилиндре тепловозного дизеля с использованием ограниченного набора параметров, контролируемых современными средствами автоматического управления силовой установки тепловоза.

Температура отработавших газов (ОГ) на выходе из цилиндров дизеля — один из важнейших диагностических параметров дизеля. Ее значение в каждый момент времени обусловлено действием целого ряда разнообразных факторов, связанных как с техническим состоянием основных агрегатов двигателя, так и с режимом его работы. Обязательный периодический контроль значения этого параметра предусмотрен правилами реостатных испытаний всех серий тепловозов. С целью повышения достоверности оперативного контроля технического состояния дизеля уже на протяжении ряда лет все современные тепловозные дизели оборудуются термокомплектами, обеспечивающими возможность непрерывного измерения температуры ОГ в процессе эксплуатации.

Вместе с тем наличие множества факторов, влияющих на значение температуры ОГ, снижает информативность данного параметра, вследствие чего эффективность использования средств контроля температуры ОГ весьма невелика. Информативность температуры ОГ можно существенно повысить, если использовать ее совместно с коэффициентом избытка воздуха, характеризующим как качество смесеобразования в цилиндре дизеля, так и режим его работы.

Коэффициент избытка воздуха — один из основных параметров рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания, во многом определяющий показатели его надежности и экономичности при эксплуатации.

С коэффициентом избытка воздуха непосредственно связаны значения целого ряда других показателей рабочего процесса двигателя, прежде всего температуры ОГ. Соответствие относительных изменений значений коэффициента избытка воздуха и температуры ОГ является диагностическим параметром, характеризующим техническое состояние цилиндров двигателя [1].

В дизелях средней и большой мощности (тепловозных и судовых) такие датчики пока находят ограниченное применение, в основном для улучшения экологических показателей двигателей [2].

Непрерывное увеличение уровня форсирования дизелей современных тепловозов при одновременном ужесточении требований к их экологическим показателям обуславливает необходимость повышения качества управления силовой установкой тепловоза в переходных режимах работы. Использование коэффициента избытка воздуха в качестве интегрального показателя текущего качества рабочего процесса в цилиндрах дизеля является существенным резервом повышения качества переходных процессов дизеля.

Основным элементом устройства является датчик содержания кислорода в ОГ дизеля. В настоящее время такие датчики ( $\lambda$ -зонды) широко применяются в системах

управления автомобильных двигателей для оптимизации процесса регулирования топливоподачи как в установившихся, так и в переходных режимах работы. В бензиновых двигателях чаще используется так называемый узкополосный датчик, который является эффективным детектором стехиометрического состава смеси, позволяющим современным системам управления автомобильными двигателями поддерживать значение  $\alpha_{\text{ц}} = 1$  с точностью  $\pm 1\%$ . Этим достигается как высокая топливная экономичность двигателя, так и увеличение ресурса работы каталитических нейтрализаторов. Однако использовать этот датчик для контроля значения коэффициента избытка воздуха в бедных смесях ( $\alpha_{\text{ц}} > 1$ ) практически невозможно. Для этих целей применяются так называемые широкополосные датчики содержания кислорода в ОГ.

Широкополосные датчики имеют две ячейки — измерительную и ячейку накачки. Ячейка накачки представляет собой гальванический элемент с твердым керамическим циркониевым электролитом, оба электрода которого омываются ОГ. Внешний электрод погружен в поток ОГ выпускного коллектора, к внутреннему электроду ОГ подводятся через специальное отверстие (диффузионный барьер) в твердом электролите. Прикладываемая к электродам ячейки накачки, можно управлять переносом ионов кислорода между электродами ячейки.

При положительном потенциале входа  $I_p$  относительно входа  $V_s/I_p$  перенос кислорода будет осуществляться от внутреннего электрода ячейки накачки к внешнему, при отрицательном потенциале  $I_p$  — в противоположном направлении. Изменяя величину тока  $I_p$  (напряжение между электродами ячейки накачки), можно добиться удаления из ячейки всего кислорода. Необходимое для этого значение тока  $I_p$  будет зависеть от содержания кислорода в ОГ. Таким образом, постоянно поддерживая в ячейке накачки нулевое содержание ионов кислорода, можно по величине необходимого для этого тока  $I_p$  оценивать содержание кислорода в ОГ.

Измерительная ячейка датчика предназначена для контроля содержания кислорода в ячейке накачки. Ее внешний электрод находится внутри ячейки накачки, вследствие чего выходное напряжение  $U_s$  измерительной ячейки характеризует соотношение концентрации кислорода в ячейке накачки и атмосферном воздухе. При отсутствии кислорода на внешнем электроде циркониевого гальванического элемента это напряжение равно 450 мВ. Таким образом, поддерживая напряжение  $U_s = 450$  мВ за счет изменения тока накачки  $I_p$ , можно по значению этого тока оценивать содержание кислорода в ОГ дизеля [3].

## Литература

- [1] Грачев В.В., Валиев М.Ш. Оценка технического состояния тепловозного дизеля по данным бортовой микропроцессорной системы управления. *Известия ПГУПС*, 2010, вып. 1, с. 22–32.
- [2] Амбросов Д.Б. *Контроль удельных выбросов оксидов азота при упрощенных измерениях на борту судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГАВТ, 2004, 143 с.
- [3] Погодин С.И. *Рабочие процессы транспортных турбопоршневых двигателей*. Москва, Машиностроение, 1978, 312 с.

## К вопросу о создании математической модели динамики самолета

© Волошин Владимир Андреевич, Верещиков Дмитрий Викторович

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

[yovanello-p.s90@yandex.ru](mailto:yovanello-p.s90@yandex.ru)

*Изучение пилотажных характеристик самолетов имеет важное значение для решения задач проектирования и модернизации авиационных комплексов, а также обеспечения безопасности полетов. Поэтому авиационному инженеру необходим инструмент для исследования динамики самолетов с учетом особенностей функционирования высокоавтоматизированных систем управления в широком диапазоне эксплуатационных параметров (высоты скорости, массы, центровки, варианты вооружения и целевых задач пилотирования). В качестве такого инструмента целесообразно использовать программно-моделирующие комплексы. В большинстве случаев эта работа выполняется комплексно путем полунатурного моделирования с использованием математических моделей, специализированного или прикладного программного обеспечения, пилотажных стендов и проведения летных экспериментов.*

**Ключевые слова:** программно-моделирующий комплекс, математическая модель, динамика самолета.

Основой программно-моделирующего комплекса динамики самолета является математическая модель — сложная система, включающая в себя математические модели различных подсистем, в частности, модель аэродинамики самолета, модель системы управления, модель двигателей и т. д. Структура математической модели динамики самолета показана на рис. 1.

Представленная модель состоит из взаимодействующих между собой блоков и подблоков. Графическое представление процессов широко используется в различных направлениях. В наибольшей мере это относится к алгоритмам систем управления. Поэтому наиболее удобным способом создания математических моделей является визуальное программирование, т. е. графическое составление моделей из блоков и соединение их между собой на экране монитора.

Главное окно математической модели летательного аппарата, выполненной в среде Simulink, представлено на рис. 2. В модели размещены следующие основные элементы: блок расчета системы уравнений пространственного движения, записанных в углах Эйлера, блок реального времени, блоки расчета сил и моментов, блок приема сигналов с командных рычагов управления, блоки описания системы управления самолета и другие вспомогательные блоки.

Основным элементом, в котором осуществляется расчет пространственного движения летательного аппарата, является блок системы уравнений пространственного движения самолета с грузом в углах Эйлера. При формировании данного

блока использовалась полная система дифференциальных уравнений без каких-либо упрощений относительно инерционных моментов, связанных с ускорением центра масс самолета. Блок учитывает влияние несимметрично размещенного груза на движение самолета в зависимости от массы груза и его взаимного расположения с самолетом.

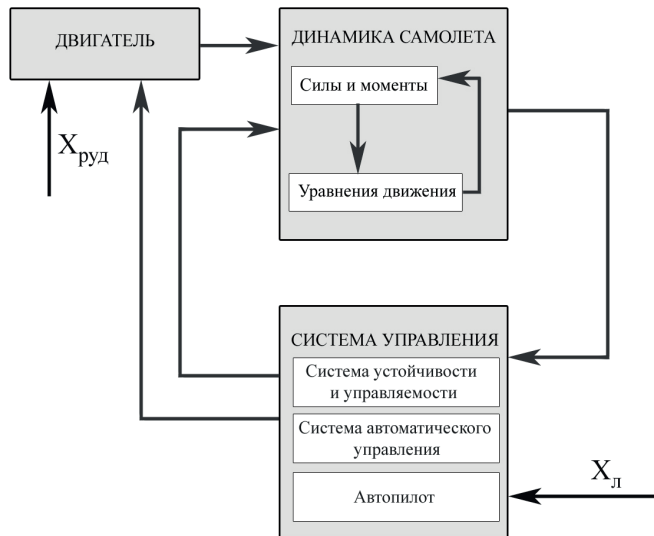


Рис. 1. Структура математической модели динамики самолета с высокоавтоматизированной системой управления

Для его функционирования на вход блока необходимо подать 10 сигналов: три составляющих силы, три составляющих момента, масса летательного аппарата с грузом, моменты инерции самолета с грузом, масса груза и координаты центра масс груза относительно центра масс самолета без груза.

Для определения составляющих сил и моментов, действующих на летательный аппарат, используются аэродинамическая модель самолета, модель силовой установки и модель шасси самолета. Аэродинамическая модель формируется на основании банка данных аэродинамических характеристик, приведенных для жесткого самолета, т. е. без учета его упругих деформаций. Модель шасси рассчитывает силы и моменты в связанной системе координат для каждой опоры, затем они суммируются с силами и моментами из динамики самолета и подаются в блок системы дифференциальных уравнений.

При нахождении составляющих сил и моментов используются значения отклонения рулевых поверхностей, которые определяются непосредственно в модели системы управления. Сама модель системы управления формируется на основании алгоритмов высокоавтоматизированных систем управления современных самолетов, а управляющее воздействие осуществляется оператором через блок приема сигналов с командных рычагов управления.

Обеспечив взаимодействие между математическими моделями различных подсистем и вспомогательными блоками, получаем математическую модель динамики



самолета, позволяющую проводить исследования динамики движения самолета с учетом особенностей функционирования высокоавтоматизированных систем управления, влияния конструктивных и эксплуатационных факторов, а также целевых задач пилотирования.

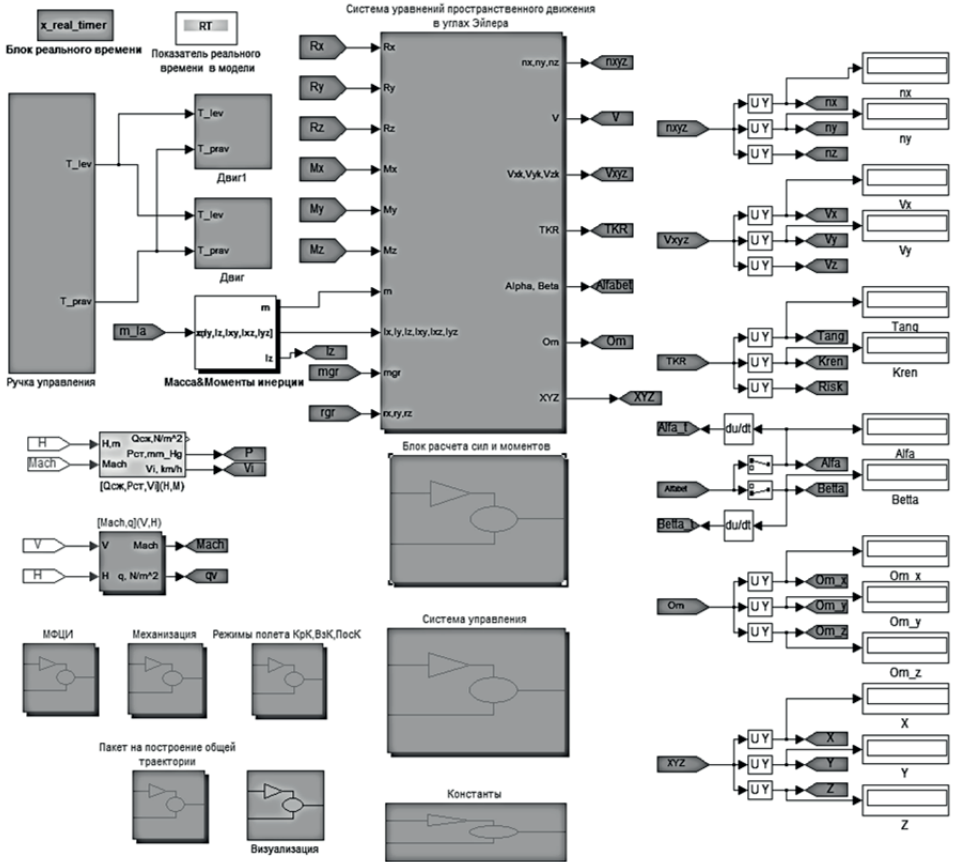


Рис. 2. Структура математической модели динамики самолета с системой управления

Литература

[1] Разработка методических алгоритмических и программных средств исследования динамики маневренных самолетов с высокоавтоматизированными системами управления. *Отчет по НИР № 1609351, Шифр «ВАСУ»*. Воронеж, 2014, 186 с.  
 [2] Костин П.С., Верещагин Ю.О., Волошин В.А. Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики маневренного самолета. *Тр. МАИ*, 2015, № 81, с. 1–30.  
 [3] Кувшинов В.М. Программный комплекс моделирования динамики ЛА с системой управления в среде MATLAB/Simulink. *Тр. Междунар. конф. «Тренажерные технологии и обучение»*. Жуковский, 24–25 мая 2001. Жуковский, 2001, с. 91–99.

УДК 623.56

## Изучение действия противоккумулятивных устройств

© Горбатенко Анастасия Анатольевна, Кобылкин Иван Фёдорович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[selenta92@mail.ru](mailto:selenta92@mail.ru)

*В работе исследованы два перспективных направления решения проблемы, возникающей при использовании взрывной динамической защиты для защиты бронетехники от кумулятивных средств поражения — образование при ее срабатывании высокоскоростных фрагментов, представляющих большую опасность для пехоты и техники, окружающих защищаемый объект, а также интенсивные ударное и взрывное воздействия на защищаемый объект.*

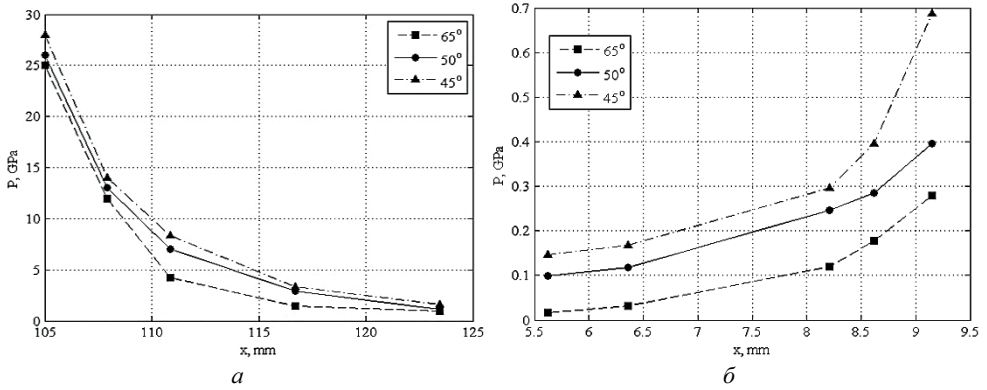
**Ключевые слова:** кумулятивные средства поражения, динамическая защита, ударное и взрывное воздействие, ударно-проникающее действие.

Одной из проблем, возникающей при использовании взрывной динамической защиты (ДЗ) для бронетехники от кумулятивных средств поражения (КСП), является образование при ее срабатывании высокоскоростных фрагментов, представляющих большую опасность для пехоты и техники, окружающих защищаемый объект, а также интенсивные ударное и взрывное воздействия на защищаемый объект. Особенно остро эта проблема проявляется при защите легкобронированной техники от действия КСП. Можно выделить два перспективных направления решения этой проблемы.

1) использование невзрывной динамической защиты на основе плоских элементов (ЭДЗ), в которых между металлическими пластинами вместо ВВ размещается слой инертного или локально реагирующего с малым энерговыделением материала. Для изучения механизмов взаимодействия кумулятивной струи (КС) ЭДЗ с инертным снаряжением были проведены численные расчеты в трехмерной постановке в пакете Ansys Autodyn.

В качестве материала наполнителя использовались оргстекло, полиакрилат, вода, парафин и фторопласт. Угол наклона ЭДЗ к направлению воздействия КС составлял 25, 30 и 45°. При проникании (КС) через такой ЭДЗ в его наполнителе формируется расходящаяся ударная волна (УВ). Ускорение пластин осуществляется под действием давления за фронтом УВ, из-за сильного затухания которой оно локализуется в области воздействия КС (рис. 1). Возникшее движение перемещает на траекторию КС непробитые участки пластины, что приводит к повреждению части КС и снижению ее проникающей способности (рис. 2).

В результате проведенных расчетов было установлено, что основным параметром, определяющим скорость разгона пластин и, следовательно, защищающую способность ДЗ, является акустический импеданс материала наполнителя. Вследствие локального ускорения пластин невзрывная ДЗ характеризуется умеренной эффективностью по сравнению с взрывной ДЗ;



**Рис. 1.** Зависимость давления нагружения от угла наклона ЭДЗ:  
 а — для нижней части элемента; б — для верхней части элемента



**Рис. 2.** Взаимодействие КС с невзрывным ЭДЗ, снаряженным оргстеклом. Толщина обкладок 2 мм, толщина слоя оргстекла 6 мм

2) снижение опасности ЭДЗ основано на использовании в качестве обкладок ЭДЗ пластин из материалов, которые разрушаются при взрыве заряда ВВ на мелкие частицы, не обладающие существенным ударно-проникающим действием на небольшом расстоянии от устройства ДЗ. Известно много хрупких (стекла, керамика) и прессованных из порошков материалов, которые при взрыве разрушаются подобным образом. Для сравнительного изучения механики взаимодействия КС с пластинами из различных материалов в пакете Ansys Autodyn было выполнено трехмерное численное моделирование процессов взаимодействия КС с ЭДЗ, снаряженными ВВ, с керамическими и стальными пластинами.

Конфигурация взаимодействия КС с ЭДЗ с керамическими пластинами-обкладками показана на рис. 3.



**Рис. 3.** Взаимодействие КС с взрывным ЭДЗ с керамическими пластинами-обкладками из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в момент времени 12 мкс. Угол наклона ЭДЗ к КС 30°

При взаимодействии керамических пластин со струей после прохождения детонации они разрушаются и образуют плотный поток осколков, который эффективно воздействует на КС и в тоже время оказывает слабое воздействие на более удаленный защищаемый объект при соударении с ним. При численном моделировании после разрушения керамика остается сплошной, но плотность ее уменьшается. При равной массе стальных и керамических пластин-обкладок защищающие способности ЭДЗ оказались примерно одинаковыми.

### Литература

- [1] Григорян В.А., ред. *Частные вопросы конечной баллистики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 592 с.
- [2] Орленко Л.П. ред. *Физика взрыва*, т. 2. Москва, Физматлит, 2002, 654 с.
- [3] Кобылкин И.Ф. и др. Невзрывная противоккумулятивная динамическая защита. *Оборонная техника*, 2002, № 1–2.
- [4] Bianchi S., Kaufmann H., Koch A. Effect of Ceramics, Fibre Reinforced Plastics and Aluminium Used as Confinement Plates for Explosive Reactive Armors. *The 24 Intern. Symp. on Ballistics. New Orleans, USA, 2008.*
- [5] Maiseless M., Bianchi S., Kaufmann H. Non Metallic Reactive Armor. *The 27 Intern. Symp. on Ballistics. Freiburg. Germany. 2013.*
- [6] Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Боеприпасы и средства поражения. Москва, *Оружие и технологии*, 2006, т. 12, 847 с.
- [7] Holmquist T.J., Johnson G.R., Grady D.E. High Strain Rate Properties and Constitutive Modeling of Glass. *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Ballistics*. Jerusalem, Israel, 1995.

УДК 623.418.42

## **Влияние точности измерения начальной скорости снарядов с управляемым дистанционным взрывателем на их эффективность**

© Губский Павел Михайлович, Оркин Борис Давидович

Россия, г. Москва, ОАО «Научно-производственное объединение “Прибор”»

[89117231725@mail.ru](mailto:89117231725@mail.ru)

*Исследована эффективность малокалиберных артиллерийских комплексов, оснащенных системой управляемого дистанционного подрыва снарядов. Проанализирована возможность снижения рассеивания точек подрыва снарядов по дальности путем измерения фактической начальной скорости снаряда и ее учета при программировании взрывателя. Оценен реализуемый прирост эффективности, сформулированы рекомендации по применению рассматриваемых систем вооружения.*

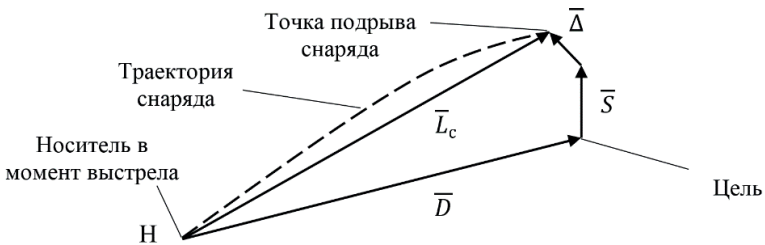
**Ключевые слова:** малокалиберный артиллерийский комплекс, дистанционный подрыв, измерение начальной скорости, эффективность, рассеивание.

Исследования, проведенные в России и за рубежом, показывают, что значительного повышения эффективности малокалиберных артиллерийских комплексов (МАК) можно добиться, в первую очередь, за счет оснащения их системой управляемого дистанционного подрыва снарядов (СУДПС). Так, применение СУДПС в составе МАК БМП позволяет повысить эффективность поражения танкоопасной живой силы (ТОЖС) не менее чем в 2,5 раза [1].

Большое влияние на эффективность МАК с СУДПС оказывает рассеивание точек подрыва снарядов по дальности. Существенный вклад в формирование индивидуальной ошибки положения точки подрыва по дальности вносит рассеивание начальной скорости снаряда  $V_0$ , что обусловлено высокой чувствительностью дальности полета снаряда с управляемым дистанционным взрывателем (УДВ) к отклонению  $V_0$ , а также значительным разбросом ее значений от выстрела к выстрелу.

Одним из способов снижения влияния рассматриваемого фактора на эффективность МАК с СУДПС является оснащение их системой измерения  $V_0$  и учет полученной оценки  $V_0$  при вычислении времени подрыва, передаваемого в УДВ при его программировании [2]. Программирование осуществляется в момент выхода снаряда из дульный срез орудия или на начальном участке траектории.

В предлагаемой работе описан алгоритм вычисления поправки на время подрыва, учитывающей измерение  $V_0$  при стрельбе по неподвижной наземной цели. Векторная схема стрельбы снарядом с УДВ по такой цели представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Векторная схема стрельбы снарядом с УДВ по неподвижной цели:  $\vec{L}_c$  — вектор перемещения снаряда;  $\vec{D}$  — вектор дальности «носитель — цель»;  $\vec{S}$  — вектор поправки, определяющий положение точки подрыва снаряда относительно цели;  $\bar{\Delta}$  — вектор промаха

Очевидно, что вектор  $\vec{L}_c$  является функцией многих переменных, задающих условия стрельбы, но далее указывается его зависимость только от  $V_0$  и полетного времени снаряда  $t$ , определяемого моментом срабатывания УДВ. Векторы  $\vec{D}$  и  $\vec{S}$  — константы.

Из векторной схемы (см. рис. 1) следует векторное уравнение для оценки расчетного значения промаха  $\bar{\Delta}_p$ , вычисляемой при отклонении измеренного значения  $V_0$  от номинала и введении поправки на его заданное полетное время:

$$\bar{\Delta}_p = \vec{L}_c (V_{0ном} + \Delta V_{0изм}, t_{30} + \Delta t_3, \dots) - \vec{D} - \vec{S}, \quad (1)$$

где  $V_{0ном}$  — номинальное значение  $V_0$ , м/с;  $\Delta V_{0изм}$  — отклонение измеренного значения  $V_0$  от номинала, м/с;  $t_{30}$  — заданное полетное время снаряда, вычисленное при

номинальной  $V_0$ , с;  $\Delta t_3$  — поправка на заданное полетное время снаряда, учитывающая отклонение  $V_0$  от номинала, с.

Очевидно,

$$\bar{L}_c(V_{0\text{ном}}, t_{30}, \dots) - \bar{D} - \bar{S} = 0, \quad (2)$$

так как задача стрельбы решается до измерения  $V_0$ .

Используя разложение уравнения (1) в ряд Тейлора до слагаемых первого порядка малости и учитывая (2), получаем:

$$\bar{\Delta}_p = \bar{k} \Delta V_{0\text{изм}} + \bar{V}_c \Delta t_3, \quad (3)$$

где

$$\bar{k} = \frac{\partial \bar{L}_c}{\partial V_0}, \quad \bar{V}_c = \frac{\partial \bar{L}_c}{\partial t}. \quad (4)$$

Очевидно,  $\bar{V}_c$  — вектор скорости снаряда в точке его подрыва.

Поправка по времени должна минимизировать модуль вектора промаха. Нетрудно показать, что он минимален, если скалярное произведение

$$\langle \bar{\Delta}_p, \bar{V}_c \rangle = 0. \quad (5)$$

Из (3)–(5) следует

$$\langle \bar{k}, \bar{V}_c \rangle \Delta V_{0\text{изм}} + \langle \bar{V}_c, \bar{V}_c \rangle \Delta t_3 = 0. \quad (6)$$

Разрешая (6) относительно поправки по времени, находим

$$\Delta t_3 = - \left( \langle \bar{k}, \bar{V}_c \rangle / V_c^2 \right) \Delta V_{0\text{изм}}. \quad (7)$$

Таким образом, получено выражение, позволяющее вычислить поправку на полетное время, которая учитывает отклонение измеренного значения  $V_0$  от номинала и может быть введена в УДВ при программировании.

Реальный промах  $\bar{\Delta}_{V_0}$ , возникающий при отклонении фактического значения  $V_0$  от номинала и введении рассмотренной выше поправки на полетное время, по аналогии с выражением (3), определяется соотношением

$$\bar{\Delta}_{V_0} = \bar{k} \delta V_{0\text{балл}} + \bar{V}_c \Delta t_3, \quad (8)$$

где  $\delta V_{0\text{балл}}$  — отклонение фактического значения  $V_0$  от номинала, вызванное разбросом внутривалистических параметров, м/с. При этом предполагается, что поле допуска на массу снаряда  $m$  невелико и ее вклад в разброс фактических  $V_0$  мал.

Отметим, что

$$\Delta V_{0\text{изм}} = \delta V_{0\text{балл}} + \delta V_{0\text{изм}}, \quad (9)$$

где  $\delta V_{0\text{изм}}$  — ошибка измерения фактического значения  $V_0$ , м/с.

Тогда, подставляя в (8) выражения (7) и (9), получаем

$$\bar{X}_{V_0} = \bar{k} \delta V_{0\text{балл}} - \bar{V}_c \left( \langle \bar{k}, \bar{V}_c \rangle / V_c^2 \right) (\delta V_{0\text{балл}} + \delta V_{0\text{изм}}). \quad (10)$$

Введем правую систему координат  $D$ . Ее ось  $OX$  направлена вдоль вектора  $\bar{D}$ , а ось  $OY$  лежит в вертикальной плоскости, проходящей через него и направлена вверх. Начало отсчета — точка  $H$  (см. рис. 1).

Запишем уравнение (10) в системе координат  $D$ :

$$\Delta_{xV_0} = k_x \delta V_{0\text{балл}} - V_{cx} \left[ (k_x V_{cx} + k_y V_{cy}) / V_c^2 \right] (\delta V_{0\text{балл}} + \delta V_{0\text{изм}}); \quad (11)$$

$$\Delta_{yV_0} = k_y \delta V_{0\text{балл}} - V_{cy} \left[ (k_x V_{cx} + k_y V_{cy}) / V_c^2 \right] (\delta V_{0\text{балл}} + \delta V_{0\text{изм}}), \quad (12)$$

где  $\Delta_{xV_0}$ ,  $\Delta_{yV_0}$ ,  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $V_{cx}$ ,  $V_{cy}$  — проекции векторов  $\bar{\Delta V_0}$ ,  $\bar{k}$  и  $\bar{V}_c$  на оси координат  $OX$  и  $OY$  системы  $D$ , соответственно.

*Примечание.* Проекция вектора  $\bar{\Delta V_0}$  на ось  $OZ$  является величиной высшего порядка малости и не рассматривается.

Из (11) и (12) находим:

$$\Delta_{xV_0} = k_x \left[ (s^2 - sc k_y / k_x) \delta V_{0\text{балл}} - (c^2 + sc k_y / k_x) \delta V_{0\text{изм}} \right]; \quad (13)$$

$$\Delta_{yV_0} = k_y \left[ (c^2 - sc k_x / k_y) \delta V_{0\text{балл}} - (s^2 + sc k_x / k_y) \delta V_{0\text{изм}} \right], \quad (14)$$

где

$$c = V_{cx} / V_c; \quad s = V_{cy} / V_c. \quad (15)$$

При стрельбе на эффективную дальность для МАК высокой баллистики  $c \approx 1$ ,  $s$  — малая величина, а коэффициент чувствительности  $k_x$  значительно больше чем  $k_y$ . Тогда

$$\Delta_{xV_0} = k_x \delta V_{0\text{изм}}; \quad \Delta_{yV_0} = k_y \left[ (1 - s k_x / k_y) \delta V_{0\text{балл}} - (s k_x / k_y) \delta V_{0\text{изм}} \right]. \quad (16)$$

Отсюда следует:

$$\sigma_{xV_0} = |k_x| \sigma_{V_0\text{изм}}; \quad \sigma_{yV_0} = |k_y| \sqrt{(1 - s k_x / k_y)^2 \sigma_{V_0\text{балл}}^2 + (s k_x / k_y)^2 \sigma_{V_0\text{изм}}^2}, \quad (17)$$

где  $\sigma_{xV_0}$ ,  $\sigma_{yV_0}$  — среднеквадратические отклонения (СКО) координат точек подрыва снаряда, обусловленные разбросом фактических значений  $V_0$  и ошибкой их измерения, м;  $\sigma_{V_0\text{балл}}$  — СКО значений  $V_0$ , обусловленное разбросом внутрибаллистических факторов, м/с;  $\sigma_{V_0\text{изм}}$  — СКО ошибки измерения  $V_0$ , м/с.

В случае отсутствия системы измерения  $V_0$  СКО координат точек подрыва определяются следующими выражениями:

$$\sigma_{xV_0} = |k_x| \cdot \sigma_{V_0\text{балл}}; \quad \sigma_{yV_0} = |k_y| \cdot \sigma_{V_0\text{балл}}. \quad (18)$$

Таким образом, оценка эффективности выполнена для МАК с СУДПС, установленного на БМП. В качестве цели рассмотрена живая сила (ЖС) в средствах индивидуальной бронезащиты (СИБ) III класса в положении «лежа». Стрельба ведется очередью

на дистанцию 1000 м, длина очереди — 8 выстрелов. Критерий эффективности — вероятность поражения цели одной очередью  $P$ . Принята схема двух групп ошибок. СКО групповой ошибки по дальности  $\sigma_{xГ}$  варьируется в пределах от 0 до 20 тыс. дист., СКО суммарных ошибок по высоте и направлению приняты равными 1,5 тыс. дист. СКО индивидуальной ошибки по дальности  $\sigma_{xИ}$  определяется по формуле

$$\sigma_{xИ} = \sqrt{\sigma_{xV0}^2 + \sigma_{xV0}^2}, \quad (19)$$

где  $\sigma_{xV0}$  — СКО индивидуальной ошибки положения точек подрыва по дальности, вызванной действием всех факторов, формирующих эту ошибку, за исключением отклонения  $V_0$  от номинала и ошибки ее измерения.

Принято, что  $\sigma_{xV0} = 2$  тыс. дист,  $\sigma_{V0\text{балл}} = 8$  м/с, а  $\sigma_{V0\text{изм}}$  варьируется от 0 до 8 м/с.

Зависимость от  $\sigma_{V0\text{изм}}$  при различных  $\sigma_{xГ}$  на рис. 2 в представлены значения отношения  $P_{V0}/P_{шт}$ , где  $P_{V0}$  — вероятность поражения цели при измерении  $V_0$ ;  $P_{шт}$  — вероятность поражения цели штатным комплексом, в котором  $V_0$  не измеряется.

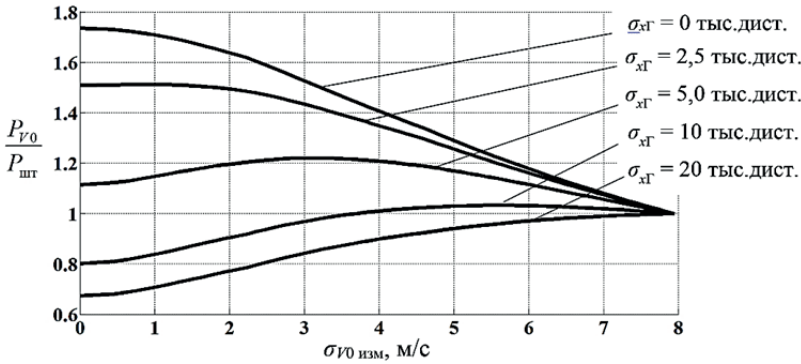


Рис. 2. Относительное изменение эффективности при измерении  $V_0$

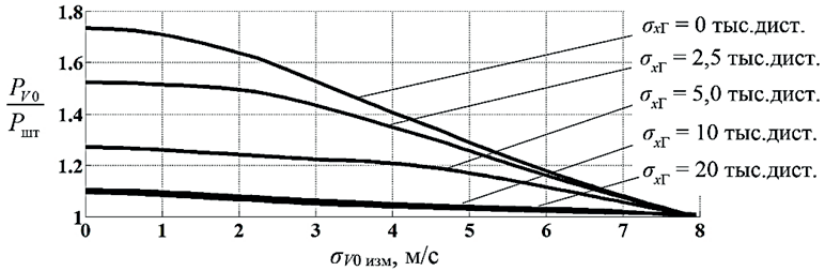
Анализ рис. 2 показывает, что при  $\sigma_{xГ} > 0$  оптимальное значение СКО ошибки измерения  $V_0$   $\sigma_{V0\text{изм}}^{opt} > 0$ , при котором  $P$  максимальное. В случае  $\sigma_{V0\text{изм}} < \sigma_{V0\text{изм}}^{opt}$  необходимо вводить управляемое искусственное рассеивания (ИР) математических ожиданий (МО) точек подрыва по дальности [3]. Зависимости  $P_{V0}/P_{шт}$  от  $\sigma_{V0\text{изм}}$  в случае ИР МО точек подрыва с оптимальным постоянным шагом по дальности представлены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что при ИР МО точек подрыва по дальности  $P$  растет непрерывно с уменьшением  $\sigma_{V0\text{изм}}$ .

В условиях данного расчета сделаны следующие выводы:

- зависимость  $P(\sigma_{V0\text{изм}})$  при отсутствии ИР МО точек подрыва и  $\sigma_{xГ} > 0$  имеет максимум при  $\sigma_{V0\text{изм}}^{opt} > 0$ . Значение  $\sigma_{V0\text{изм}}^{opt}$  увеличивается с ростом  $\sigma_{xГ}$ . В случае  $\sigma_{xГ} = 5,0$  тыс. дист.  $\sigma_{V0\text{изм}}^{opt} \approx 3$  м/с и максимальный прирост  $P$  составляет  $\sim 1,2$  раза;





**Рис. 3.** Относительное изменение эффективности при измерении  $V_0$  и ИР МО точек подрыва снарядов с оптимальным постоянным шагом по дальности

- при измерении  $V_0$  с  $\sigma_{V0 \text{ изм}} < \sigma_{V0 \text{ изм}}^{opt}$  необходимо применение ИР МО точек подрыва по дальности, в противном случае эффективность стрельбы будет снижаться;
- при  $\sigma_{хГ} > 10$  тыс. дист. максимальный возможный прирост  $P$  за счет измерения  $V_0$  при ИР МО точек подрыва по дальности не превышает  $\sim 1,1$  раза;
- измерение  $V_0$  с СКО меньшим чем  $\sim 2$  м/с не является целесообразным при реальных значениях  $\sigma_{хГ}$ , поскольку при дальнейшем уменьшении  $\sigma_{V0 \text{ изм}}$  не происходит существенного прироста  $P$ ;
- теоретический максимальный прирост  $P$  за счет измерения  $V_0$  (при точном измерении  $V_0$  и  $\sigma_{хГ} = 0$ ) составляет  $\sim 1,75$  раза;
- в случае  $\sigma_{хГ} = 5,0$  тыс.дист.  $\sigma_{V0 \text{ изм}} = 2$  м/с и ИР МО точек подрыва по дальности может быть достигнуто увеличение  $P$  в  $\sim 1,25$  раза.

### Литература

- [1] Чижевский О.Т., Аманов В.В., Есиев Р.У., Оркин Б.Д., Губский П.М. Повышение эффективности малокалиберных артиллерийских и гранатометных комплексов благодаря реализации управляемого дистанционного подрыва боеприпасов. *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*, 2011, № 3, с. 21–25.
- [2] Andre Boss. Pat USA. *Method for determining the disaggregation time, in particular of a programmable projectile*. No 5,814,755. F42C 13/00, заявл. 14.10.1996 г., опубл. 29.09.1998.
- [3] Губский П.М. Управление подрывом снарядов с управляемым дистанционно-контактным взрывателем при стрельбе с авиационного носителя по наземной цели. *Труды МАИ. Электрон. журнал*, 2012, № 62. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35503> (дата обращения 25.12.2012).

## Применение спектрального анализа при обнаружении сигналов

©Еременков Алексей Игоревич, Жураковский Валерий Николаевич

Россия, г. Москва, Научно-исследовательский институт  
специального машиностроения при МГТУ им. Н.Э. Баумана

[sm2-2@inbox.ru](mailto:sm2-2@inbox.ru)

*В процессе приема радиолокационных сигналов могут возникать проблемы, затрудняющие их обнаружение во временной области. В таких случаях целесообразно использовать другие методы обработки принимаемых сигналов. Рассмотрены четыре варианта обнаружителей, использующих спектральный анализ для обнаружения радиолокационных сигналов в условиях априорной неопределенности. Первый обнаружитель предназначен для обнаружения короткого сигнала без несущей, остальные оценивают наличие сигнала с несущей по свойствам спектра принятой реализации. Проведено моделирование всех обнаружителей, выявлены недостатки и достоинства каждого из вариантов.*

**Ключевые слова:** обнаружитель, спектральный анализ, радиолокационный сигнал, временная область, частотная область, порог обнаружения, распределение шумов.

В процессе приема радиолокационных сигналов могут возникать проблемы, затрудняющие их обнаружение во временной области, например, когда сигналы на разной частоте принимаются в один момент времени. Поэтому целесообразно использовать другие методы обработки принимаемых сигналов [1–3]. В статье рассмотрены некоторые варианты обнаружителей, использующих спектральный анализ для обнаружения радиолокационных сигналов в условиях априорной неопределенности. В задачах обнаружения и распознавания в условиях априорной неопределенности крайне важна высокая точность измерения параметров сигналов. Методы, используемые для ее повышения, описаны в [4].

Поставленная задача включает в себя ряд подзадач:

- 1) определить статистику, которая подвергается сравнению с порогом;
- 2) оценить распределение шумов для этой величины;
- 3) определить порог.

Различные подходы к решению выделенных подзадач обуславливались разными вариантами обнаружителей. В статье описано четыре варианта адаптивных обнаружителей. Подробнее о них рассказано в [5, 6].

Первый обнаружитель предназначен для обнаружения короткого сигнала без несущей. Короткий сигнал дает очень малый вклад в мощность длинной реализации. Поэтому он может быть трудно различим на фоне шумов, интенсивность которых рассчитана по исходной реализации. Для улучшения характеристик обнаружения такого сигнала утверждают, что энергия сигнала лежит в области низких частот, поэтому отбрасывают верхние частоты, переводят сигнал обратно во временную область и, по новой реализации, оценивают наличие или отсутствие сигнала.

Остальные варианты обнаружителей оценивают наличие сигнала с несущей по свойствам спектра принятой реализации. Так, во втором варианте рассматриваемого обнаружителя за сравниваемую величину берется отношение сумм спектральных компонент, превысивших определенный порог (рассчитываемый по данной реализации) и не превысивших его.

В третьем варианте ищется максимальный пик спектра и, предполагая, что этот пик соответствует сигналу, в стороне от него меряются шумы. А затем СПМ сравнивается с рассчитанным по критерию Неймана — Пирсона порогом.

В четвертом варианте предполагается, что отсчеты спектра, соответствующие шумам, образуют кластер типичных значений, а отсчеты, соответствующие сигналу — аномальные значения. Соответственно, для принятия решения о наличии радиолокационного сигнала в реализации требуется определить, есть ли такие аномальные значения в принятых данных. Для этого строится сглаженная ПРВ, ядром сглаживания которой является функция, позволяющая получить вторую производную, которая позволит определить точки перегиба ПРВ.

В процессе работы было проведено моделирование всех вариантов обнаружителей, результаты которого показали, что при заданной вероятности ложной тревоги, начиная с определенного ОСШ, все обнаружители стабильно отмечают наличие сигнала в реализации. Самое малое значение ОСШ, при котором начинается стабильное обнаружение, относится ко второму варианту обнаружителей. Правда, этот же вариант больше всех подвержен срабатыванию по шумам.

К недостаткам перечисленных обнаружителей можно отнести следующее:

- неуниверсальность;
- невозможность обнаружения момента начала сигнала;
- плохая работа при наличии нескольких сигналов от разных источников в одной реализации;
- сложность алгоритма.

В связи с тем, что каждый из приведенных обнаружителей имеет свои недостатки, рационально улучшить их работу путем комбинирования.

## Литература

- [1] Супян А.Ю., Дворников С.В., Кудрявцев А.М., Устинов А.А., Ракицкий Д.С., Ровчак А.Ю. *Способ автоматического обнаружения узкополосных сигналов*. Пат. № 2382495 РФ, 2010.
- [2] Алексеев Ю.Л., Дворников С.В., Егоров С.А., Казаков Е.В., Кукушкин Р.Е., Мандрик И.В., Устинов А.А., Чихонадских А.П. *Способ автоматического обнаружения сигналов*. Пат. № 2480901 РФ, 2011.
- [3] Андриянов С.В., Дворников С.В., Дворников С.С., Егоров С.А., Казаков Е.В., Погорелов А.А., Устинов А.А., Чихонадских А.П. *Способ обнаружения сигналов без несущей*. Пат. № 2484581 РФ, 2012.
- [4] Логвиненко А.С., Жураковский В.Н. Повышение точности измерения параметров сигналов в цифровом тракте. *Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* 2014. №10, Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/740571.html> (Дата обращения 16.05.2015).
- [5] Логвиненко А.С. Цифровой обнаружитель с адаптивным порогом. *Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 1. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/736868.html> (дата обращения 20.05.2015).
- [6] Жураковский В.Н., Мусьяков М.П., Шанаев О.К. Синтез адаптивных алгоритмов распознавания при коротких обучающих выборках. *Радиотехника*, 1989, № 2.

УДК 623.56

## Влияние срабатывания реакционных материалов на действие кумулятивных боеприпасов

© Загрядцкий Филипп Сергеевич, Бабкин Александр Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[zagr-filipp@yandex.ru](mailto:zagr-filipp@yandex.ru)

*Исследовано поведение реакционных материалов в процессе срабатывания кумулятивных зарядов. Предпринята попытка постановки задачи математического моделирования с учетом возможности срабатывания реакционных материалов. Результаты, представленные в работе, позволяют предполагать отсутствие значительного негативного влияния срабатывающего реакционного материала на параметры нагружения кумулятивной облицовки.*

**Ключевые слова:** реакционные материалы, кумулятивные боеприпасы, кумулятивные заряды, запреградное действие.

Боеприпасы кумулятивного действия на данный момент являются самыми совершенными средствами уничтожения тяжелобронированной техники [1, 2]. Однако такие средства поражения при высоких показателях бронепробития обладают недостаточным запреградным действием. Эта проблема может быть решена использованием в их составе реакционных материалов (РМ). В данной работе исследовано поведение РМ в процессе срабатывания кумулятивных зарядов (КЗ).

Существует несколько возможных способов применения РМ в конструкции кумулятивных боевых частей ракет. Предпочтительным способом является использование РМ во внешнем слое кумулятивной облицовки (КО), внутренний слой которой изготовлен из традиционных материалов (медь, сталь и др.). Запреградное действие в таком случае будет обеспечиваться реагированием разрушающегося порошкового песта из РМ, проникающего в запреградный объем через пробойину, образованную монолитной струей, формируемой из внутреннего (струеобразующего) слоя облицовки. Такая конструкция облицовки кумулятивного заряда позволит сочетать высокую глубину пробития преграды с повышенным запреградным эффектом.

В работе [2] решена задача выбора рациональной геометрии двухслойной КО и толщины слоя РМ. Выбранная геометрия позволяла сохранить бронепробитие КЗ на уровне штатной однослойной. Также были проведены численные расчеты, подтвердившие возможность занесения определенного количества материала в заброневое пространство. Действие продуктов разложения проникшего РМ рассчитывалось с использованием программного комплекса равновесных термодинамических расчетов АСТРА 4 [3]. Однако расчеты проводились в предположении инертного поведения РМ в процессе срабатывания КЗ.

В данной работе предпринята попытка постановки задачи математического моделирования с учетом возможности срабатывания РМ. Моделировался процесс срабатывания КЗ с двухслойной облицовкой. Расчет проводился с позиции механики

сплошной среды на неподвижной «эйлеровой» сетке. При этом учитывался процесс энерговыделения и образования продуктов реакции в ходе срабатывания реакционного материала внешнего слоя облицовки. В качестве материалов внешнего слоя была выбрана порошковая композиция алюминий — фторопласт, материалом внутреннего слоя была выбрана медь.

Результаты, представленные в работе, дают возможность предполагать отсутствие значительного негативного влияния срабатывающего РМ на параметры нагружения КО. В то же время проведенные расчеты позволяют предположить возможность обеспечения достаточных параметров действия РМ в запреградном объеме.

### Литература

- [1] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Исследование противокумулятивной стойкости преград ячеистого типа с инертным и активным наполнителем. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму*, 2014, № 1–2, с. 89–99.
- [2] Загрядский Ф.С. Анализ возможности использования реакционных материалов в кумулятивных боеприпасах. *Будущее машиностроения России: сб. тр. Шестой всерос. конф. молодых ученых и специалистов*. Москва, 25–28 сентября 2013 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, с. 257–258.
- [3] Сиярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Мойсеев Г.К. *Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов*. Москва, Наука, 1982, 267 с.

УДК 629.73:355.404.4

## Разработка оперативно-тактического беспилотного самолета разведывательного назначения

© Камалов Рабадан Камалович, Агаев Руслан Нураддинович

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

[nurad@yandex.ru](mailto:nurad@yandex.ru)

*Исследовано влияние удлинения крыла беспилотного самолета-разведчика. построена зависимость массы силовой установки и крыла от удлинения. Установлено, что оптимальным можно считать такое удлинение крыла, при котором суммарная масса крыла, силовой установки и потребного запаса топлива будет минимальной.*

**Ключевые слова:** масса силовой установки, удлинение крыла, беспилотный самолет.

Важнейшая роль в современной войне отводится средствам разведки и освещения оперативной обстановки. Основная нагрузка по решению этой задачи возлагается на беспилотные авиационные системы (БАС). Эффективность использования БАС в значительной степени зависит от их тактико-технических показателей и характеристик, а также условий, в которых их применяют.

Беспилотные авиационные системы нашли самое широкое применение в боевых действиях. Начиная с войны во Вьетнаме (BQM-34), затем в Югославии БПЛА (Predator, Hunter, Pioneer), в Афганистане (в феврале 2001 года в США была проведена серия успешных испытаний по пуску управляемой ракеты Hellfire-C с БПЛА RQ-1 Predator). Применение БАС при ведении боевых действий против чеченских бандформирований отличается необоснованно слабым использованием возможностей беспилотной техники и ограничилось использованием в основном БПЛА «Пчела» [1].

Анализ войны между Грузией и Южной Осетией в 2008 г. показал, что БПЛА в руках грузинских военных позволили им в режиме «онлайн» вести постоянное наблюдение за полем боя, наводить на цели артиллерию и авиацию.

Таким образом, разработка БПЛА средней тактической дальности в настоящее время является актуальной задачей.

Возможные задачи беспилотной разведывательной авиации [2]:

- обнаружение мест расположения огневых (стартовых) позиций баз сборки, складов хранения и районов сосредоточения средств массового поражения противника во всей его глубине оперативного построения войск;

- вскрытие системы противовоздушной обороны противника в полосе наступления;

- разведка поля боя и подходов к нему;

- разведка системы управления войсками, ракетами и авиацией.

Основные требования к облику и компоновке разрабатываемого БПЛА:

- 1) размещение необходимого оборудования или целевой нагрузки;

- 2) обеспечение потребной тяги силовой установки и необходимого запаса топлива для обеспечения полета по заданному маршруту;

- 3) высокие несущие свойства компоновки с целью обеспечения требуемых минимальных скоростей полета;

- 4) реализация необходимого уровня аэродинамического качества для достижения требуемой дальности и продолжительности полета при ограниченном уровне тяговооруженности силовой установки;

- 5) обеспечение приемлемых характеристик маневренности.

Тактико-технические требования:

- максимальная взлетная масса — не более 100 кг;

- максимальная скорость на высоте 3 500 м — не менее 100 км/ч;

- максимальная скорость у земли — не менее 120 км/ч;

- статический потолок — не менее 3 500 м;

- практический потолок — не менее 5 000 м;

- продолжительность полета — не менее 6 ч;

- грузоподъемность бортового оборудования — не менее 15 кг;

- техническая дальность полета — не менее 300 км;

- взлет и посадка с открытого участка земной поверхности длиной — не более 80 м.

Для обеспечения задач наблюдения подстилающей поверхности в реальном масштабе времени в процессе полета и цифрового фотографирования выбранных участков местности, включая труднодоступные участки, а также определения координат исследуемых участков местности полезная нагрузка и оборудование БПЛА должны содержать в своем составе [3]:

- кадровую телевизионную камеру с 10-кратным вариофокальным объективом, управляемую в пределах  $175^\circ$  по курсу (азимуту) и  $+5...65^\circ$  по тангажу (углу места) массой 4 кг;

- строчный инфракрасный сканер диапазона 8...14 мкм с углом захвата 120° массой 2 кг;
- широкополосный передатчик с антенной массой 5 кг;
- аккумулятор массой 6 кг;
- генератор массой 3,5 кг;
- рулевые машинки массой 1,68 кг;
- блок управления массой 6 кг;

Часто БПЛА с заданной максимальной скоростью горизонтального полета проектируются под имеющийся в наличии двигатель.

Проведя статистику по двигателям для БПЛА построена зависимость массы двигателя от мощности (рис. 1).

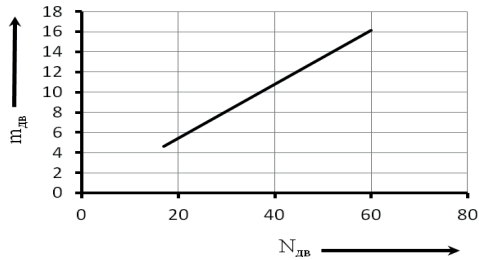


Рис. 1. Зависимость массы двигателя от мощности

Для формирования внешнего облика БПЛА как аэродинамического тела с рациональными аэродинамическими характеристиками (рис. 2) выполнен аэродинамический расчет.

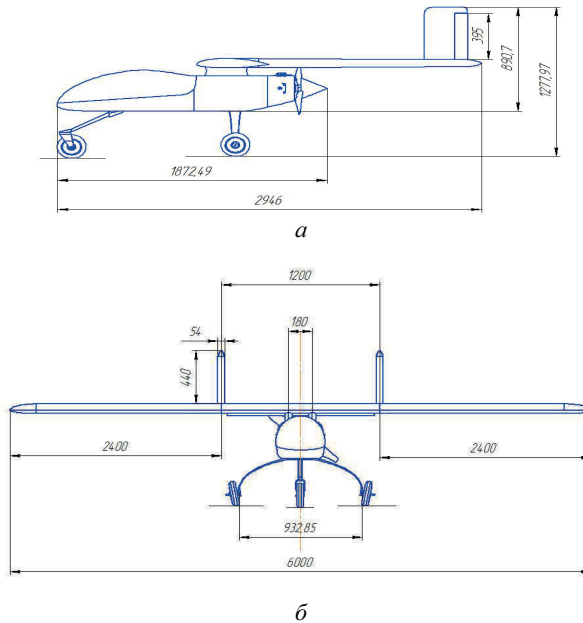


Рис. 2. Вид БПЛА:  
а — сбоку; б — спереди

В представленной работе, на основании анализа боевого применения беспилотной разведывательной авиации, в том числе и самолетов, были разработаны тактико-технические требования к БПЛА и обоснована возможность их реализации.

Разработана конструктивно-компоновочная схема для разведывательного самолета, позволяющая разместить в фюзеляже целевое оборудование, топливо и силовую установку. Основные параметры спроектированного беспилотного самолета в целом удовлетворяют предъявленным тактико-техническим требованиям.

Проведены исследования влияния удлинения крыла беспилотного самолета-разведчика на его технический облик. В результате была построена зависимость массы силовой установки, крыла от удлинения. Выявлено, что оптимальным можно считать такое удлинение крыла, при котором суммарная масса крыла, силовой установки и потребного запаса топлива будет минимальной. Разработана конструкция разведывательного БПЛА для выполнения задачи поиска наземных целей предпочтительно на равнинной местности и определены условия выполнения данной задачи.

### Литература

- [1] Павлушенко М., Евстасьев Г., Макаренко И. Национальная и глобальная безопасность. Беспилотные летательные аппараты, история, применения, угроза распространения и перспективы развития. *Науч. тр. ПИР-центра*, 2004, № 2. Москва, Издательство права человека, 2005, 380 с.
- [2] Авиационные разведывательные и разведывательно-ударные комплексы. Материалы лекций. Москва, ВВИА им. Жуковского, 1985, 67 с.
- [3] Ростопчин В.В., Дмитриев М.Л. Применение цифровых оптических систем для беспилотных летательных аппаратов. URL: [www.avia.ru/author/a39.shtml](http://www.avia.ru/author/a39.shtml) (дата обращения 12.03.2015).

УДК 623.4.08

## **Компенсация негативного влияния детонации лидирующего заряда и динамической защиты в тандемных кумулятивных боевых частях**

© Косолобов Дмитрий Вячеславович, Глазков Константин Михайлович

Россия, г. Тула, ПО «Туламашзавод»

[komash3@tulamash.ru](mailto:komash3@tulamash.ru)

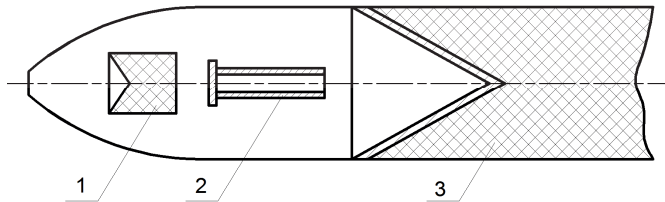
*Рассмотрена конструкция головной части управляемой противотанковой ракеты 9М117М с тандемной кумулятивной боевой частью и влияние детонации лидирующего кумулятивного заряда и динамической защиты на бронепробитие. Предложена конструкция защитного экрана для компенсации негативного влияния детонации этого заряда и динамической защиты. Результаты натурных стационарных испытаний показали эффективность предложенной конструкции.*



**Ключевые слова:** кумулятивный заряд, динамическая защита, защитный экран, бронепробитие.

Производимые ПО «Туламашзавод» выстрелы ЗУБК10М, -1, -2, -3 предназначены для поражения бронетанковой техники, в том числе оснащенной динамической защитой (ДЗ), малоразмерных целей типа ДОТ, ДЗОТ, а также малоскоростных низколетающих целей (зависший вертолет) при стрельбе из противотанковых и танковых пушек калибра 100 и 115 мм.

В состав зарядов входит управляемая ракета 9М117М с тандемной кумулятивной боевой частью (БЧ), которая состоит из лидирующего кумулятивного заряда (ЛЗ), предназначенного для преодоления ДЗ, и основного заряда (ОЗ). Конструктивная схема головной части ракеты представлена на рис. 1.

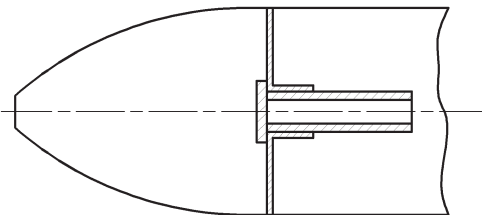


**Рис. 1.** Конструктивная схема головной части ракеты 9М117М:  
1 — ЛЗ; 2 — толкатель; 3 — ОЗ

В ходе периодических испытаний БЧ ракеты иногда наблюдается значительный разброс полученных значений бронепробития. Было выдвинуто предположение, что низкие значения бронепробития вызваны перекосом толкателя механизма раскрытия рулей от срабатывания ЛЗ и детонации ДЗ (рис. 1, см. поз. 2).

Толкатель — полый цилиндр с внутренним отверстием для прохождения кумулятивной струи ОЗ. Однако, как показал анализ фрагментов головной части ракеты после срабатывания ЛЗ и ДЗ, сопрягаемые с толкателем детали могут разрушаться или значительно деформироваться, что приводит к искривлению толкателя и, как следствие, нарушению пути прохождения кумулятивной струи ОЗ.

Для исключения данного негативного фактора было предложено внести в конструкцию головной части ракеты защитный экран, схема которого показана на рис. 2. Экран представляет собой диск и цилиндр, изготовленные из стали 30ХГСА и сваренные между собой, что обеспечивает одновременно защиту от ударной волны, возникающей при срабатывании ЛЗ и ДЗ, и исключает перекос толкателя после срабатывания ЛЗ и ДЗ.



**Рис. 2.** Схема головной части ракеты с защитным экраном

Анализ фрагментов головной части с защитным экраном после срабатывания ЛЗ и ДЗ показал, что деформации защитного экрана от ударной волны незначительны, разрушений не происходит. Кроме того, защитный экран не уничтожается полностью даже после срабатывания ОЗ.

В ходе проведенной серии испытаний на бронепробития для головных частей с защитным экраном получены положительные результаты с хорошими и близко расположенными друг к другу значениями глубины пробития, что позволяет сделать вывод об эффективности предложенной конструкции.

### Литература

- [1] Раскатов В.М., ред. *Машиностроительные материалы: краткий справочник* Москва, Машиностроение, 1980, 511 с.
- [2] *ПО «Туламашзавод»*. Военная продукция. URL:<http://www.tulamash.ru/catalog/20> (дата обращения 12.04.2015).
- [3] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва: в 2 т. Т. 2*. Москва, Физматлит, 2002, 656 с.

УДК 623.4.082.6

## Градиентное растяжение кумулятивной струи из композитного материала

© Круцкевич Максим Алексеевич, Бабкин Александр Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[makc.krutzkevich@gmail.com](mailto:makc.krutzkevich@gmail.com), [pc-os@bmstu.ru](mailto:pc-os@bmstu.ru)

*Приведены результаты физико-математического моделирования кумулятивной струи из композитных материалов, содержащих реакционноспособные компоненты. Предложена математическая модель односкоростной трехфазной среды. На примере кумулятивной струи лабораторного кумулятивного заряда рассмотрено влияние состава композитного материала на поведение кумулятивной струи в процессе растяжения.*

**Ключевые слова:** кумуляция, композитные материалы, реакционноспособные компоненты, численное моделирование.

В работе исследовано функционирование кумулятивных зарядов с реакционноспособными составляющими в составе композитных кумулятивных облицовок. В настоящее время реакционноспособные материалы рассматриваются как в варианте боевого применения, так и мирного — в кумулятивных перфораторах нефтяных скважин [1]. Объектом настоящего исследования являются реакционноспособные материалы.

При функционировании кумулятивного заряда непосредственное действие по преграде обеспечивается кумулятивной струей. От того какой струя будет по длине и по плотности к моменту взаимодействия с преградой, зависит результат этого взаимодействия. Поэтому исследуется кумулятивная струя с инертными и с реакционно-способными составляющими материала.

В качестве метода исследования поведения кумулятивной струи было выбрано физико-математическое моделирование с позиции механики сплошной среды. Для получения решения использован численный конечно-разностный метод на основе схемы Неймана — Рихтмайера [2]. Непосредственно для расчетов применялось прикладное программирование на языке C++ [3].

Научные задачи работы:

- 1) создать инструмент исследования «реакционноспособной» струи;
- 2) провести само исследование влияния состава композитной облицовки на поведение струи в свободном полете и на состояние такой струи вследствие наличия в ней различных составляющих, в том числе и реакционноспособных;
- 3) по возможности то оценить результат действия такой струи по преграде и на этой основе систематизировать численные результаты.

Рассматривалось деформирование цилиндрического стержня — элемента струи — при линейном распределении скорости по нему.

Задача решалась в рамках квазидвумерной постановки [4]. Основные уравнения в системе (1) — одномерные осесимметричные нестационарные уравнения движения сжимаемой жидкой или упругопластической среды. Фактор градиентного растяжения учитывался через кинематическое соотношение для осевой скорости, а также через уменьшение погонной массы стержня по мере его растяжения. В сущности, при такой постановке как бы «следят» за деформированием одного лишь плоского сечения, но учитывают наличие соседствующих других таких же. Система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_r}{dt} = \frac{\partial(r\sigma_r)}{\rho r \partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\rho r}; \\ dm_0 = \rho_0 r_{\text{л}} dr_{\text{л}}; \\ dm = \frac{dm_0}{1 + \dot{\epsilon}_{z0} t} = \rho r dr; \\ \frac{dr}{dt} = V_r; \\ \frac{dD_{\sigma i}}{dt} = 2G \left( \dot{\epsilon}_i - \frac{\dot{V}}{3V} \right), i = r, z, \theta; \\ D_{\sigma r}^2 + D_{\sigma \theta}^2 + D_{\sigma z}^2 = \frac{2}{3} Y_0^2. \end{array} \right. \quad (1)$$

Начальные условия соответствуют несжимаемому градиентному стержню [5]. Это соответствие позволяет определить начальные распределения радиальных скоростей, компонент тензора напряжений, давления, компонент деватора напряжений.

Особую роль в системе уравнений играет уравнение состояния материала струи.

В ситуации монолитной струи (это важный опорный частный случай) в качестве упрощенного уравнения состояния можно рассматривать баротропную характеристику динамической сжимаемости — ударную адиабату в форме Тета [6]:

$$P = A[(\rho/\rho_0)^n - 1]. \quad (2)$$

Сложнее, когда материал струи в дополнение к основному (матричному) материалу содержит еще и материал твердой добавки. Добавка может быть инертной, и тогда ее сжимаемость также можно описать своим уравнением Тета (2).

Добавка может быть реакционноспособной, и тогда из нее по задаваемому директивно закону может образовываться (полностью или частично) газовая фаза. Сжимаемость образующейся газовой фазы можно описать уравнением политропы (3), где показатель степени  $k = 3$  соответствует конденсированной среде — сильно сжатому высокоплотному газу [6]:

$$P = A\rho^k, \quad k = 3. \quad (3)$$

Если теперь использовать уравнение аддитивности объемов (4), среды в целом и ее составляющих, каждой со своим уравнением сжимаемости, то получим уравнение относительно одной неизвестной величины — давления:

$$\frac{1}{\rho_{\text{ср}}} = \frac{\beta_{\text{матр}}^0}{\rho_{\text{матр}}(P)} + \frac{\beta_{\text{доб.тв}}^0 z(t)}{\rho_{\text{доб.г}}(P)} + \frac{\beta_{\text{доб.тв}}^0 (1-z(t))}{\rho_{\text{доб.тв}}(P)}, \quad (4)$$

где  $\beta_{\text{матр}}^0$  и  $\beta_{\text{доб.тв}}^0$  — начальные массовые концентрации матричного материала и добавки;  $\rho_{\text{ср}}$  — средняя плотность индивидуальной частицы композита. Разрешение этого уравнения при данной средней плотности среды  $\rho_{\text{ср}}$  позволяет определить как само давление, так и плотности составляющих фаз.

Численно система уравнений (1)–(4) растяжения градиентного композитного стержня — композитной кумулятивной струи — решалась с помощью конечно-разностной схемы на основе схемы Неймана — Рихтмайера [2]. Работоспособность методики численного расчета проверялась на ряде задач с известным аналитическим решением [6]. Кроме того, контролировался баланс энергии:

$$\delta = \frac{(W_r + W_d) - (W_{r0} + A_z)}{W_{r0} + A_z} 100\%, \quad (5)$$

где  $W_{r0}$  — начальная кинетическая энергия радиального движения элемента кумулятивной струи;  $W_r$  — его текущая кинетическая энергия;  $A_z$  — работа осевой силы, внешней по отношению к элементу струи;  $W_d$  — внутренняя энергия (работа деформирования). Например, при расчете растяжения однородного медного стержня при числе ячеек по радиусу равным 50 и при общем числе временных слоев  $\sim 50\,000$  дисбаланс (5) энергии не превышает 2 %

Полученные к настоящему времени результаты численных расчетов пока не имеют системного характера. Они скорее частные, демонстрационные. Примеры результатов приведены для элемента срединной части кумулятивной струи лабораторного заряда диаметром 50 мм. Для такого элемента начальный градиент осевой скорости  $\dot{\epsilon}_z = 3,18 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ , радиус  $R_0 = 3,5 \text{ мм}$ .

Так, растяжение однородной медной струи имеет колебательный характер. Сжимаемость и инертность материала вызывают ее радиальные колебания — по скоростям и напряжениям [4]. Колебания происходят вокруг значений, характерных для несжимаемого градиентного стержня [4, 5].

Изменение состава композита материала струи может изменить радиальное движение даже в отсутствие газообразной фазы: усилить в случае медновольфрамового композита; ослабить с интерметаллидной никелево-алюминиевой композицией. Еще более сильные изменения струи скорее всего будут происходить, если использовать реакционноспособный материал, в составе которого содержатся добавки, образующие газообразную фазу.

В целом же на данный момент основным достижением является создание методики численного расчета — инструмента исследования параметров кумулятивной струи из композитного материала. Проведенные частные расчеты позволяют предположить получение интересных результатов в дальнейшем.

### Литература

- [1] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Analysis of influence of the sintered liner composition on the shaped-charge jet free flight behavior and its penetration capacity. *Proc. 25<sup>th</sup> Int. Symp. on Ballistics.-Beijing*, China, 17–21 May, 2010, vol. 2, pp. 954–961.
- [2] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстротекучих процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
- [3] Похомов Б.И. *C/C++ и MS Visual C++ 2010 для начинающих*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2011, 736 с.
- [4] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В., Маринин В.М. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете. *ПМТФ*, 1997, т. 38, № 2, с. 32–38.
- [5] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В., Маринин В.М. Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете. *ПМТФ*, 1997, т. 38, № 2. с. 38–43.
- [6] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва: в 2 т. Т. 2*. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.

УДК 533.6.013

## Оценка эффективности пилотирования военнотранспортного самолета при сбросе моногруза

© Кузнецов Александр Дмитриевич

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

[adkuznetsov@yandex.ru](mailto:adkuznetsov@yandex.ru)

*Кратко исследована проблема устойчивости и управляемости при сбросе моногруза с военнотранспортного самолета (ВТС). Рассмотрена методика оценки эффективности пилотирования ВТС при сбросе моногруза. Введен критерий оценки эф-*

фективности. Для его вычисления применен метод статистического моделирования с использованием математической модели движения материальной системы «самолет-груз» и результатов полунатурного моделирования на пилотажном стенде с участием летчиков.

**Ключевые слова:** военно-транспортный самолет, пилотирование, эффективность, имитационное моделирование, математическая модель, метод Монте-Карло.

С постановкой на вооружение воздушно-десантных войск современных образцов бронетехники появилась необходимость парашютного десантирования моногрузов сравнительно большой полетной массой 16...20 т. При движении снаряженных платформ по грузовой кабине военно-транспортного самолета (ВТС) при их сбрасывании из-за изменения координаты центра тяжести системы «ВТС — моногруз» возникают кабрирующий и после схода груза — пикирующий моменты, которые летчик должен парировать соразмерным движением штурвала от себя и на себя соответственно. Бездействие или действия летчика с большим запаздыванием в данной ситуации могут привести к выходу угла атаки  $\alpha$  или нормальной перегрузки  $n_y$  за пределы эксплуатационных ограничений и создать угрозу безопасности полета.

Для решения этой проблемы в настоящее время применяются методики пилотирования «с упреждением». Суть ее состоит в том (рис. 1), что по докладу бортового техника по авиационно-десантному оборудованию о страгивании моногруза летчиком подается штурвал «от себя» на определенную величину, а после выхода моногруза штурвал возвращается в нейтральное положение. Величина хода штурвала зависит от положения моногруза в грузовой кабине (см. рис. 1).

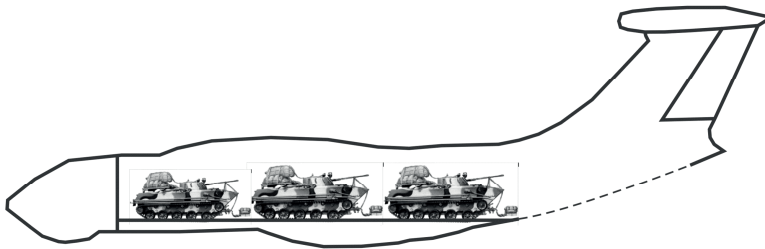


Рис. 1. Схема десантирования грузов

Однако согласно результатам летных испытаний имеет место существенный разброс в управляющих действиях летчика и соответственно разброс в значениях  $n_y$ . Следовательно, в данном случае нельзя пренебрегать случайными воздействиями и решать задачу в детерминированной постановке [1]. Необходимо оценить эффективность пилотирования ВТС при сбросе моногруза в зависимости от управляющих действий летчика.

В качестве критерия выбираем  $P_{6.c}$  — вероятность безопасного сброса моногруза, которая определяется как

$$P_{6.c} = \int_{n_{y_{\min \text{ доп}}}}^{n_{y_{\max \text{ доп}}}} f(n_y) dn_y, \quad (1)$$

где  $f(n_y)$  — функция распределения случайной величины  $n_y$ ,  $n_{y \min \text{ доп}}$ ,  $n_{y \max \text{ доп}}$  — ограничения нормальной перегрузки по углу атаки и прочности в зависимости от приборной скорости полета и полетной массы ВТС. Для определения  $f(n_y)$  применен метод имитационного моделирования [2, 3] с использованием математической модели ВТС с системой управления. Случайными величинами на входе в модель являются:  $\tau_{\text{л}}$  — время запаздывания фактического отклонения штурвала по отношению к требуемому,  $\delta_{B_{\max}}$  — максимальное отклонение штурвала соответственно (рис. 2).

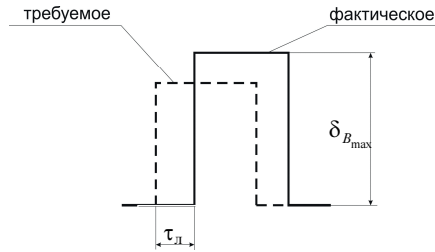


Рис. 2. Отклонение руля высоты летчиком

Закон распределения данных случайных величин принимаем нормальным, числовые характеристики получаем путем обработки результатов полунатурного моделирования на пилотажном стенде неманевренного самолета.

Для реализации метода Монте-Карло была написана программа, осуществляющая розыгрыш по нормальному закону значений  $\tau_{\text{л}}$  и  $\delta_{B_{\max}}$ . Дальнейшая обработка результатов эксперимента проводилась обычным путем и в конечном итоге — с вычислением  $P_{\text{б.с}}$  по формуле (1).

Таким образом, создана методика оценки эффективности пилотирования при сбросе моногруза, учитывающая случайный характер управления летчиком. Исследования, выполненные с помощью разработанных авторами математической модели и программного обеспечения, показывают, что случайный разброс параметров управления существенно влияет на динамику сброса и приводит к существенному разбросу максимальных нормальных перегрузок, углов атаки. Среди рассмотренных возможных параметров управления присутствует и максимально неблагоприятное сочетание, при котором возможно развитие нештатной ситуации.

## Литература

- [1] Тушев О.Н., Щеглов Г.А. Численное моделирование аэроупругой динамики воздушного старта при наличии случайного разброса параметров аэродинамического нагружения. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2015, № 1, с. 22–34.
- [2] Строгалев В.П., Толкачева И.О. Решение прикладных технических задач методом имитационного моделирования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/627.html> (дата обращения 10.03.2015).
- [3] Орлов А.И. Основные черты новой парадигмы математической статистики. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ)*. Краснодар, КубГАУ, 2013, № 06 (090), с. 187–213. URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/06/pdf/13.pdf> (дата обращения 12.03.2015).

УДК 623.555:531.55

## Влияние разброса начальной скорости гранаты на вероятность попадания в цель

© Кореньков Владимир Владимирович, Лежнин Сергей Иванович,  
Селиванов Виктор Валентинович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[korenkov-v-v@mail.ru](mailto:korenkov-v-v@mail.ru), [sergey\\_npcst@mail.ru](mailto:sergey_npcst@mail.ru), [vicsele@list.ru](mailto:vicsele@list.ru)

*Описана модель расчета внешней баллистики в полной трехмерной постановке в приближении динамики материальной точки. Проведено математическое моделирование попадания гранаты в цель методом статистических испытаний при вариациях внешних условий стрельбы. Представлены оценки вероятности попадания гранаты в лобовую проекцию танка для разных режимов стрельбы из гранатометного комплекса. Показано существенное увеличение вероятности попадания гранат при использовании реактивного двигателя с системой авторегулирования тяговых характеристик.*

**Ключевые слова:** разброс начальной скорости, внешняя баллистика, боковой ветровой снос, ошибки прицеливания и ориентирования оружия, техническое рассеивание, вероятность попадания.

Для эффективного применения гранатометных комплексов в антитеррористических операциях в городах и густонаселенных районах необходимо обеспечить заданную точность попадания, которая во многом определяется постоянством баллистических характеристик гранатометного выстрела. Нестабильность баллистических характеристик выстрелов средств ближнего боя (СББ) в первую очередь зависит от колебаний начальной скорости изделий, обусловленной температурным разбросом тяговых характеристик [1, 2] импульсного реактивного двигателя на твердом топливе (ИРДТТ). В работе [3] показано, что снижение температурного градиента баллистических характеристик неуправляемых гранат для СББ во всех климатических условиях применения можно обеспечить введением в конструкцию ИРДТТ автоматически регулирующих критическое сечение устройств. Экспериментально подтверждено снижение температурного разброса давления в камере таких двигателей в 12 раз.

Системы авторегулирования тяговых характеристик позволяют значительно повысить эксплуатационные и боевые свойства оружия, прежде всего, кучность стрельбы из гранатомета. Для того чтобы количественно оценить влияние сокращения разброса начальной скорости гранат на повышение вероятности попадания в цель, необходимы физические и математические модели внешней баллистики и оценки вероятности, учитывающие этот фактор.

Корректность расчета вероятности попадания гранат в цель определяется возможностью и качеством учета стохастических факторов, способных оказать влияние на положение гранаты относительно цели на траектории, главным образом, ветра на дистанции ее полета к цели. Значения пульсаций скорости ветра в потоке могут до-



стигать 100 % номинала ее средней скорости, причем интенсивность пульсаций максимальна вблизи поверхности земли. Для учета влияния этого фактора расчет внешней баллистики гранат проводится в полной трехмерной постановке в приближении динамики материальной точки, но с учетом вектора сил, связанного с адаптацией (стабилизацией) гранаты в потоке.

В качестве основного допущения принято, что граната после выхода из транспортного пускового контейнера (ТПК) «мгновенно» ориентируется по потоку вдоль суммарного вектора  $V_s$  от скорости набегающего потока (начальная скорость гранаты  $V_0$ ) и вектора скорости ветра  $V_v$ . Допущение обосновано тем, что на практике устойчивая в полете граната приобретает такое положение на дистанции движения 3...5 м после выхода из ТПК, что составляет менее 1/100 пути ее последующего движения к цели.

Схема движения гранаты на траектории представлена на рис. 1.

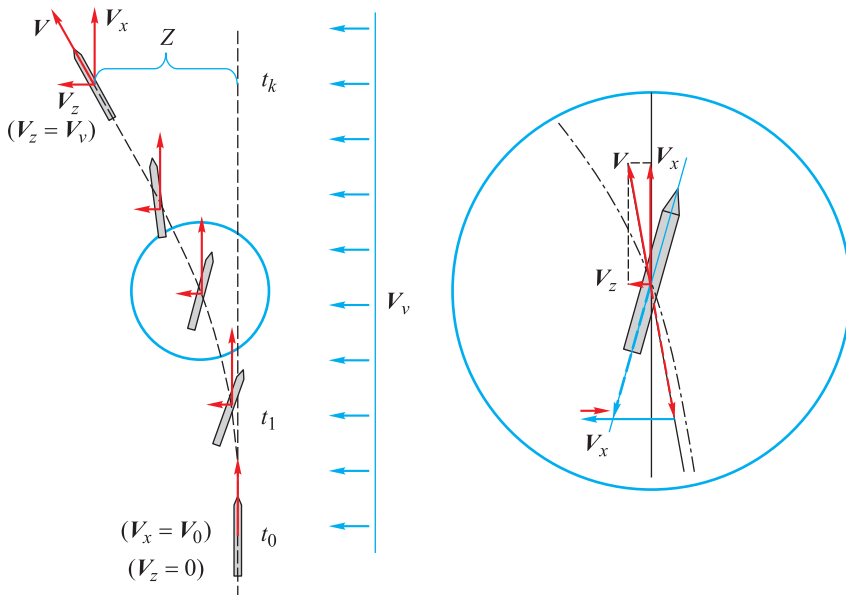


Рис. 1. Схема движения гранаты в условиях действия бокового ветра (вид в плоскости действия ветра)

Граната вовлекается в движение в стартовой системе координат в направлении ветра под действием проекции силы сопротивления на соответствующую ось стартовой системы координат. В пределе после приобретения гранатой скорости, равной скорости ветра вдоль его направления, она движется по касательной к траектории без «видимого» различия между ориентацией гранаты в стартовой системе координат и касательной к ее траектории. Таким образом, трехмерные уравнения движения материальной точки дополняются кинематическими соотношениями, характерными для расчета движения твердого тела.

Работа гранатометного комплекса возможна в нескольких режимах — с применением прибора управления огнем (ПУО) и автономно, на основе глазомерной оценки ситуации. В обоих случаях ориентирование оружия на цель производится опера-

тором вручную. Расчетная схема оценки вероятности попадания гранаты в лобовую проекцию танка представлена на рис. 2. Оценка вероятности попадания проводится методом статистических испытаний.

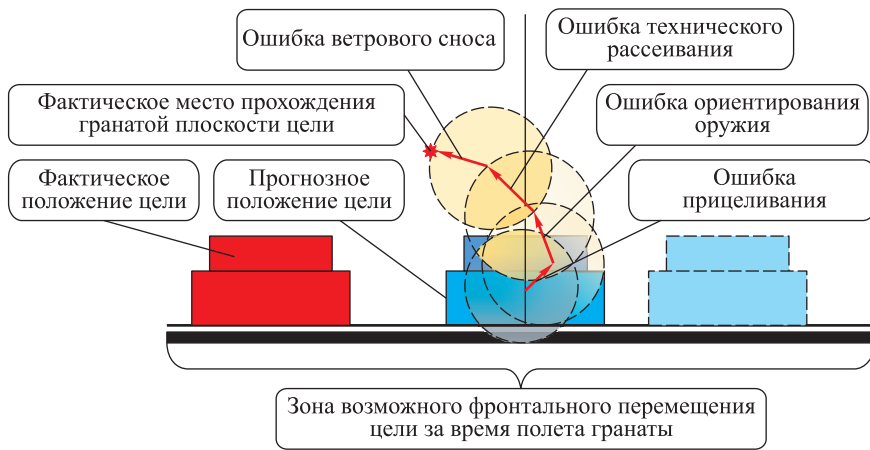


Рис. 2. Схема формирования ошибок, определяющих вероятность попадания гранат в цель

В расчетах учитываются следующие группы ошибок:

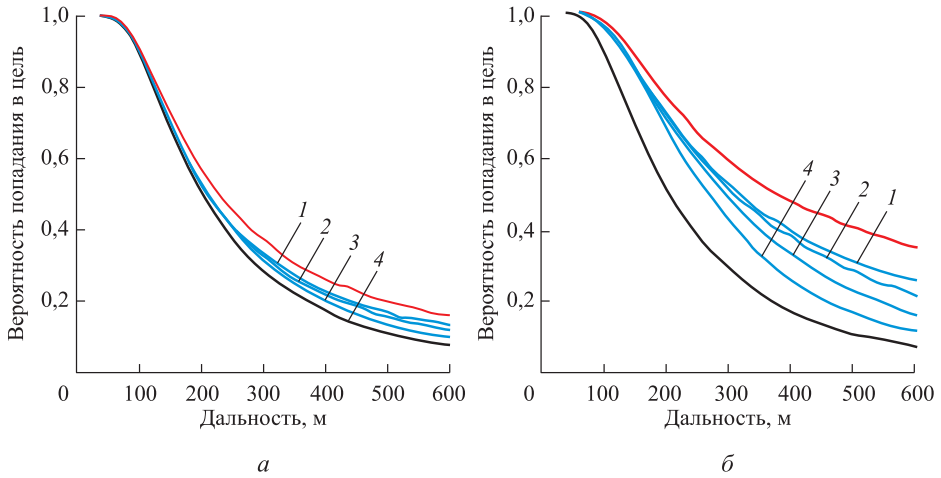
- прицеливания (зависят от режима применения комплекса);
- ориентирования оружия на цель (ручное или с закреплением на пусковой установке);
  - от технического рассеивания гранат на траектории;
  - вносимые неопределенностью ветрового сноса (зависят от боковой составляющей скорости ветра, скорости гранаты и дистанции до цели);
  - прогноза движения цели (характерны при применении неуправляемого оружия и связаны с неопределенностью перемещения цели в период движения гранаты).

Специфика стрельбы из СББ — возникновение достаточно больших углов встречи гранаты с целью. Так, даже при стрельбе на дальность прямого выстрела (ДПВ) типичный угол встречи составляет  $2 \dots -2,5^\circ$ , что увеличивает эффективную площадь цели (за счет проекции глубины цели типа «танк» на картинную плоскость) на  $\sim 8 \dots 10 \%$ . На дальностях 600 м угол встречи может достигать  $-11 \dots -12^\circ$ , а прирост эффективной площади цели  $\sim 50 \%$ , что учтено в методике расчета вероятности попадания гранаты в цель.

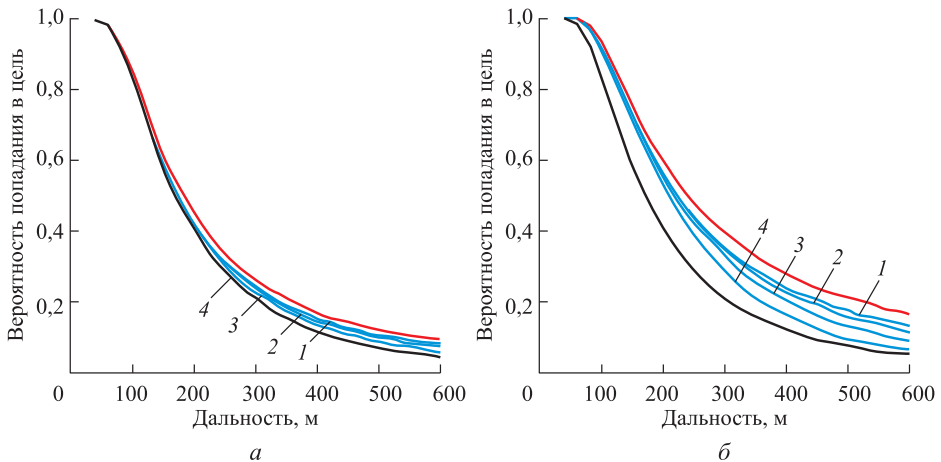
Оценка влияния разброса начальной скорости гранат на вероятность попадания в цель проведена для противотанковой гранаты (ПГ) калибром 105 мм, с полетной массой 6 кг и коэффициентом лобового сопротивления  $C_x = 0,38$ . Вероятности попадания в танк при его лобовом обстреле гранатами ПГ-105 с вариациями работы двигателя, создающими разброс начальной скорости до 7 %, и вариациями внешних условий стрельбы (скорости бокового ветра и подвижности танка), приведены на рис. 3–5.

На всех рисунках верхняя кривая соответствует «идеальной» гранате с нулевым техническим рассеиванием ( $E_b = E_6 = 0$  т.д.) и нулевым разбросом скорости ( $dV = 0$ ). Нижняя линия описывает зависимость для гранаты с реальным техническим рассеиванием  $E_b = E_6 = 2,3$  т.д. и максимальным разбросом начальной скорости

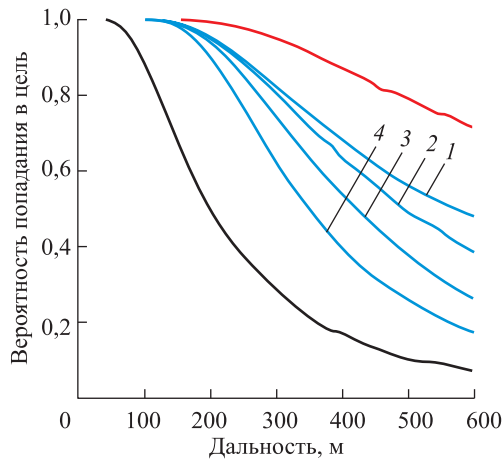
$dV = 7\%$ . Средние линии соответствуют зависимостям изменения вероятности попадания в танк при срединной ошибке по высоте и по боку  $E_b = E_6 = 2,3$  т.д. (эквивалентной кучности боя при стрельбе по щиту на ДПВ по высоте и боку  $B_b \leq 0,5$  м,  $B_6 \leq 0,5$  м, характерной для большинства РПГ) для разных значений  $dV = 0 \dots 7\%$  (отмечены цифрами у кривых).



**Рис. 3.** Вероятность попадания в танк при фронтальной стрельбе (для стандартных условий стрельбы из ручного гранатомета по неподвижной цели в безветренную погоду): а — глазомерное прицеливание  $E_p = 5$  т.д.; б — прицеливание с ПУО  $E_p = 0,675$  т.д.; при нулевых скорости ветра и скорости цели; 1 —  $dV = 0$ ; 2 —  $dV = 2$ ; 3 —  $dV = 4$ ; 4 —  $dV = 7$



**Рис. 4.** Вероятность попадания в танк при фронтальной стрельбе (для стандартных условий стрельбы из ручного гранатомета по подвижной цели и боковом ветре): а — глазомерное прицеливание,  $E_p = 5$  т.д.; б — прицеливание с ПУО,  $E_p = 0,675$  т.д.; при скорости ветра 5 м/с и скорости цели 10 м/с; 1 —  $dV = 0$ ; 2 —  $dV = 2$ ; 3 —  $dV = 4$ ; 4 —  $dV = 7$



**Рис. 5.** Вероятность попадания в танк при фронтальной стрельбе (прицеливание с применением ПУО и наилучшим ручным ориентированием оружия при стандартных условиях стрельбы из ручного гранатомета по неподвижной цели в безветренную погоду): при  $E_p = 0,675$  т.д.,  $E_o = 2$  т.д., нулевой скорости ветра и нулевой скорости цели; 1 —  $dV=0$ ; 2 —  $dV=2$ ; 3 —  $dV=4$ ; 4 —  $dV=7$

Расчеты на рис. 3–4 проведены для стрельбы при среднем уровне ручного ориентирования оружия, обеспечивающего срединную ошибку ориентирования  $E_o = 5$  т.д. Расчеты на рис. 5 соответствуют наилучшему ручному ориентированию оружия  $E_o = 2$  т.д.

Условия стрельбы, учтенные в расчетах (отражены на рис. 5), соответствуют условиям, аналогичным тем, которые изображены на рис. 3, б но для наилучшего ручного ориентирования оружия, обеспечивающего  $E_o = 2$  т.д.

В условиях сильного влияния ошибок прицеливания и ориентирования оружия (см. рис. 3, а и 4, а) влияние возможного разброса начальных скоростей гранаты на вероятность попадания невелико. Различие между «идеальной» гранатой и наихудшей не превышает 2 раз на низком уровне вероятностей попадания 0,1–0,2, реализуемом на дальностях более 500 м. В условиях уменьшения части ошибок прицеливания при использовании ПУО (см. рис. 3, б и 4, б) и наилучшего ориентирования гранатомета на цель (см. рис. 5) влияние возможного разброса начальных скоростей гранаты на вероятность попадания резко увеличивается. Значительный рост вероятности попадания наблюдается уже на ДПВ. Различие между «идеальной» гранатой и наихудшей возрастает до 4–5 раз на высоком уровне вероятностей попадания 0,4–0,3, реализуемом на дальностях более 400 м. Абсолютные значения вариаций вероятности попадания возрастают в 2–3 раза, от 0,1 до 0,15 (см. рис. 3, б), и даже в 4 раза, от 0,12 до 0,3 (см. рис. 5) при изменении дальности стрельбы от 200 до 600 м. Таким образом, снижение разброса начальных скоростей гранаты за счет авторегулирования тяговых характеристик ИРДГТ в условиях повышения точности прицеливания и ориентирования оружия позволяет увеличить вероятность попадания в цель на дистанциях от 400 м более чем в 2 раза.

## Литература

- [1] Соколовский М.И., Петренко В.И., ред. *Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе*. Москва, Машиностроение, 2003, 464 с.
- [2] Шапиро Я.М., Мазинг Г.Ю., Прудников Н.Е. *Теория ракетного двигателя на твердом топливе*. Москва, Военное издательство Министерства обороны СССР, 1966, 256 с.
- [3] Кореньков В.В., Лежнин С.И., Светогоров Н.В., Селиванов В.В., Сергиенко С.В. Моделирование процесса диссипации кинетической энергии регулятора расхода импульсного реактивного твердотопливного двигателя. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 4, с. 61–73.

УДК 621.396.621

## Особенности создания имитатора цифровой обработки сигналов в составе модели обзорной РЛС

© Логвиненко Анна Сергеевна, Жураковский Валерий Николаевич

Россия, г. Москва, Научно-исследовательский институт  
специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана

[sm2-2@inbox.ru](mailto:sm2-2@inbox.ru)

*Для отладки и оптимизации различных алгоритмов работы РЛС создаются их модели в различных средах моделирования. Модель РЛС как правило состоит из нескольких блоков, одним из которых является модель цифровой обработки сигналов (ЦОС). Обработка в блоках ЦОС зачастую является довольно сложной, поэтому для моделирования работы РЛС в целом, воспроизводить подробную цифровую обработку сигналов нецелесообразно, поскольку требует больших вычислительных ресурсов. Создают упрощенные модели ЦОС — имитаторы, воспроизводящие основные зависимости входных и выходных величин в блоке. Основное достоинство данных моделей — простота и быстрдействие, что позволяет использовать их при моделировании всего тракта обработки в реальном времени. Как правило, разработчики имитаторов делают основной упор на экономии используемых ресурсов и пренебрегают точностью воспроизведения выходной информации блока. С помощью таких имитаторов невозможно корректно проверить работу системы.*

**Ключевые слова:** обзорная РЛС, цифровая обработка сигналов, имитатор ЦОС, модели реального времени.

Целью данной работы являлось создание имитатора цифровой обработки сигналов (ЦОС), который адекватно бы воспроизводил статистические характеристики выходной информации ЦОС и обладал достаточным быстрдействием, необходимым для моделирования в реальном времени.

В работе рассмотрена модель блока ЦОС в составе имитационной модели обзорной РЛС, позволяющей проводить совместную отработку и оптимизацию алгоритмов ЦОС [1, 2], предварительной обработки сигналов (ПОС) и трассовой обработки сигналов (ТОС).

Основные функции общей модели:

- формирование геометрического расположения целей, помех и мешающих отражателей;
- формирование моделей сигналов, отраженных от объектов при их движении в пространстве;
- моделирование обработки сигналов в ЦОС;
- моделирование вторичной обработки сигналов (ВОС);
- обработка экспериментальных данных, передаваемых как на вход модели первичной, так и вторичной обработки;
- возможность получения на базе модели в MATLAB/Simulink платформенно-независимого кода на C/C++, который может быть откомпилирован для платформы x86 в формате, совместимом с ОСРВ QNX для внедрения его в технологическую программу имитации внешнего окружения ВОС;
- моделирование в реальном времени

Подробно в данной работе проанализированы особенности моделирования обработки сигналов в ЦОС.

Модель ЦОС необходима для анализа и отработки существующих алгоритмов блока ЦОС и алгоритмов обработки системы в целом, а также для их оптимизации.

В задачи рассматриваемого блока ЦОС входит:

- прием цифровой информации с фазированной антенной решетки;
- сжатие отраженного сигнала с опорным;
- доплеровская фильтрация;
- обнаружение импульсов [3, 4];
- формирование информационного пакета для ВОС;
- транзит служебной информации.

По принятым информационным пакетам в ВОС осуществляется ПОС и ТОС [5].

В рамках данной работы разработано два варианта модели ЦОС: детальная и упрощенная. Детальная модель позволяет весьма точно воспроизводить все особенности обработки сигналов, упрощенная модель — отладку алгоритмов ПОС и ТОС на больших отрезках времени. Упрощенная модель была создана на основе зависимостей между входными и выходными параметрами ЦОС, полученных с помощью детальной модели и теоретических сведений в области обработки сигналов.

Основное принципиальное отличие моделей состоит в том что, если в детальной модели до этапа обнаружения моделируется прохождение сигнала во всех квантах дальности, то в упрощенной модели все этапы обработки производятся для квантов дальности, в которых наиболее вероятно обнаружение.

Моделирование детальной модели ЦОС показало, что обнаружения, как правило, возникают в двух квантах дальности, между которыми находится истинное положение цели, так как они имеют максимальные амплитуды. В связи с этим для сокращения времени моделирования, в упрощенной модели моделируются амплитуды только этих точек. Например, если сжатие в детальной модели осуществляется с помощью свертки отраженного и опорного импульсов, то в упрощенной — рассчитываются амплитуды максимумов свертки, зависящие от амплитуды отраженного импульса, длительности ЗИ, положения цели в кванте дальности.

На основе полученных с помощью детальной модели зависимостей и теоретических сведений был создан имитатор ЦОС, удовлетворяющий описанным выше требованиям. Путем сравнения двух моделей при различных условиях моделирования установлено, что имитатор адекватно воспроизводит выход ЦОС с заданной точно-

стью и позволяет существенно уменьшить время вычислений без потерь в достоверности информации, поступающей от блока ЦОС. Также проводилось моделирование общей модели, в ходе которого было подтверждено достаточное быстродействие имитатора для моделирования в реальном времени. Таким образом, в данной работе была выполнена поставленная задача — найден разумный компромисс между сложностью (быстродействием) и точностью модели блока ЦОС. С помощью разработанной модели было проведено множество вычислительных экспериментов, на основе которых был проведен анализ существующих в обзорной РЛС алгоритмов, были выявлены их недостатки, рассмотрены возможные варианты их устранения. В дальнейшем предполагается использование данной модели для оптимизации существующих алгоритмов обработки сигналов, а также для разработки и отладки новых.

### Литература

- [1] Жураковский В.Н., Кондрашов К.С. Алгоритм разделения подвижных и малоподвижных объектов в малогабаритной обзорной РЛС. *Спецтехника и связь. РОСНОУ. Научно-технический журнал*, 2015, № 2. URL: <http://www.st-s.su/archive/articles/1606328590> (дата обращения 28.06.2015).
- [2] Логвиненко А.С. Математическая модель бортового цифрового блока обработки сигналов (ЦБОС). *Сб. докл. XI Всерос. науч.-техн. конф. «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского»*. Москва, 2014, с. 178–180.
- [3] Логвиненко А.С., Жураковский В.Н. Повышение точности измерения параметров сигналов в цифровом тракте. *Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 10. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/740571.html> (дата обращения 25.06.2015).
- [4] Логвиненко А.С. Цифровой обнаружитель с адаптивным порогом. *Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 10. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/736868.html> (дата обращения 25.06.2015).
- [5] Матюнин Д.В., Логвиненко А.С., Жураковский В.Н. Цифровая реализация адаптивного алгоритма обнаружения сигналов. *Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 6. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/782518.html> (дата обращения 25.06.2015).

УДК 623.52

## Внутрибаллистическая модель телескопического выстрела

© Павлов Ярослав Олегович<sup>1</sup>, Знаменский Евгений Александрович<sup>1</sup>,  
Кэрт Борис Эсвальдович<sup>2</sup>, Кравцов Всеволод Олегович<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Санкт-Петербург, ОАО «Научно-производственное объединение  
«Прибор»» (Балтийский филиал)

<sup>2</sup> Россия, г. Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет  
«Военмех» имени Д.Ф. Устинова

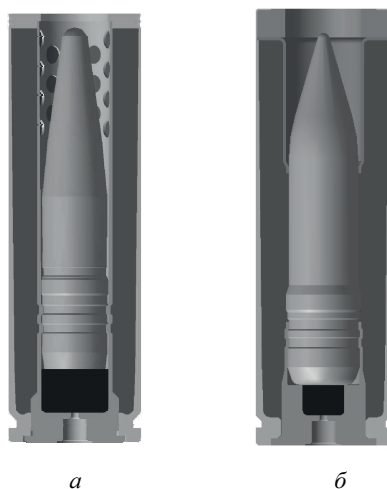
[spb\\_pribor@mail.ru](mailto:spb_pribor@mail.ru)

*Рассмотрена термодинамическая модель внутренней баллистики телескопического выстрела, учитывающая особенности его функционирования как многополостного*

пиромеханизма. Смоделирована внутренняя баллистика гипотетической телескопической пушки, а результаты моделирования сравниваются с данными для орудия классической схемы со схожими параметрами. Анализ полученных данных показал, что телескопический выстрел с двухкамерной гильзой может обеспечить повышение дульной скорости без существенного изменения нагрузки на ствол и перегрузки снаряда при выстреле.

**Ключевые слова:** внутренняя баллистика, боеприпас, телескопический выстрел, пиромеханизм, двухкамерная гильза, дульная скорость.

Проблемы развития современной малокалиберной артиллерии настоятельно требуют повышения калибров массовых автоматических артиллерийских комплексов сухопутных войск. Это связано с необходимостью существенного повышения боевой эффективности действия бронебойных и осколочно-фугасных боеприпасов. Повышение калибра, однако, приводит к снижению размещаемого на бронированной технике легкой категории по массе боезапаса, что снижает эффективность боевого применения такой техники в целом. Рациональным решением проблемы является переход от классической патронной компоновки выстрела, при которой метательный заряд располагается в гильзе, а боеприпас вне ее, к телескопическому выстрелу, в котором боеприпас располагается внутри гильзы существенно большего диаметра (рис. 1).



**Рис. 1.** Возможные конструктивные схемы телескопических выстрелов:  
*a* — с внутренней гильзой; *б* — без внутренней гильзы

Такая компоновка имеет целый ряд преимуществ: повышение энергетики выстрела за счет увеличения массы метательного заряда, уменьшение объема упаковки боеприпасов, снижение габаритов элементов автоматики артиллерийских установок (АУ). Необходимость разработки и производства таких АУ и боеприпасов к ним в РФ представляется на сегодняшний день вполне очевидной.



Для реализации внутрибаллистических расчетов при проектировании телескопических выстрелов недостаточно термодинамической модели классической внутренней баллистики. Телескопический выстрел представляет собой многополостной пиромеханизм, причем компоненты метательного заряда могут располагаться в различных полостях конструкции, последовательно срабатывая по мере развития процесса выстрела. Предлагаемая модель выстрела строится на основе изложенной в [1–3] модели баллистического функционирования многополостных пиромеханизмов, сочетая простоту классической модели внутренней баллистики с предоставляемыми указанной методикой возможностями описания процесса в многополостном пиромеханизме.

В данной модели предполагается, что после начала горения воспламенителя начинается процесс теплообмена продуктов срабатывания капсюля-воспламенителя с порохом метательного заряда и стенками камеры гранатомета. Пороховые элементы к моменту воспламенения успевают прогреться на некоторую глубину, которая тем больше, чем ниже исходная температура заряда. Это приводит к ускоренному горению внешних слоев пороховых зерен. Закон нестационарного горения пороха в прогретом слое может быть представлен следующей зависимостью:

$$u(p, y) = \frac{u_1}{1 + \beta [T(y) - T_n]} p,$$

где  $\beta$  — коэффициент зависимости конечного импульса пороха от температуры;  $T(y)$  — зависимость температуры порохового зерна от текущей толщины, отсчитываемой вглубь пороха в момент воспламенения метательного заряда.

Распределение температуры в порохе может быть аппроксимировано аналогично [4].

При определении температуры поверхности пороха воспользуемся дифференциальным уравнением

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q}{\lambda_n} \sqrt{\frac{a}{\pi t}}.$$

Мгновенный тепловой поток  $q$  в этом случае должен учитывать не только конвективную составляющую, но и составляющую, обусловленную экзотермическими реакциями в к-фазе. Массовая скорость разложения к-фазы определяется законом Аррениуса, что позволяет записать условие зажигания по аналогии с [4] в виде

$$\left[ \frac{2\lambda_n}{E_a} RT_s^2 Q_z \exp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right) \right]^{1/2} \geq 1, 2\lambda_n \frac{T_s - T_0}{\delta},$$

где  $\delta$  — характерная толщина прогретого слоя пороха,  $\delta \approx \sqrt{at_b}$ ;  $a$  — коэффициент температуропроводности пороха;  $t_b$  — время зажигания (момент времени, в который интегральная скорость тепловыделения в зоне реакции газификации становится больше скорости теплоотвода вглубь топлива из зоны реакции).

Решая полученные уравнения можно определить момент зажигания, после чего горение происходит в соответствии с зависимостью для скорости нестационарного горения пороха, учитывающей условия воспламенения:

$$u(p, y) = \frac{u_1}{1 + \beta \left[ T_0 - T_n + (T_s - T_0) \exp\left(-\frac{y}{\delta}\right) \right]} p.$$

Определение коэффициента теплообмена для условий воспламенительного периода выстрела можно в первом приближении вести на основании эмпирической зависимости  $\alpha = w\sigma$ , где  $w$  — удельный объем газов;  $\sigma$  — коэффициент, определяемый опытным путем, для пороха  $\sigma = 150 \text{ Вт} \cdot \text{м}/(\text{кг} \cdot \text{град})$  [5].

Расход газов между объемами и через зазоры в смежные полости и атмосферу определяется для докритического и сверхкритического режимов по известным зависимостям газовой динамики для идеального газа:

$$G = \begin{cases} \mu_3 s_3 \rho_1 \sqrt{2 \frac{\theta + 1}{\theta} R_1 T_1} & \text{при } \frac{p_2}{p_1} \leq \left( \frac{2}{\theta + 2} \right)^{\frac{\theta + 1}{\theta}}; \\ \mu_3 s_3 \rho_1 \sqrt{2 \frac{(\theta + 1) p_{\text{сн}}}{\theta \rho_1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\theta}{\theta + 1}} \right]} & \text{при } \frac{p_2}{p_1} > \left( \frac{2}{\theta + 2} \right)^{\frac{\theta + 1}{\theta}}, \end{cases}$$

При записи уравнений предполагалось для определенности, что перетекание происходит из первого объема во второй. За счет перетока части газов между объемами меняются свойства газа: теплоемкость, коволюм, индивидуальная газовая постоянная. Ниже представлены уравнения, описывающие фундаментальные законы сохранения массы и энергии, а также изменение физических характеристик газов и объема сосудов (за счет коволюма):

$$\begin{aligned} \frac{dm_1}{dt} &= -G; & \frac{dm_2}{dt} &= G; & \frac{dE_1}{dt} &= -k C_v T_1 G; & \frac{dE_2}{dt} &= k C_v T_1 G; \\ \frac{d\alpha_2}{dt} &= \frac{G(\alpha_1 - \alpha_2)}{m_2}; & \frac{dR_2}{dt} &= \frac{G(R_1 - R_2)}{m_2}; & \frac{dC_{v2}}{dt} &= \frac{G(C_{v1} - C_{v2})}{m_2}; \\ & & \frac{dW_1}{dt} &= G\alpha; & \frac{dW_2}{dt} &= -G\alpha. \end{aligned}$$

Движение гранаты в стволе гранатомета связано с действием силы давления. За счет движения гранаты происходит изменение загранатного объема и энергии газов. Соответствующие этим процессам уравнения представлены ниже:

$$\begin{aligned} p_{\text{сн}} &= p_2 - \frac{m_2}{3s_k} \frac{dv_{\text{н}}}{dt}; & \frac{dE_2}{dt} &= p_{\text{сн}} s_k v_{\text{н}} - \frac{v_{\text{н}} \left( m_2 \frac{dv_{\text{н}}}{dt} + 0,5 v_{\text{н}} \frac{dm_2}{dt} \right)}{3}; \\ \frac{dv_{\text{н}}}{dt} &= \begin{cases} \frac{s_{\text{н}} p_{\text{сн}}}{m_{\text{н}} \varphi_{\text{н}}} & \text{при } p_2 \geq p_0; \\ 0 & \text{при } p_2 < p_0; \end{cases} & \frac{dx}{dt} &= v_{\text{н}}; & \frac{dW_2}{dt} &= s_k v_{\text{н}}. \end{aligned}$$

Горение пороха в объеме, образование пороховых газов и изменение физических параметров газа подчиняются следующим уравнениям:

$$\frac{dz}{dt} = \begin{cases} \frac{P_1}{I_k} & \text{— для стационарного горения;} \\ \frac{1}{I_k \left\{ 1 + \beta \left[ T_0 - T_n + (T_s - T_0) \exp\left(-\frac{z e_1}{\delta}\right) \right] \right\}} P_1 & \text{— для нестационарного горения.} \end{cases}$$

$$\text{При } 0 \leq z \leq 1 \quad \begin{cases} \psi = \kappa_1 z (1 + \lambda_1 z + \mu_1 z^2); \\ \frac{d\psi}{dt} = \kappa_1 (1 + 2\lambda_1 z + 3\mu_1 z^2) \frac{dz}{dt}. \end{cases}$$

$$\text{При } 1 \leq z \leq z_k \quad \begin{cases} \psi = \psi_s + \kappa_2 (z - 1)(1 + \lambda_2 (z - 1)); \\ \frac{d\psi}{dt} = \kappa_2 (1 + 2\lambda_2 (z - 1)) \frac{dz}{dt}. \end{cases}$$

$$\frac{dW_1}{dt} = \left( \frac{1}{\delta} - \alpha_n \right) \omega \frac{d\psi}{dt}; \quad \frac{dE_1}{dt} = \frac{f\omega}{\theta} \frac{d\psi}{dt};$$

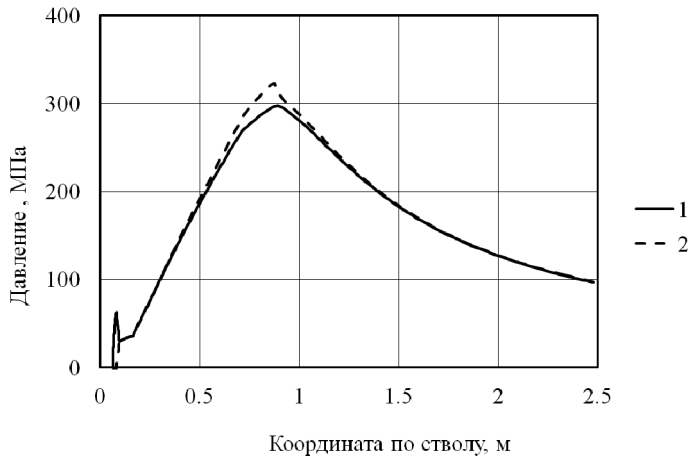
$$\frac{dR_1}{dt} = \frac{\omega}{m_1} \frac{d\psi}{dt} \left( \frac{f}{T} - R \right); \quad \frac{d\alpha_1}{dt} = \frac{\omega}{m_1} \frac{d\psi}{dt} (\alpha_n - \alpha_1);$$

$$\frac{dC_{v1}}{dt} = \frac{\omega}{m_1} \frac{d\psi}{dt} \left( \frac{f}{T_1 \theta} - C_{v1} \right).$$

Здесь  $W_1$  — объем втулки метательного заряда;  $m_1$  — масса газа;  $E_1$  — энергия газа;  $\alpha_1$  — коволюм;  $R_1$  — индивидуальная газовая постоянная;  $C_{v1}$  — теплоемкость при постоянном объеме;  $m_n$  — масса гранаты;  $x_n$  — координата гранаты;  $v_n$  — скорость гранаты;  $s_n$  — площадь поперечного сечения гранаты;  $\phi_n$  — коэффициент фиктивности;  $\omega$  — масса пороха;  $\delta$  — плотность пороха;  $f$  — сила пороха;  $\theta$  — показатель расширения;  $\alpha_n$  — коволюм пороховых газов;  $T_1$  — температура горения;  $I_k$  — конечный импульс;  $z_k$  — относительная толщина соответствующая концу горения;  $\kappa_1, \alpha_1, \mu_1, \kappa_2, \alpha_2$  — характеристики формы пороха;  $z$  — относительная толщина сгоревшего свода;  $\Psi$  — относительная масса сгоревшего пороха.

Все уравнения можно сгруппировать вместе, объединяя правые части при одинаковых производных. Это даст систему дифференциальных уравнений внутренней баллистики, описывающую процесс выстрела для двухкамерной схемы. Решить данную систему можно любым подходящим методом. В настоящем исследовании это выполнено методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

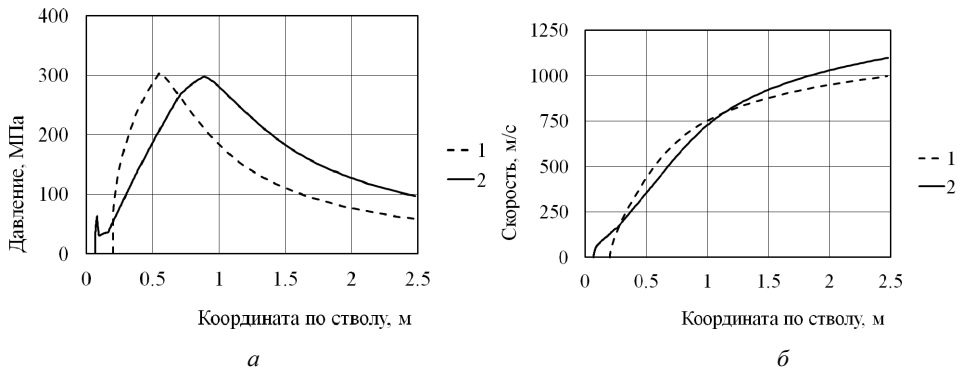
Решая представленную систему уравнений для гипотетической 40-мм пушки классической компоновки и в телескопическом варианте исполнения можно получить зависимости основных пиродинамических элементов от времени от координаты по стволу. Распределение давлений по координате вдоль ствола для телескопического варианта выстрела представлено на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость давления от координаты по стволу:  
1 — давление в стволе; 2 — давление во внешней гильзе

Анализ рис. 2 показывает, что наибольшее давление незначительно превышает 320 МПа, что является вполне приемлемым показателем для современной артиллерии. Давление в обеих полостях большую часть времени выстрела различается слабо, что свидетельствует о достаточной площади отверстий для перетока газов между рассматриваемыми объемами.

Сравнение пиродинамических элементов для классического и телескопического выстрелов показано на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимости пиродинамических элементов от координаты по стволу для классического (1) и телескопического выстрелов (2):  
а — среднебаллистическое давление в стволе; б — скорость снаряда

Анализ полученных результатов показывает, что за счет применения телескопического выстрела с двухкамерной гильзой можно повысить начальную скорость снаряда не менее чем на 10 % при сохранении текущего уровня наибольшего давления пороховых газов в стволе. Сохранение наибольшего давления пороховых газов на прежнем уровне позволяет избежать повышения нагрузки на ствол и элементы сна-

ряда. Однако следует отметить существенный рост уровня дульного давления пороховых газов, что может негативно сказываться на работу расположенных в непосредственной близости к дульному срезу приборов и устройств.

### Литература

- [1] Кэрт Б.Э., Козлов В.И., Макаровец Н.А. *Математическое моделирование и экспериментальная отработка систем разделения реактивных снарядов*. Тула, Санкт-Петербург, ФГУП «ГНПП «Сплав»», 2006, 652 с.
- [2] Макаровец Н.А., ред. *Разделение неуправляемых снарядов систем залпового огня*. Москва, Машиностроение, 2008, 438 с.
- [3] Кэрт Б.Э. *Математическое моделирование динамики и баллистики газо-жидкостных термомеханических систем ракетно-артиллерийской техники. Ч. 1: Внутренняя баллистика многополостных пиромеханизмов*. Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т, 2010, 201 с.
- [4] Ассовский И.Г. *Физика горения и внутренняя баллистика*. Москва, Наука, 2005, 357 с.
- [5] Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю. *Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе*. Москва, Машиностроение, 1979, 392 с.

УДК 623.451

## Оценка могущества действия малокалиберных артиллерийских боеприпасов с учетом пространственного положения в момент подрыва

© Павлов Ярослав Олегович<sup>1</sup>, Знаменский Евгений Александрович<sup>1</sup>,  
Кэрт Борис Эсвальдович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Санкт-Петербург, ОАО «Научно-производственное объединение «Прибор»» (Балтийский филиал)

<sup>2</sup> Россия, г. Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д.Ф. Устинова

[spb\\_pribor@mail.ru](mailto:spb_pribor@mail.ru)

*Рассмотрен подход к определению обобщенной характеристики осколочного действия боеприпасов малокалиберной артиллерии применительно к поражению танкоопасной живой силы на дистанциях до 1 км. В соответствии с современными тенденциями развития малокалиберных боеприпасов наземной артиллерии учтен ряд важных факторов, связанных с пространственным положением боеприпаса в момент подрыва. Показано, что учет этих факторов позволяет получить более полную картину действия боеприпаса, а управление пространственным положением существенно повышает могущество осколочного действия боеприпаса по танкоопасной живой силе.*

**Ключевые слова:** боеприпас, траекторный доворот, воздушный подрыв, осколочное действие, вероятность поражения, статистическое моделирование, танкоопасная живая сила.

Повышение эффективности боевого применения боеприпасов, обладающих осколочным действием — одна из актуальнейших задач проектирования средств поражения.

Существующие методики для оценки эффективности осколочного действия подразделяются на две большие группы: экспресс-методики, подобные методике изложенной в [1], и тяжеловесные методики, построенные на базе вычислительного эксперимента [2].

Для проведения анализа эффективности необходима информация по распределению вероятностей поражения цели на местности, ориентированную на наиболее типичные для данного боеприпаса условия срабатывания (высота подрыва, угол подхода, скорость боеприпаса в момент подрыва). Данную величину принято называть координатным законом поражения  $G(x, y)$  [3]. Совместно с законом рассеивания данная величина позволяют получить вероятность поражения цели одним выстрелом.

Пространственное положение (включая угол нутации и прецессии) и скорость боеприпаса в момент подрыва существенным образом влияют на форму координатного закона поражения.

Одним из способов повышения эффективности боеприпасов малого калибра является использование многофункциональных взрывных устройств, способных подрывать боеприпас на траектории. Следует отметить, что направление разлета осколков боеприпасов малого калибра в случае движения боеприпаса параллельно земле не является оптимальным. Как показывает опыт артиллерии среднего и крупных калибров с увеличением угла падения боеприпаса как правило растёт и эффективность осколочного действия. При дистанционном срабатывании боеприпаса на траектории реализуема схема с опрокидыванием боеприпаса перед подрывом, позволяющая добиться лучшей ориентации осколочного поля по отношению к цели.

Цель данного исследования — сравнение приведенной площади осколочного поражения 30-мм осколочно-фугасного снаряда в случае контактного, дистанционного и дистанционного с опрокидыванием подрывов. В качестве цели рассматривается расчет РПГ (носимого ПТРК) на дистанции 1000 м с учетом микрорельефа местности.

Методика расчета основана на методе многократного статистического моделирования осколочных полей, создаваемых боеприпасом, и во многом схожа с описанной в [2]. При этом относительно боеприпаса приняты следующие допущения:

1) все первичные осколки движутся из точки центра масс боеприпаса в момент подрыва;

2) траектории всех осколков считаются прямолинейными. Влиянием силы тяжести пренебрегается;

3) коэффициент лобового сопротивления осколка является заданной функцией числа Маха, например, ступенчатой, скачкообразно меняющейся при скорости близкой к скорости звука [4, 5];

4) начальная скорость осколка учитывает поступательное и вращательное движение снаряда в момент подрыва. При этом в общем случае ось симметрии боеприпаса в момент подрыва не совпадает с вектором скорости центра масс.

Цель в ходе расчета представляется набором прямоугольных параллелепипедов, представляющих собой экраны или уязвимые блоки. Каждому элементу цели ставится в соответствие материал и две приведенные толщины, характеризующие удельную

кинетическую энергию осколка, необходимую соответственно для поражения и сквозного пробития боевого элемента. Расчет вероятности поражения по выбранной гипотезе осуществляется по заданной функциональной схеме цели.

Расчет скорости, направления вылета, массы и коэффициента формы случайного осколка производится по заданным интегральным распределениям, получаемым либо в ходе полигонных испытаний, либо рассчитываемых по методике, изложенной в [5].

Скорость вылета осколка стартовой системе координат

$$\vec{v}_a = \vec{v}_e + \vec{v}_r,$$

где  $\vec{v}_r$  — скорость осколка, получаемая при подрыве неподвижного боеприпаса;  $\vec{v}_e$  — скорость точки боеприпаса, от которой отделяется осколок, в стартовой системе координат,

$$\vec{v}_e = \vec{v}_C + [\vec{\omega} \times \vec{r}];$$

$\vec{v}_C$  — скорость центра масс боеприпаса в стартовой системе координат;  $\vec{\omega}$  — вектор угловой скорости боеприпаса в момент подрыва;  $\vec{r}$  — радиус-вектор точки вылета осколка в связанной с боеприпасом системе координат. Будем полагать, что векторы  $\vec{v}_r$ ,  $\vec{v}_C$ ,  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{r}$  заданы своим проекциями на оси, связанной с боеприпасом системы координат. Тогда столбец проекций скорости осколка на оси стартовой системы координат определится формулой

$$[\vec{v}_a]_{ст} = A_{сн} \times [\vec{v}_C + [\vec{\omega} \times \vec{r}] + \vec{v}_r],$$

где  $A_{сн}$  — матрица направляющих косинусов, задающая положение связанной системы координат в стартовой.

Каждый уязвимый блок цели задается в виде прямоугольного параллелепипеда, имеющего шесть прямоугольных граней. Координаты точек всех прямоугольников известны. Таким образом, диагностирование факта попадания осколка в цель сводится к последовательной проверке попадания в каждый из шести прямоугольников и определению ближайшей к центру масс боеприпаса точки попадания.

Зная ближайший блок, в который попал осколок, и расстояние от точки подрыва до точки встречи, можно определить скорость встречи осколка с целью. Полагая  $c_x$  - осредненным баллистическим коэффициентом осколка на сверхзвуковой скорости, получим скорость встречи при сверхзвуковой начальной скорости осколка:

$$v_b = v_0 \exp\left(-\frac{c_x \rho S_{ср} R}{2m}\right),$$

где  $v_0$  — начальная скорость осколка;  $\rho$  — плотность воздуха;  $S_{ср}$  — средняя площадь мишени осколка;  $R$  — расстояние пройденное осколком;  $m$  — масса осколка.

Значение  $c_x$  может быть определено, как предложено в [5]:

$$c_x = 0,865 \left(1 + \frac{50}{v_0}\right).$$

Используя расчет бронепробиваемости можно оценить вероятность поражения эквивалентной преграды (поражения уязвимого элемента), толщиной  $h_p$ , принимая, что вероятность пробития преграды толщиной  $h$  составляет 0,7 [6]:

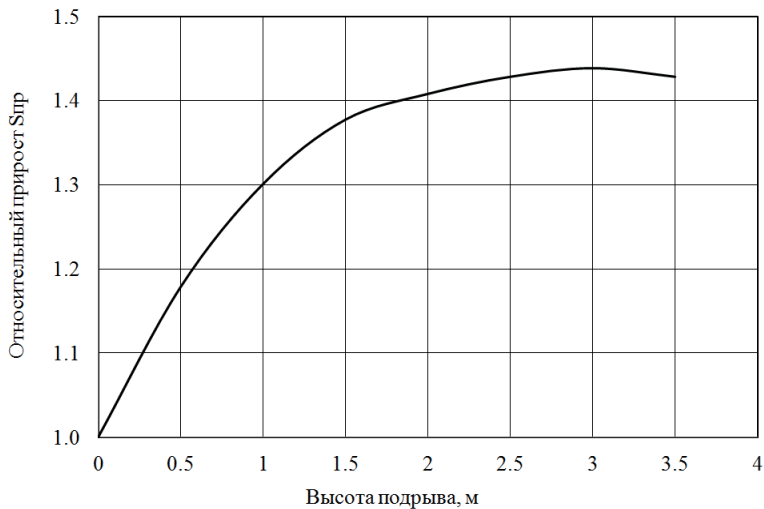
$$P_{\text{пр}} = 1 - \Phi\left(\frac{h_p - 1,05h}{0,105h}\right),$$

где  $\Phi$  — функция Лапласа.

После расчета поражения всех осколков, включая вторичные, определяется вероятность поражения выбранной цели по выбранной гипотезе поражения с использованием целевой функции.

Приведенный алгоритм позволяет получить вероятность поражения любой цели? представленной одной или несколькими элементарными целями с заданной стойкостью к поражению осколочным потоком и функциональной цепью. Следовательно, совершая несколько подрывов в заданной точке при заданном положении боеприпаса, можно оценить среднюю вероятность поражения цели.

Результаты численного моделирования относительного изменения приведенной площади осколочного поражения приведены на рис. 1, 2.

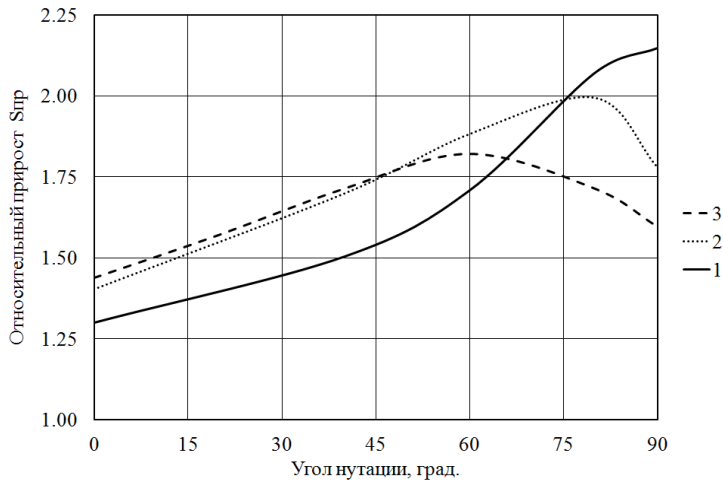


**Рис. 1.** Зависимость приведенной площади осколочного поражения от высоты подрыва боеприпаса с нулевым углом нутации

Из результатов, представленный на рис. 1, следует вывод о том, что оптимальная высота подрыва 30-мм осколочно-фугасного боеприпаса при пролете над целью с нулевым углом составит 2,5...3,0 м.

Анализируя кривые, приведенные на рис. 2, можно сделать вывод о том, что при опрокидывании боеприпаса зона оптимальных высот подрыва смещается ниже. При этом эффективность осколочного действия опрокинутого перед подрывом боеприпаса существенно выше, даже несмотря на то, что опрокидывание происходит в случайном направлении.





**Рис. 2.** Изменение площади осколочного поражения в зависимости от угла нутации боеприпаса при подрывах на высоте:  
 1 — 1 м; 2 — 2 м; 3 — 3 м

Полученные результаты свидетельствуют лишь об изменении приведенной зоны осколочного поражения. При переходе к боеприпасам с управляемым дистанционным подрывом меняются не только параметры осколочного поражения, но и характеристики разброса точек подрыва. Резко сокращается разброс по дальности и появляется разброс по высоте. С учетом этих изменений вероятность поражения цели одним выстрелом может дополнительно увеличиться в несколько раз.

Проведенные исследования демонстрируют, что идея траекторного доворота боеприпаса перед подрывом может стать следующим шагом повышения эффективности осколочного действия. Если обеспечение воздушного подрыва позволяет увеличить приведенную площадь осколочного поражения на 40...50 %, то в сочетании с траекторным доворотом площадь осколочного поражения может быть удвоена.

Разработанная методика позволяет адекватно и в короткое время оценивать параметры эффективности осколочного действия при наличии достоверной информации о параметрах формируемых боеприпасом осколочных полей.

### Литература

- [1] Руссков В.Ф., Никулин Е.Н. *Основы проектирования кассетных артиллерийских боеприпасов*. Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т, 2013, 218 с.
- [2] Никулин Е.Н. *Оценка эффективности действия бронебойных подкалиберных и осколочных снарядов на базе вычислительного эксперимента*. Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т, 2010, 148 с.
- [3] Вентцель Е.С. *Введение в исследование операций*. Санкт-Петербург, Сов. радио, 1967. 390 с.
- [4] Белов А.Г. *Методы оценки эффективности действия боеприпасов на стадии проектирования*. Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т, 1996, 159 с.
- [5] Миропольский Ф.П. *Авиационные боеприпасы*. Москва, Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2010, 407 с.
- [6] Селиванов В.В., ред. *Средства поражения и боеприпасы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 984 с.

УДК 662.215.2.

## **Исследование влияния формы ударника и условий его взаимодействия с преградой на инициирование зарядов взрывчатых веществ в прочной оболочке**

**© Павлова Ирина Александровна, Петюков Андрей Вячеславович,  
Кобылкин Иван Федорович**

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[i.a.yakovenko@yandex.ru](mailto:i.a.yakovenko@yandex.ru)

*Представлены результаты численного моделирования процесса возбуждения детонации в зарядах взрывчатых веществ (ВВ), ограниченных стальными оболочками, при воздействии цилиндрических ударников в диапазоне скоростей 500...1 500 м/с. Определены наиболее оптимальные форма, размер и скорость ударника для инициирования детонации в различных зарядах ВВ.*

**Ключевые слова:** заряд взрывчатого вещества в оболочке, возбуждение детонации, ударная волна, численное моделирование, кинетика разложения.

Несмотря на многочисленные работы, посвященные изучению механизмов и критериев возбуждения и распространения взрывных превращений в зарядах ВВ, ограниченных оболочками, при высокоскоростном ударном воздействии компактных ударников (КУ) [1, 2], остается достаточно много нерешенных вопросов. В частности, в недостаточной степени изучены механизмы и критерии ударно-волнового возбуждения интенсивных ответных реакций (детонации, частичной детонации) в снаряжении боеприпасов при высокоскоростном воздействии КУ в диапазоне скоростей 1 500...2 000 м/с.

Менее интенсивное воздействие КУ в диапазоне скоростей 500...1 500 м/с может быть использовано для возбуждения взрывных превращений в снаряжении различных оболочечных взрывных устройств при гуманитарном разминировании [3]. Для проектирования соответствующих систем разминирования должны быть известны механизмы и критерии возбуждения взрывных превращений, вызывающих разрушение уничтожаемых боеприпасов.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования возбуждения детонации в зарядах ВВ, ограниченных прочными оболочками, при высокоскоростном воздействии компактных ударников.

Постановка задачи представлена на рис. 1. Для исследования была выбрана модель инженерной мины, снаряженная различными ВВ: составом ТГ 40/60, ТНТ и ТГА.

Расчетная модель содержит четыре основных элемента: ударник, ВВ, оболочку и окружающий воздух. Материал ударника — среднеуглеродистая сталь. Форма ударника, его размеры, скорость, а также материал оболочки варьировались. Толщина оболочки составляла 5 мм. Численное моделирование было выполнено в программе LS-DYNA.

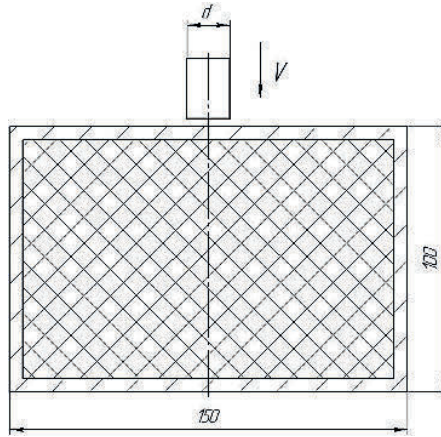


Рис. 1. Постановка задачи

В качестве уравнения состояния ВВ использовалось уравнение состояния JWL:

$$p(v, e) = A \left( 1 - \frac{\Gamma}{R_1 v / v_0} \right) \exp \left( -R_1 \frac{v}{v_0} \right) + B \left( 1 - \frac{\Gamma}{R_2 v / v_0} \right) \exp \left( -R_2 \frac{v}{v_0} \right) + \frac{\Gamma e}{v}. \quad (1)$$

Для описания кинетики разложения ВВ применяли модель Ли – Тарвера, в соответствии с которой скорость разложения ВВ описывается уравнением [2]

$$\frac{d\lambda}{dt} = \begin{cases} I(1-\lambda)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - \alpha \right)^x, & \text{если } \frac{\rho}{\rho_0} > \alpha \text{ и } \lambda < \lambda_{ig \max}; \\ G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y, & \text{если } \lambda < \lambda_{G1 \max}; \\ G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z, & \text{если } \lambda > \lambda_{G2 \max}. \end{cases} \quad (2)$$

Разработанная методика позволяет выбрать наиболее оптимальную форму, размер и скорость ударника для инициирования детонации в различных зарядах ВВ. Полученные результаты могут использоваться при проектировании систем разминирования.

### Литература

- [1] Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. *Возбуждение и распространение взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 354 с.
- [2] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва: в 2 т. Т. 1*. Москва, Физматлит, 2002, 823 с.
- [3] Almond R., Murray St. Projectile Attack on Surface Scattered Munitions. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 31, no 2, pp. 83–88.

## Численное моделирование взаимодействия фугасных зарядов с прочными преградами

© Петюков Андрей Вячеславович, Орленко Леонид Петрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[andre1524@rambler.ru](mailto:andre1524@rambler.ru)

*Представлено численное моделирование процесса взрыва зарядов взрывчатого вещества около прочных преград (стальные плиты). Моделирование проводилось в двух численных программах: ЭГИДА (Саров) и ЭРУДИТ (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Определены избыточное давление, удельный импульс на поверхности плиты, а также параметры ударной волны в запреградном пространстве.*

**Ключевые слова:** фугасные заряды, отражение фронта, удар продуктов детонации, численное моделирование, ЭГИДА, ЭРУДИТ.

Одно из основных требований, предъявляемых к перспективным высокоточным боеприпасам, — обеспечение универсальности их поражающего воздействия по широкой номенклатуре целей (танкам, объектам легкобронированной техники, фортификационным сооружениям и т. д.). Перспективным способом обеспечения универсальности является оснащение управляемых снарядов и ракет мощными фугасными боевыми частями (БЧ).

В связи с этим большой практический интерес представляет анализ взаимодействия фугасных зарядов (ФЗ) с различными элементами защиты танковых целей: активной защиты, динамической защиты (ДЗ) (встроенной и навесной) и многослойной брони, а также исследование запреградного действия ФЗ.

В настоящей работе делается попытка проанализировать методами численного моделирования влияние скорости движения заряда взрывчатого вещества (ВВ), расстояния от заряда ВВ до брони танка, массы и типа ВВ на действие на поверхности цели и на запреградное действие.

Численное моделирование проводилось в программах «ЭГИДА» [1] и «ЭРУДИТ» [2]. Начальная геометрия задачи показана на рис. 1.

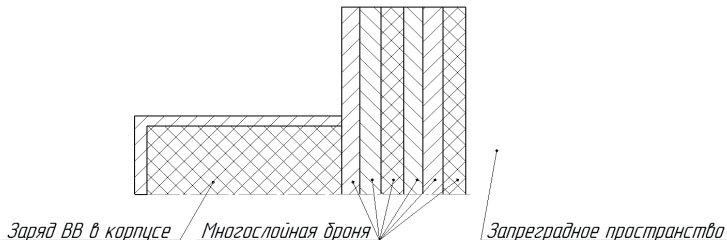


Рис. 1. Начальная геометрия задачи

Ниже приведена система исходных уравнений, включающая в себя закон сохранения количества движения, массы, энергии и дифференциальные уравнения для компонент девиатора напряжений:

$$\begin{aligned} \frac{dK}{dt} + \int_S \rho u^2 dS &= \int_V \operatorname{div} T dV; \\ \frac{dM_\xi}{dt} + \int_{S_\xi} \rho_\xi u_\xi dS &= 0; \\ \frac{dE_\xi}{dt} + \int_{S_\xi} \rho_\xi e_\xi u_\xi dS &= \int_{V_\xi} \operatorname{Sp}(T_\xi D_\xi) dV; \\ \frac{dS_{xx}^\xi}{dt} + m(2G^\xi \lambda S_{xx}^\xi) &= 2G^\xi \left( d_{xx} - \frac{d_{xx} + d_{yy} + d_\phi}{3} \right) + \delta_{xx}^\xi; \\ \frac{dS_{yy}^\xi}{dt} + m(2G^\xi \lambda S_{yy}^\xi) &= 2G^\xi \left( d_{yy} - \frac{d_{xx} + d_{yy} + d_\phi}{3} \right) + \delta_{yy}^\xi; \\ \frac{dS_{xy}^\xi}{dt} &= 2G^\xi d_{xy} + \delta_{xy}^\xi; \\ S_\phi^\xi &= -S_{xx}^\xi - S_{yy}^\xi, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $K$  — количество движения;  $\rho$  — плотность;  $u$  — скорость;  $T$  — тензор напряжений;  $M_\xi$  — масса  $\xi$ -го компонента;  $\rho_\xi$  — плотность  $\xi$ -го компонента;  $u_\xi$  — скорость  $\xi$ -го компонента;  $E_\xi$  — энергия  $\xi$ -го компонента;  $e_\xi$  — удельная энергия  $\xi$ -го компонента;  $T_\xi$  — тензор напряжений  $\xi$ -го компонента;  $D_\xi$  — тензор скоростей деформаций  $\xi$ -го компонента;  $S_{ij}^\xi$  — компоненты тензора девиатора напряжений  $\xi$ -го компонента;  $G^\xi$  — модуль сдвига  $\xi$ -го компонента;  $d_{ij}$  — компоненты тензора скоростей деформаций;  $\delta_{ij}^\xi$  — поправки Яумана для  $\xi$ -го компонента.

Система уравнений (1) дополняется уравнениями веществ, участвующих в расчете [3].

В результате проведенной серии расчетов были получены значения избыточного давления и импульса положительной фазы сжатия в запреградном объеме в зависимости от скорости, массы и типа заряда ВВ, а также от расстояния до преграды.

### Литература

- [1] Янилкин Ю.В., ред. *Код ЭГИДа-2D для моделирования двумерных задач*. Саров, ФГУП «ВНИИЭФ», т. 1–2, 2008.
- [2] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные среды с использованием данных пьезоакселерометрии. *Журнал технической физики*, 2011, т. 81, вып. 7, с. 94–104.
- [3] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва: в 2 т*. Москва, Физматлит, 2004, 1488 с.

## **Исследование поражающего и ударно-проникающего действия одномоторных поршневых самолетов по боевым надводным кораблям**

© Попов Юлиан Витальевич, Пусев Владимир Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[mva\\_2805@mail.ru](mailto:mva_2805@mail.ru)

*Рассмотрены поражающее и ударно-проникающее действия одномоторных поршневых самолетов и других средств поражения, применявшихся японскими пилотами-смертниками (камикадзе) во Вторую мировую войну по американским боевым надводным кораблям классов эскадренный и эскортный миноносец. На основе справочных данных проведено исследование причин потопления боевых надводных кораблей и построена зависимость числа потопленных кораблей от числа попавших в них самолетов для камикадзе. На основе аналитических подходов определены баллистические пределы для самолетов и других средств поражения (пилотируемые ракеты и авиабомбы), которые применялись камикадзе. Показано, что в подавляющем количестве случаев самолеты и другие средства поражения могли пробивать корабельные преграды, что существенно увеличивало их поражающее действие. Полученные результаты важны не только для анализа предшественников управляемого противокорабельного оружия, но и для оценки опасности от террористических атак с применением самолетов.*

**Ключевые слова:** ударно-проникающее действие, одномоторные поршневые самолеты, средства поражения, эскадренные миноносцы, эскортные миноносцы, баллистический предел.

В период Второй мировой войны, начиная с 1944 г., любые операции на море союзники СССР по антигитлеровской коалиции проводили только после завоевания господства в воздухе. Господство в воздухе предопределяло и господство на море [1]. Если при вступлении США в 1941 г. во Вторую мировую войну господство в воздухе принадлежало вооруженным силам Японии [2], то к концу 1943 г. ситуация кардинально изменилась в пользу военно-морских сил (ВМС) США. При этом летно-боевые возможности ВМС США и ВМС Японии стали несопоставимыми [2–4]. К концу июня 1944 г. ВМС Японии удалось создать группировку авианосцев, имевших на борту 450 самолетов. Но в сражении у Марианских островов практически все эти самолеты (90 %) были уничтожены и палубная авиация Японии фактически перестала существовать, а на смену ей пришли камикадзе (в переводе с яп. камикадзе означает божественный ветер, который по японским преданиям в 1274 и 1281 годах в виде урагана, посланного богами, дважды разметал флот татарских ханов для вторжения в Японию [4]). Первая спланированная атака камикадзе была проведена японцами 4 июля 1944 г., в День независимости США, в ходе боев за острова Иводзима и Титидзима. Через 4 месяца был создан специальный штурмовой корпус камикадзе, на

его вооружении находились самолеты обычных типов оснащенные авиабомбами (АБ), торпедами или боевыми частями (БЧ) [2–6].

Целью работы является исследование поражающего и ударно-проникающего действия одномоторных поршневых самолетов для камикадзе по боевым надводным кораблям классов эскадренных (эсминцев) и эскортных миноносцев. Значительное количество потопленных и поврежденных кораблей этих классов объясняется их использованием в качестве кораблей радиолокационного дозора на самых опасных направлениях, поэтому на них в первую очередь направлялись атаки самолетов камикадзе [7, 8]. Проведены детальные исследования типов потопленных и поврежденных (не подлежавших восстановлению) эсминцев и эскортных миноносцев на основе справочной литературы и других публикаций [8–13]. Установлено, что более половины (60 %) потопленных эсминцев приходятся на корабли типа «Флетчер» (10) и «Ален М. Самнер» (2), что связано с особенностями развития эсминцев ВМС США между Первой и Второй мировыми войнами. В результате расшифровки кодовых обозначений союзников для японских самолетов [2, 4, 13] установлено, что подавляющее число типов самолетов для камикадзе при потоплении и повреждении кораблей являлись одномоторными. В двух случаях были применены двух- и четырехмоторные самолеты. На основе анализа габаритно-массовых характеристик многомоторных самолетов [5,14], можно принять двухмоторный самолет по поражающему действию на корабль эквивалентным трем одномоторным самолетам, а четырехмоторный самолет — пяти одномоторным самолетам. С учетом этих допущений построена зависимость числа потопленных и поврежденных эсминцев ВМС США от числа попавших самолетов для камикадзе.

Для оценки ударно-проникающего действия самолетов для камикадзе по надводным кораблям классов эсминцев и эскортных миноносцев использовались аналитические подходы для деформируемых летательных аппаратов при высокоскоростном ударе [15]. Расчеты проводились для наиболее защищенных эсминцев типа «Флетчер», которые имели противоосколочное бронирование наиболее важных участков палубы и борта толщиной 12,7 мм (0,5 дюйма). С учетом того, что относительная толщина таких преград (отношение толщины преграды к диаметру мишени) составляет менее 0,01, применились подходы конечной (терминальной) баллистики для относительно тонких преград. Аналогичные подходы справедливы и для АБ калибра 60 и 250 кг, которые часто подвешивались под самолеты для камикадзе. На основе проведенных расчетов установлено, что в подавляющем большинстве случаев самолеты для камикадзе вместе с подвешенными АБ могли пробивать палубу и обшивку борта эсминцев и эскортных миноносцев ВМС США, что существенно повышало их поражающее действие. Полученные результаты имеют не только важное значение для оценки самолетов для камикадзе как одного из прототипов и предшественников современного управляемого противокорабельного оружия, но и являются актуальными в настоящее время для оценки опасности террористических действий с применением самолетов.

### Литература

- [1] Кузин В.П., Никольский В.И. *Военно-морской флот СССР 1945–1991*. Санкт-Петербург, Историческое морское общество. 1996, 653 с.
- [2] Пусев В.И., Овчинников А.Ф., Марков В.А. Крылатые и противокорабельные ракеты Второй мировой войны и их послевоенные аналоги. *Оборонная техника*, 2006, № 1–2, с. 133–143.

- [3] Бешанов В.В. *Энциклопедия авианосцев*. Москва, АСТ; Минск, Харвест, 2002, 432 с.
- [4] Полмар Н. *Авианосцы: в 2 т. Т. 1*. Москва, АСТ, 2001, 698 с.
- [5] Мансон К. *Истребители и бомбардировщики Второй мировой войны*. Москва, ЗАО «Центрополиграф», 2003, 173 с.
- [6] Пусев В. И., Марков В.А. Оценка компоновки и ударно-проникающего действия одномоторных поршневых самолетов. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2009, № 5–6, с. 68–73.
- [7] Капцов О. Сколько американских кораблей потопили камикадзе? *Военное обозрение*. 07.01.2013. URL: <http://topwar.ru/22771-skolko-americanskih-k> (дата обращения 07.05.2015).
- [8] Роско Т. Сильнее «божественного ветра». Эсминцы США: война на Тихом океане. Москва, АСТ, 2005. URL: <http://alexgbolnych.narod.ru/rosko2/index/htm> (дата обращения 07.05.2015).
- [9] Оружие Второй мировой войны. Флот. Корабли надводные. *Электронные иллюстрированные справочники*. URL: <http://www/wmbet.net/> (дата обращения 18.05.2015).
- [10] Dictionary of American naval fighting ships. *DANFS Online*. URL: <http://www.hozegrey.org/danfs/> (дата обращения 02.06.2015).
- [11] List of United States Navy losses in World War II. *Wikipedia*. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/List-of-Unit> (дата обращения 10.06.2015).
- [12] Veronico N.A. *World War II shipyards by the bay (Images of America)*. Arcadia Publishing (USA). 2007, 128 p. URL: <http://books.google.ru/boo> (дата обращения 12.06.2015).
- [13] Кодовые обозначения японских самолетов Второй мировой войны. URL: <http://oocities.org/tokyo/towers/6717/wwii> (дата обращения 19.06.2015).
- [14] *Виртуальный авиационный справочник «Уголок неба»*. URL: <http://www.airwar.ru/other/draw/> (дата обращения 19.06.2015).
- [15] Марков В.А., Попов В.А., Пусев В.И. Определение баллистического предела летательных аппаратов при высокоскоростном взаимодействии с тонкими металлическими экранами на основе аналитических подходов. *Мат. XXI Междунар. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. Вятчи, 16–20 февраля 2015 г. Т. 2. Москва, ООО «ТРИП», 2015, с. 171–180.

УДК 620.17:621.646.94

## **Расчет амортизирующих характеристик по диаграммам деформирования блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов**

© Попов Юлиан Витальевич, Пусев Владимир Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[mva\\_2805@mail.ru](mailto:mva_2805@mail.ru)

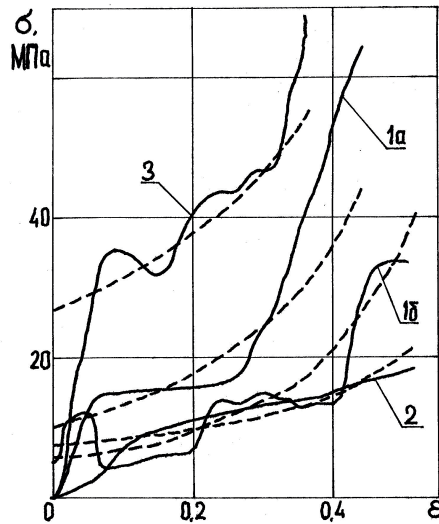
*Исследованы амортизирующие характеристики блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов. Проведен расчет с использованием пакета прикладных программ MatLab, основанный на результатах испытаний блоков внутреннего оборудования на сжатие при упругопластических деформациях и уплотнении. Оценены амортизирующие характеристики в виде удельной энергии поглощения удара и эффективной энергии поглощения удара.*



**Ключевые слова:** блоки внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов, амортизирующие характеристики, удельная энергия поглощения удара, эффективная энергия поглощения удара.

В известных методах механических испытаний блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов при статических и динамических нагрузках не предусмотрено доведение конструкции блоков до пластических деформаций и уплотнения. Это обусловлено тем, что основной целью данных испытаний является проверка функционирования аппаратуры при неразрушающих эксплуатационных нагрузках [1–3]. В результате испытаний блоков внутреннего оборудования на сжатие при упругопластических деформациях и уплотнении получены диаграммы деформирования, которые позволяют оценить не только механические свойства, но и амортизирующие характеристики блоков.

Испытания блоков внутреннего оборудования проводились в статических условиях на прессе силой 0,5 МН. В процессе деформирования и уплотнения велась непрерывная запись диаграмм деформирования в координатах сила — перемещение ( $F-x$ ). Пересчет машинных диаграмм в координаты напряжение — деформация ( $\sigma-\epsilon$ ) проводился при условии постоянной площади поперечного сечения блоков, равной начальной, так как при деформировании и уплотнении площадь поперечного сечения увеличилась незначительно (не более 5...10 %) [4]. Диаграммы деформирования приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Диаграммы деформирования блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов при пластических деформациях и уплотнении:

— диаграммы деформирования блоков;  
 - - - - - аппроксимация с помощью логарифмической зависимости напряжения  $\sigma$  от пористости  $\alpha$ , примененной в [5] для пористых металлов)

Одной из амортизирующих характеристик блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов является удельная энергия поглощения удара, определяемая площадью под диаграммой деформирования:

$$A = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon.$$

Эффективная энергия поглощения удара рассчитывается как отношение удельной энергии поглощения удара реального амортизатора к удельной энергии поглощения удара идеального амортизатора и всегда меньше единицы:

$$E = \frac{A}{\sigma_{\max} \varepsilon_{\max}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\max}$  — максимальное напряжение, возникающее на отрезке  $[0, \varepsilon_{\max}]$ ;  $\varepsilon_{\max}$  — максимальная деформация. Эффективная энергия поглощения удара применяется для сравнительной оценки амортизаторов.

При определении амортизирующих характеристик необходимо вычислить интеграл от функции  $\sigma(\varepsilon)$ . Функция задана таблично на отрезке  $[0, \varepsilon_{\max}]$ , что не позволяет получить аналитические выражения для амортизирующих характеристик. Но задачу можно решить путем численного интегрирования, что дает возможность получить приближенное значение интеграла.

Введем на отрезке  $[0, \varepsilon_{\max}]$  сетку с переменным шагом  $h_i$ , которая соответствует множеству точек:

$$w_h = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_i = \sum_{k=1}^i h_k, \quad i = \overline{0, N} \\ \sum_{i=1}^N h_i = \varepsilon_{\max} \end{array} \right\}.$$

Представим интеграл в виде суммы интегралов по частичным отрезкам

$$\int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \sum_{i=1}^N \left( \int_{\varepsilon_{i-1}}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \right). \quad (2)$$

Таким образом, для построения формулы численного интегрирования на всем отрезке достаточно построить квадратурную формулу для интеграла

$$\int_{\varepsilon_{i-1}}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

на частичном отрезке  $[0, \varepsilon_{\max}]$  и воспользоваться уравнением (2).

Для вычисления интеграла на частичном отрезке воспользуемся формулой трапеций [6]:

$$\int_{\varepsilon_{i-1}}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \cong \frac{\sigma(\varepsilon_{i-1}) + \sigma(\varepsilon_i)}{2} h_i,$$

которая получается путем замены подынтегральной функции  $\sigma(\varepsilon)$  интерполяционным многочленом первой степени, построенным по узлам  $\varepsilon_{i-1}, \varepsilon_i$ .

При вычислении удельной энергии поглощения удара и эффективной энергии поглощения удара использовался пакет прикладных программ MatLab. Удельная энергия поглощения удара вычислялась с помощью функции trapz(x,y), реализующей метод трапеций. В результате получен вектор, содержащий значения удельной энергии поглощения удара в зависимости от значений деформации. Это позволяет построить график зависимости  $A(\varepsilon)$ .

Для практического использования полученных данных определена погрешность найденного значения удельной энергии поглощения удара. Для этого была проведена апостериорная оценка погрешности по правилу Рунге [6].

Рассмотрим квадратурную формулу, имеющую на частичном отрезке порядок точности  $m$ . В этом случае справедливо выражение

$$I_i - I_{h,i} \cong c_i h_i^m, \quad (3)$$

где  $I_i$  — точное значение интеграла на частичном отрезке,  $I_{h,i}$  — квадратурная сумма на частичном отрезке. Тогда на основании (2) можно записать

$$I_i - I_{h/2,i} \cong c_i \left(\frac{h_i}{2}\right)^m. \quad (4)$$

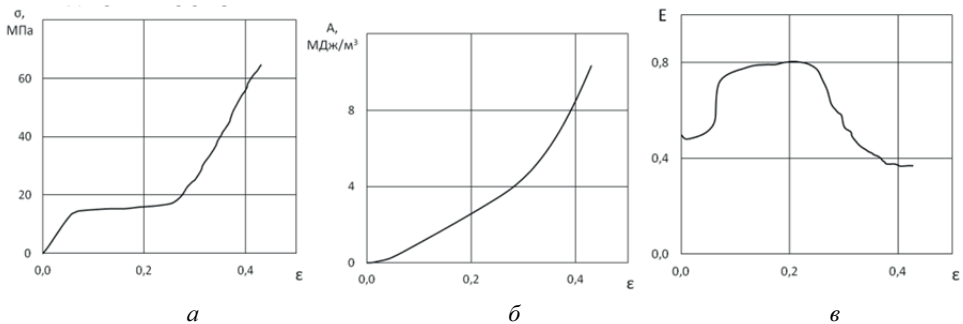
Подставив (3) в (4) и выполнив преобразования, получим

$$I_i - I_{h,i} \cong 2^m (I_i - I_{h/2,i});,$$

$$I_i - I_{h/2,i} \cong \frac{I_{h/2,i} - I_{h,i}}{2^m - 1}.$$

Проведем на каждом частичном отрезке  $[\varepsilon_{i-1}, \varepsilon_i]$  все вычисления дважды, один раз с шагом  $h_i$  и второй раз с шагом  $h_i/2$  и оценим погрешность по правилу Рунге:

$$R_0 = |I - I_{h/2}| = \sum_{i=0}^N |I_i - I_{h/2,i}| \cong \frac{|I_{h/2} - I_h|}{2^m - 1}. \quad (5)$$



**Рис. 2.** Диаграмма деформирования (а), удельная энергия поглощения удара (б) и эффективная энергия поглощения удара блока (в) при пластических деформациях и уплотнении

Для метода трапеций  $m = 2$ , поэтому выражение (5) примет вид

$$R_0 \cong \frac{|I_{h/2} - I_h|}{3}.$$

Проведя расчет по формуле (1), получим вектор, содержащий значения эффективной энергии поглощения удара, которые поставлены в соответствие значениям деформации. Это позволяет построить график зависимости  $E(\epsilon)$ .

По диаграммам деформирования, приведенным на рис. 2, можно оценить механические свойства и амортизирующие характеристики блоков.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-007869-а).*

### Литература

- [1] Ленк А., Реницц Ю. *Механические испытания приборов и аппаратов*. Москва, Мир, 1976, 270 с.
- [2] Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. *Инженерные методы исследования ударных процессов*. Москва, Машиностроение, 1977, 240 с.
- [3] Кузьмин Э.Н. *Обеспечение виброударостойкости оборудования и аппаратуры*. Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006, 320 с.
- [4] Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Попов Ю.В., Пусев В.И., Селиванов В.В. Деформирование блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов при больших упругопластических деформациях и уплотнении. *XVI Международ. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. Вятичи, 16–20 февраля 2015 г. Т. 2. Москва, ООО «ТРП», 2015, с. 95–101.
- [5] Heckel R.W. An analysis of powder compaction phenomena. *Trans. Met. Soc. AIME*, 1961, vol. 221, no 6, pp. 173–183.
- [6] Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. *Вычислительные методы для инженеров*. Москва, Высш. шк., 1994, 544 с. URL: [http://info.alnam.ru/book\\_clm.php?id=102](http://info.alnam.ru/book_clm.php?id=102) (дата обращения 03.07.2015).

УДК 677.074.13

## Разработка структуры арамидной ткани с повышенной противоосколочной стойкостью

© Сафонов Павел Евгеньевич, Левакова Наталия Марковна

Россия, г. Москва, ООО «ТЕКС-ЦЕНТР»

[pavlin722007@yandex.ru](mailto:pavlin722007@yandex.ru)

*По результатам проведенного исследования установлена принципиальная возможность дальнейшего повышения противоосколочной стойкости серийной ткани саржевого переплетения из высокомодульных арамидных нитей Руслан. Предложенная структура ткани отличается от имеющихся аналогов нитями с малой величиной*

крутки, или повышенным удельным объемом, которые имеют одинаковую степень изгиба в структурном элементе ткани и могут свободно вытягиваться из ткани, что позволяет эффективно поглощать энергию поражающего элемента.

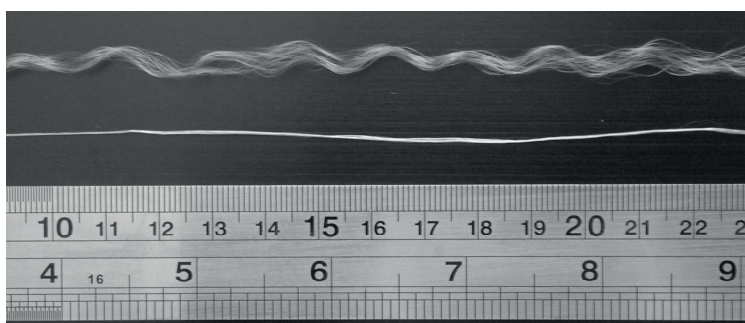
**Ключевые слова:** арамидные нити, противоосколочная стойкость, средства индивидуальной бронезащиты, строение ткани.

При проектировании тканей с заданными свойствами, предназначенных для изготовления средств индивидуальной бронезащиты, особое значение имеют их геометрические параметры строения. Как было установлено ранее [1], совершенствование структур тканей для баллистической защиты на основе высокомодульных комплексных параарамидных нитей затрудняется в силу того, что в существующих серийных тканях нити основы и утка имеют различную степень изгиба. Это приводит к тому, что при взаимодействии с поражающим элементом первыми разрушаются нити наименее изогнутой системы, т. е. свойства переплетающихся систем нитей в ткани не реализуются в полной степени.

Неполная реализация свойств нитей в ткани обуславливает то, что арамидные тканые материалы заменяются неткаными и композиционными материалами (UD-структурами) на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена [2], в которых нити укладываются слоями, не переплетаясь друг с другом, а скрепление уложенных слоев осуществляется с помощью специальной матрицы, что позволяет исключить процесс ткачества [3].

Таким образом, в условиях возросшей конкуренции на рынке текстильных материалов перед предприятиями производителями арамидных тканей стоит актуальная задача повышения качества и совершенствования структур своей продукции.

Цель работы заключалась в повышении противоосколочной стойкости серийной ткани арт. 84127 (ТУ 8378-020-00320992—2004). Для увеличения показателя  $V_{50}$  предложено в основе и утке ткани использовать нити с величиной крутки 0...50 кр./м или текстурированные нити, отличающиеся от имеющихся аналогов увеличенным удельным объемом — до 60 раз. На рис. 1 для сравнения представлены фотографии высокообъемной и комплексной параарамидной нити Руслан 29.4 текс.



**Рис. 1.** Текстурированная высокообъемная нить (вверху) в сравнении с нитью Руслан 29.4 текс 0 кр./м (внизу)

Целесообразность использования комплексных нитей с малой величиной крутки, или повышенным объемом продиктована рядом работ [4, 5] в которых указано на взаимосвязь между круткой нитей и баллистической эффективностью ткани.

Нити с малой величиной крутки, или увеличенным объемом имеют бóльшую «рабочую» поверхность в структуре ткани (количество участвующих в деформировании нити филаментов максимальное), что обеспечивает высокую противоосколочную стойкость.

Разработанная структура ткани также характеризуется равенством степеней изгиба нитей основы и утка в элементе ткани, а значит, нити обеих систем имеют возможность свободно вытягиваться и раздвигаться друг относительно друга, что обеспечивает одновременность их включения в работу деформирования ткани при ее взаимодействии с поражающим элементом.

В связи с тем, что арамидные нити с малой величиной крутки в процессе снования и ткачества могут значительно повреждаться, в особенности на современном высокоскоростном оборудовании, предложены мероприятия по снижению их повреждаемости.

По итогам проведенных исследований были разработаны структуры нитей, тканей и технологические параметры их изготовления на современном оборудовании, которые позволили увеличить противоосколочную стойкость серийной ткани саржевого переплетения с 550 до 580 м/с.

### Литература

- [1] Сафонов П.Е., Левакова Н.М., Юхин С.С., Буланова М.Е. Разработка рациональных структур мягкой баллистической защиты на основе арамидных нитей Руслан. *Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении*. Москва, ФГУП «НТЦ «Информтехника», 2013, Вып. 3 (170) – 4 (171), с. 27–33.
- [2] Ahmad M.R., Hassim N., Ahmad W.Y.W., A Samsuri., Yahya M.H.M. Preliminary Investigation on the Ballistic Limit of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Unidirectional Coated Fabric System. *FIBRES AND TEXTILES in Eastern Europe*, 2013, vol. 21, no 3 (99), pp. 89–94.
- [3] S. Zbigniew Effect of velocity of the structure-dependent tension wave propagation on ballistic performance of aramid woven fabrics. *FIBRES AND TEXTILES in Eastern Europe*, 2011, vol. 19, № 4 (87), pp. 74–80.
- [4] Морозова Т.В., Клепиков И.В. Исследование противоосколочной стойкости и характера разрушения арамидных бронематериалов различной текстильной структуры. *Тез. докл. VIII Междунар. конф. «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты»*. Хотьково, 2005, с. 19–20.
- [5] Беттгер К., Хартерт Р. *Устойчивое к пробиванию текстильное полотно и изделие, содержащее такое текстильное полотно*. Пат. № 2525809 РФ, МПК D02G 3/44; заявл. 27.08.2010; опубл. 20.08.2014, бюл. № 23, 5 с.

## Способ увеличения тяги несущего винта вертолета

© Стадников Евгений Александрович, Агаев Заур Нурадинович

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

[agaev.79@yandex.ru](mailto:agaev.79@yandex.ru)

*Предложен способ увеличения тяги несущего винта вертолета, с применением системы принудительного обдува лопасти, использующей электронно-ионные технологии создания ионного ветра базирующееся на эффекте Бифельда — Брауна.*

**Ключевые слова:** *лопасть несущего винта, электронно-ионные технологии, эффект Бифельда — Брауна.*

Современный вертолет относится к наукоемким изделиям. Создание летательных аппаратов с высокими летно-техническими характеристиками и технико-экономическими показателями требует больших средств, наличие квалифицированного персонала, вычислительных мощностей, производственных ресурсов и испытательной базы.

В настоящее время начаты работы по проекту перспективного ударного скоростного вертолета на базе перспективного скоростного вертолета. Рассматриваются варианты военных версий проектов Ми-Х1, Ка-90 и Ка-92. Перспективный ударный скоростной вертолет планируется оснастить всем комплексом современного и разрабатываемого ударного вертолетного вооружения.

Увеличение скорости вертолета относится, в первую очередь, к лопасти несущего винта (НВ), так как технические характеристики вертолета в значительной степени определяются аэродинамическими данными его несущего винта и фюзеляжа [1].

При решении этой задачи необходимо решить множество проблем. Одна из проблем связана с кинематикой работы шарнирного несущего винта. С ростом скорости полета маховое движение лопастей увеличивается и углы атаки в некоторых сечениях могут достигнуть критической величины, после которой наступает срыв потока. Работа винта на таких режимах сопровождается целой группой негативных эффектов; их стараются не допустить соответствующим выбором параметров при проектировании вертолета [2].

При проектировании НВ современного скоростного вертолета необходимо обеспечить компромиссное решение при выборе частоты вращения винта: с одной стороны — уменьшение числа Маха  $M_0$  конца наступающей лопасти, которое позволяет ослабить проявление эффектов сжимаемости воздуха; с другой стороны — увеличение окружной скорости конца лопасти, которое приводит к уменьшению зоны срыва и обратного обтекания на диске несущего винта.

Один из путей решения проблемы улучшения характеристик лопастей несущего винта вертолета — применение системы принудительного обдува лопасти, в котором использованы электронно-ионные технологии создания ионного ветра, базирующееся на эффекте Бифельда — Брауна [3]. Сущность данного эффекта заключается в

электрическом явлении возникновения ионного ветра, который передает свой импульс окружающим нейтральным частицам. Явление основано на коронном разряде в сильных электрических полях, что вызывает ионизацию атомов воздуха вблизи острых и резких граней. При этом обычно используется пара из двух электродов (асимметричный конденсатор). Один из них должен быть тонким либо острым, вблизи него напряженность электрического поля максимальна и может достигать значений, вызывающих ионизацию воздуха (рис. 1). Второй электрод должен быть широким с плавными гранями.

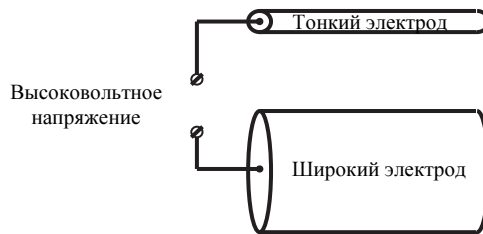


Рис. 1. Схема подключения электродов

Ионный ветер возникает при напряжении между электродами в десятки киловольт, вплоть до мегавольт. Наибольшая эффективность явления достигается при напряжениях порядка 1 кВт на 1 мм воздушного зазора между электродами, т. е. при напряженностях поля чуть ниже, чем начало электрического пробоя воздушного зазора. Если между электродами возникает пробой, обычно в виде шнурового разряда, эффект пропадает (так как разряд сам превращает газ в ионы и напряжение на электродах равно падению напряжения на разряде). Вблизи тонкого электрода возникает ионизация атомов воздуха (кислорода — в случае отрицательного напряжения на этом контакте, азота — в случае положительного), образованные ионы начинают двигаться к широкому электроду, сталкиваясь с молекулами окружающего воздуха и отдавая им часть своей кинетической энергии. При этом молекулы превращаются либо в ионы, либо им придается дополнительное ускорение (ударная ионизация). Таким образом создается поток воздуха от тонкого электрода к широкому электроду, который обладает очень высоким удельным импульсом.

Возможный вариант применения данного эффекта для лопастей несущего винта вертолета схематично изображен на рис. 2.

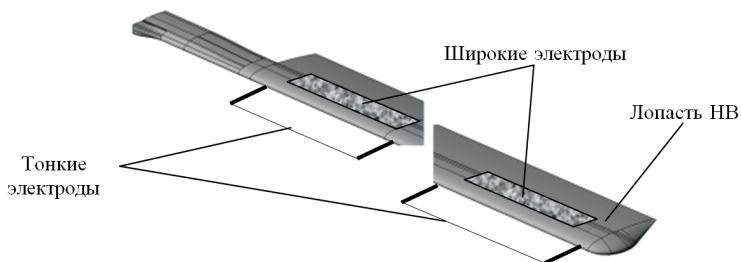


Рис. 2. Пример использования эффекта Бифельда — Брауна для лопастей НВ



Применение эффекта Бифельда — Брауна позволит существенно увеличить тягу НВ. Экспериментально установлено, что каждый киловатт мощности подведенный к НВ, используемому в своей конструкции эффект Бифельда — Брауна может создать подъемную силу от 20 до 40 кг. В сравнение: подъемная сила винта вертолета составляет всего 5,4 кг/кВт, а у самолетов с вертикальным взлетом подъемная сила на единицу мощности еще в 2–3 раза ниже, а у ракет она ниже в сотни раз.

Для исследования возможности применения системы принудительного обдува лопасти, использующей электронно-ионные технологии создания ионного ветра и базирующееся на эффекте Бифельда — Брауна, необходимо решить ряд частных задач:

- анализ электрогидродинамических течений, возникающих на лопасти НВ, при помещении ее в электростатическое поле высокой напряженности, образованное асимметричной электродной системой;

- разработка конструкции системы асимметричных электродов лопасти НВ.

Изготовить лопасти можно с применением различных технологий.

### Литература

- [1] Кривцов В.С., Карпов Я.С., Лосев Л.И. *Проектирование вертолетов*. Харьков, Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003, 344 с.
- [2] Курочкин Ф.П. *Конструирование винтов, силовых установок и приводов вертолета*. Москва, МАИ, 1980, 139 с.
- [3] Хмельник С.И. Конструирование летательных аппаратов на основе эффекта Бифельда — Брауна. *Доклады независимых авторов*, Россия-Израиль, Изд-во DNA, 2009, вып. 12.

УДК 621.396

## Метод размерности при решении задач физического моделирования для решения задач пассивной инфракрасной локации

© Терешин Андрей Николаевич<sup>1</sup>, Оськин Святослав Павлович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный машиностроительный университет

[tan12393@mail.ru](mailto:tan12393@mail.ru)

*В работе на основе теории размерности решается задача определения критериев подобия при физическом моделировании пространственно-временного взаимодействия аэродинамически нагретого тела и прибора для его пассивной инфракрасной локации.*

**Ключевые слова:** пассивная инфракрасная локация, область срабатывания, индикатриса, излучатель, импульс, лучистый поток.

Неуклонное повышение требований обеспечения безопасности полетов обуславливает появление новых систем локации, в том числе и бортовых, работа которых может строиться на основе различных физических принципов. Рост скоростей, достигающих в перспективе гиперзвуковых значений, появление суборбитальных летательных аппаратов, предназначенных для решения сугубо коммерческих задач, делает возможной пассивную инфракрасную (ИК) локацию, где источником информации служит собственное излучение аэродинамически нагретых тел.

Рассмотрим ситуацию, когда источником ИК излучения выступает обшивка аэродинамически нагретого летательного аппарата. В соответствии с общепринятой при построении систем локации терминологией, будем условно называть его «целью». Локационный прибор для пассивного обнаружения ИК-поля цели будем обозначать ПИКД (пассивный ИК-датчик).

Область, определяемую ИК-излучением рассматриваемой цели и используемую для регистрации ее взаимного расположения относительно датчика, называют областью срабатывания (ОС) ПИКД. При определении ОС наряду с дорогостоящим и не всегда доступным натурным способом может применяться метод физического моделирования, несомненными достоинствами которого являются относительная простота, доступность и, что особенно важно, сравнительно малая себестоимость.

Для успешного решения задачи определения ОС необходимо в лабораторных условиях воспроизвести параметры взаимодействия физических полей излучения цели и зоны чувствительности приемного устройства. Особенностью рассматриваемой задачи является взаимодействие в условиях перемещения приемника относительно источника излучения при заданных относительных скоростях и ракурсах. Теоретические предпосылки воспроизведения взаимодействия ПИКД и цели в лабораторных условиях сформулированы в теории подобия, задающей в качестве непрерывного условия подобия реального и лабораторного процессов равенство соответствующих (определенных) критериев. Как показывает практика, в ряде случаев, когда указанные критерии не являются очевидными, устранению неоднозначности при их выделении может способствовать привлечение метода теории размерности.

Рассмотрим задачу определения критериев подобия при использовании метода теории размерности на примере лабораторного моделирования работы пассивного ИК-датчика цели. В качестве лабораторного макета цели может выступать излучатель, форма которого соответствует геометрии моделируемого летательного аппарата. Распределение температур по поверхности макета должно соответствовать распределению излучения по поверхности реальной аэродинамически нагретой цели.

Для воспроизведения кинематических условий взаимодействия необходимо обеспечить относительное перемещение макета и ПИКД с заданной относительной скоростью сближения при заданных ракурсах.

Как известно, основа приложения метода теории размерности для решения задач физического моделирования заключается в том, что всякую систему уравнений, которая включает в себя математическую запись законов, управляющих явлением, можно сформулировать как соотношение между безразмерными величинами. Все выводы теории размерности сохраняются при любом изменении физических законов, представленных в виде соотношений между одними и теми же безразмерными величинами.

Система наиболее значительных параметров выделяется при изучении основных факторов, определяющих данный процесс. Для этого достаточно отметить все размерные и безразмерные величины, которые необходимо и достаточно знать для того,

чтобы численные значения всех искомым величин определялись уравнениями задачи [1, 2].

Область срабатывания прибора, в основе работы которого лежит принцип пассивной ИК-локации аэродинамически нагретых тел, является результатом пространственно-временного взаимодействия объектов и определяется геометрическими и энергетическими соотношениями между ними, а также временными и частотными характеристиками трактов приемного блока. Вследствие этого в данном случае можно выделить три основные группы определяющих параметров: кинематические условия встречи и цели, характеристики излучения цели и параметры приемного блока ПИКД.

В рассматриваемой задаче предполагается, что целью является цилиндрическое тело длиной  $l_{ц}$  и диаметром  $d_{ц}$  [3]. При этом делается допущение о равенстве нулю угла между продольной осью и вектором скорости цели  $\vec{V}_{ц}$ . В этом случае кинематические условия встречи будут определяться вектором скорости  $\vec{V}_{ц}$ , вектором скорости ПИКД  $\vec{V}_{\text{ПИКД}}$ , вектором скорости относительного перемещения  $\vec{V}_{\text{отн}}$ , а также радиусом  $r$  и углом  $\xi$  в системе полярных координат, задаваемой вектором относительной скорости  $\vec{V}_{\text{отн}}$ . В терминах теории исследования операций [3] это координаты  $r$  и  $\xi$  в цилиндрической системе координат, называемой «трубкой промахов». В некоторых ситуациях может также учитываться угол  $\delta$  между продольной осью  $OX$  датчика и вектором  $\vec{V}_{\text{ПИКД}}$ .

Как известно, параметры индикатрисы излучения цели зависят от распределения температуры аэродинамического нагрева по поверхности, материала обшивки, конфигурации цели и угла визирования на цель. Пространственный характер распределения лучистого потока от серого равномерного плоского излучателя в направлении визирования  $\alpha$  определяется энергетической силой излучения  $I_{\alpha}$  [4]:

$$I_{\alpha} = \frac{\varepsilon_T T^4}{\pi} S_{\alpha}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_T$  — интегральный коэффициент излучательной способности материала обшивки;  $T$  — температура поверхности, К;  $S_{\alpha}$  — проекция площади излучателя под углом  $\alpha$  к нормали.

При неравномерном характере распределения температуры по поверхности цели формула (1) применима лишь для дифференциальных участков, в пределах которых температура изменяется незначительно. Энергетическая сила излучения каждого такого участка  $I_{\alpha i}$  вычисляется по формуле (1) для элементарных площадок  $S_{\alpha i}$ , рассматриваемых в качестве однородных излучателей, в пределах которых температура  $T_i$  постоянна. Используя теорему аддитивности и считая справедливым для излучения цели закон Ламберта, энергетическую силу излучения всей цели в заданном направлении  $I_{\alpha}$  можно представить в виде суммы значений энергетической силы излучения однородных излучателей  $I_{\alpha i}$  в том же направлении. Для описания пространственного распределения лучистого потока от единицы поверхности цели можно воспользоваться энергетической яркостью  $B_{ц}$ , связанной с силой излучения цели  $I_{\alpha}$  посредством основных фотометрических соотношений.

В качестве важнейших характеристик приемного блока ПИКД можно выделить следующие: спектральная чувствительность фотоприемника  $S_u$  (I/A); коэффициент

использования фотоприемника излучения АЧТ при температуре  $T$  ( $K_{исп}^{ЧТ}$ ); коэффициент использования фотоприемника излучения цели при температуре нагрева  $T$  ( $K_{исп}^{и}$ ); площадь чувствительной площадки фотоприемника  $q_{плз}$  ( $m^2$ ); коэффициент пропускания оптики приемного блока  $\tau_0$ ; коэффициент виньетирования  $K_{в}$ ; коэффициент, учитывающий потери энергии за счет дифракционного расширения пучка лучей на кольцевой цели  $K_D$ ; угол наклона диаграммы чувствительности  $\Theta$  (град); угол поля зрения приемника  $\Delta\Theta$  (град).

В соответствии с известными положениями теории ИК-техники значение сигнала  $U_c$  на выходе фотоприемника в случае параллельных курсов может быть вычислено по формуле

$$U_c = \frac{K_{исп}^{и} S_u B_{ц} S_{ц} (\Theta, \Delta\Theta) q_{плз} \sin^2 \Theta \cos \Theta \sin \Theta \tau_0 \tau_{\alpha} K_B K_D}{K_{исп}^{ЧТ} r^2}, \quad (2)$$

где  $S_{ц}$  — площадь проекции цели на направление продольной оси,  $m^2$ ;  $\tau_{\alpha}$  — коэффициент пропускания атмосферы.

Для устранения неоднозначности характеристик приемника, вызванных производственным разбросом уровня чувствительности и размеров чувствительной площадки, можно воспользоваться величиной общей интегральной чувствительности фотоприемника  $S_q$ , определяемой произведением  $S_u q_{плз}$ .

При нахождении длительности импульса  $\tau$  на входе фотоприемника необходимо учитывать, что его величина зависит от времени нахождения цели в поле зрения ПИКД и задается размерами цели и кинематическими параметрами условий встречи.

С учетом изложенного функциональная зависимость размерных величин, подлежащая исследованию, имеет вид

$$f(\tau, r, U_c, S_q, S_{ц}, V_{отн}, B_{ц}, l_p) = 0. \quad (3)$$

В соответствии с положениями теории размерности выберем четыре независимые единицы применительно к основной системе измерений *ЛМТЛ*:  $\tau, r, U_c, S_q$ . Их размерности, выраженные через основные единицы системы СИ, можно представить в виде

$$\begin{aligned} [\tau] &= [M]^0 [L]^0 [T] [I]^0; \\ [r] &= [M]^0 [L] [T]^0 [I]^0; \\ [U_c] &= [M] [L]^2 [T]^{-3} [I]^{-1}; \\ [S_q] &= [M]^0 [L]^2 [T]^0 [I]^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Правильность сделанного выбора независимых параметров подтверждает отличие от нуля определителя ( $D_{1,4} = 1$ ) матрицы  $\|A\|$  размерностей уравнений (4).

Общая форма записи искомых критериев подобия применительно к выбранным независимым единицам измерения имеет вид

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{[l_p]}{[\tau]^{ml} [r]^{pl} [U_c]^{ql} [S_q]^{il}}; & \pi_2 &= \frac{[S_q]}{[\tau]^{ms} [r]^{ps} [U_c]^{qs} [S_q]^{ys}}; \\ \pi_3 &= \frac{[V_{отн}]}{[\tau]^{mV} [r]^{pV} [U_c]^{qV} [S_q]^{iV}}; & \pi_4 &= \frac{[B_{ц}]}{[\tau]^{mB} [r]^{pB} [U_c]^{qB} [S_q]^{yB}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражая все величины, входящие в критерии подобия, через основные единицы измерения, вычислив из простейших уравнений показатели  $m_i, p_i, q_i, \gamma_i$ , получаем искомые критерии:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{l_p}{r}; & \pi_2 &= \frac{S_{ц}}{r^2}; \\ \pi_3 &= \frac{V_{отн} \tau}{r}; & \pi_4 &= \frac{B_{ц} S_{ц}}{U_c}. \end{aligned} \quad (6)$$

Критерии  $\pi_1$  и  $\pi_2$  являются критериями геометрического подобия и выражают требование равенства при моделировании плоских и пространственных углов соответственно. Критерий гомохронности  $\pi_3$  — основной критерий механического движения, показывающий, как связаны скорость, длина и масштабы времени у подобно перемещающихся тел. Критерий  $\pi_4$  определяет условия подобия фотометрического пространства цели и фотоприемника.

Числовые характеристики различных, но подобных явлений можно рассматривать как числовые характеристики одного и того же явления, выраженные в различных системах единиц измерения. Для подобных явлений все безразмерные характеристики имеют одинаковое числовое значение. Применительно к решаемой задаче это означает неизменность параметров окружающей среды  $\tau_{\alpha}$ , коэффициента использования фотоприемника излучения АЧТ при температуре  $T$  ( $K_{исп}^{ЧТ}$ ); коэффициента использования фотоприемника излучения цели при температуре нагрева  $T$  ( $K_{исп}^{ц}$ ) и коэффициента пропускания  $\tau_0$  оптической системы. Важнейшим следствием сделанных допущений является обоснование возможности использования при проведении физического моделирования пространственно-временного взаимодействия процесса ИК-локации аэродинамически нагретой цели приемной оптической части реального ПИКД.

Для обеспечения кинематического подобия, согласно критерию гомохронности  $\pi_3$ , при уменьшении линейных размеров, соответствующих масштабу моделирования  $\alpha_p$  и при введении масштаба моделирования по времени  $\alpha_t$ , масштаб моделирования по скорости  $\alpha_v$  будет определяться произведением  $\alpha_p \alpha_t$ . Так, в частности, при скорости перемещения макета порядка 1 м/с, выборе  $\alpha_p = 100$  и  $\alpha_t = 100$  возможно воспроизведение в лабораторных условиях относительных перемещений, соответствующих значениям  $\bar{V}_{отн} \approx 10\,000$  м/с.

Следствием введения масштаба моделирования по времени является изменение частотных характеристик электрической части макета. Так, при масштабе моделирования  $\alpha_t$  следует соответствующим образом расширить полосу пропускания тракта в  $\alpha_t$  раз. Инерционность фотоприемника  $\tau_{0,63}$  можно учесть посредством соответствующей частотной коррекции приемного тракта, либо при помощи введения поправки на точку регистрации для конкретной скорости сближения [5].

Согласно критерию  $\pi_4$ , в случае постоянства  $S_q$  и  $U_c$  должно сохраняться равенство  $B_{ц}^{реал}$  и  $B_{ц}^M$ . Очевидно, что для этого необходимо обеспечение тождественности распределения температуры нагрева по поверхности цели и ее макета при сохранении без изменения излучательных свойств материала обшивки. Из этого утверждения следует равенство  $\varepsilon_T^{реал} = \varepsilon_T^M$ .

Использование штатного покрытия для макета цели в случае изменения соотношения между линейными размерами равносильно увеличению шероховатости поверхности, пропорциональному масштабу  $\alpha_p$ . В случае, когда высота микронеровностей превышает в несколько раз длину волны излучения, коэффициент излучения шероховатой поверхности рассчитывается по эмпирической формуле [4]:

$$\varepsilon_{\text{ТШ}} = \varepsilon_T \left[ I + 2,8(I - \varepsilon_T)^2 \right], \quad (8)$$

где  $\varepsilon_T$  — коэффициент излучения гладкой поверхности.

Из [4] следует, что для алюминиевой краски, нагретой до 325 °С ( $\varepsilon_T = 0,35$ ) ошибка при моделировании излучательной способности материала не превысит 3 %.

В заключение можно сделать вывод, что система критериев подобия при моделировании взаимодействия пассивного ИК-датчика и аэродинамически нагретой цели определяется геометрическими  $\pi_1$  и  $\pi_2$ , кинематическими  $\pi_3$  и фотометрическими соотношениями  $\pi_4$  между ними. Для нахождения ОС возможно использование приемной оптической части реального прибора для пассивной ИК-локации и макета цели, где распределение температур по поверхности повторяет распределение температур при аэродинамическом нагреве обшивки реального летательного аппарата.

#### Литература

- [1] Веников В.А. *Теория подобия и моделирования*. Москва, Высш. шк., 1976.
- [2] Венцель Е.С. *Введение в исследование операций*. Москва, Сов. радио, 1964.
- [3] Криксунов Л.З. *Справочник по основам инфракрасной техники*. Москва, Сов. радио, 1978.
- [4] Коган И.М. *Ближняя радиолокация*. Москва, Сов. радио, 1973.
- [5] Коган И.М. *Проектирование радиоустройств*. Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1964, 288 с.
- [6] Оськин С.П. *Метод размерности при выборе критериев физического моделирования для решения задач пассивной инфракрасной локации*. Деп. в РАО. Москва, 2014, № 21574. Дата депонирования: 17.03.2014.
- [7] Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. Москва, Наука, 1981.

УДК 351.82

## О перспективах развития автоматического оружия (на примере автоматов)

© Фархетдинов Ришат Римович, Писарев Сергей Анатольевич

Россия, Удмуртская Республика, г. Ижевск, Ижевский государственный  
технический университет имени М.Т. Калашникова

[farhetdinov.r.r@yandex.ru](mailto:farhetdinov.r.r@yandex.ru)

*Исследованы пути развития автоматического оружия на примере автоматов. Определены тенденции изменения основных характеристик оружия. Проанализированы пути повышения вероятности попадания в характерные цели при*

стрельбе из Ак-74М. Обоснована актуальность разработки автомата модульной конструкции.

**Ключевые слова:** системный анализ, боевая эффективность, боевое стрелковое оружие, система вооружения, вероятность поражения, автомат модульной конструкции.

Прежде чем создавать новые перспективные образцы оружия необходимо исследовать и оценить функциональные и конструктивные возможности основных кинематических схем оружия, применив системную логику, и только после этого обосновать с научных и профессиональных позиций кинематическую схему для разработки нового эффективного автомата [1].

**Анализ возможностей различных конструктивных схем оружия.** Анализ конструкции современных общевойсковых автоматов показывает, что в абсолютном большинстве работа их автоматики основана на принципе отвода пороховых газов через отверстие в стенке ствола и передаче их энергии массивному ведущему звену автоматики — затворной раме, расходующей ее на совершение работ по перезарядке оружия. Однако существует ряд других конструктивных схем автоматики, имеющих те или иные достоинства, что приводит к вопросу о наиболее целесообразной для перспективного общевойскового автомата схеме работы автоматики.

Проведены системные исследования влияния различных конструктивных схем автоматики на эффективность стрельбы, уменьшение массо-габаритных характеристик оружия и стоимости оружия, повышение его эксплуатационных и эргономических показателей, возможность унификации оружия. Кроме того исследована возможность применения в различных конструкциях оружия вспомогательных средств поражения, наблюдения, прицеливания, целее указания, а также средств удержания и управления оружием [2].

Также с целью обоснования перспективной конструктивной схемы автомата проведены исследования по определению тенденций изменения параметров стрелкового оружия за последние 40 лет:

- эффективности стрельбы;
- массо-габаритных характеристик;
- двигателей автоматики;
- технологии производства;
- степени унификации образцов;
- модульности образцов;
- боеприпасов.

В результате исследований определено, что схема с отводом пороховых газов через отверстие в стенке канала ствола обладает преимуществами, которые необходимы для создания высокоэффективного модульного автомата нового поколения.

Исследованы способы повышения вероятности попадания пули в характерные цели. Исходя из анализа результатов расчетов, сделаны следующие выводы:

1) оптимальные характеристики рассеивания при стрельбе короткими очередями зависят от дистанции стрельбы:

- на дистанциях до 300...400 м необходимо определенное рассеивание выстрелов очереди для компенсации ошибок стрельбы,
- на дистанциях более 400 м увеличение вероятности попадания может быть достигнуто повышением кучности стрельбы короткими очередями, так как величина суммарной ошибки стрельбы не позволяет эффективно ее компенсировать рассеива-

нием, однако при этом выстрелы очереди все равно должны иметь определенное взаиморасположение.

2) эффективность стрельбы очередями целесообразно оценивать с учетом рассеивания отдельных выстрелов очереди. Замена реальных характеристик функцией случайной величины с нормальным распределением для стрельбы короткими очередями может привести к ошибке в определении вероятности попадания.

Таким образом, характеристики рассеивания при стрельбе короткими очередями, достигнутые на современном этапе в автомате АК74М на дистанциях до 200 м, практически оптимальны. Повышения вероятности попадания можно добиться при соблюдении следующих рекомендаций:

- целесообразно рассеивать выстрелы очереди в направлении наибольших суммарных ошибок стрельбы и (или) наименьшего габаритного размера цели;
- выстрелы очереди необходимо рассеивать симметрично относительно точки прицеливания, поэтому стрельба очередями в три выстрела существенно более эффективна стрельбы очередями в два выстрела.

Технические решения, позволяющие повысить вероятность попадания на дистанциях 400...600 м (например, применение лафетных, многоствольных схем), приводят к утяжелению и усложнению образцов, что отрицательно сказывается на других характеристиках эффективности стрелкового оружия. При этом чрезмерное увеличение кучности стрельбы очередями может существенно снизить вероятность попадания на дистанциях до 200 м из-за невозможности эффективной компенсации ошибок прицеливания рассеиванием выстрелов очереди. Следует также учитывать, что совершенствование средств индивидуальной брони защиты, скорее всего, приведет к необходимости увеличения импульса боеприпаса, что, в свою очередь, уменьшит эффективность стрельбы короткими очередями. Незначительное повышение кучности стрельбы, обеспечиваемое, например, применением сбалансированной автоматики или полужестким запирающим ствол, практически не оказывает влияние на вероятность поражения характерных целей.

Наиболее целесообразным способом стрельбы из автомата на дистанциях 400...600 м является стрельба одиночными выстрелами, следовательно, необходимо добиваться увеличения ее меткости. При этом повышается значимость уровня профессиональной подготовки военнослужащего, технического рассеивания комплекса оружие — боеприпас, наличия качественных прицельных приспособлений и т. п.

В настоящее время на кафедре «Стрелковое оружие» ИжГТУ им. М.Т. Калашникова оформлен патент на способ повышения кучности стрельбы очередями, позволяющий решить ряд проблем повышения эффективности стрельбы без существенного усложнения конструкции оружия.

**Актуальность модульной схемы автомата.** Проведенные исследования позволили обосновать перспективность применения в стрелковом оружии принципа модульности. Модульный автомат предполагает наличие главного объединяющего узла — платформы и отдельных функциональных узлов-модулей, например, модуля ударно-спускового механизма, баллистического модуля — ствола с узлом запирающего и т. д., подсоединяемых к платформе. Меняются модули, изменяется конструкция автомата и его тактико-технические характеристики. Поэтому под различные боевые задачи создаются образцы автоматов, собранные на одной платформе, без увеличения номенклатуры принимаемых на вооружение различных новых образцов оружия. При этом увеличивается номенклатура только отдельных модулей, а не самого оружия. В этом случае будут удовлетворяться требования различных потребителей без



существенного увеличения номенклатуры оружия при снижении затрат на его производство и эксплуатацию.

Таким образом, преимуществом модульной схемы является то, что пользователь оружия может самостоятельно выбирать и устанавливать различные модули на платформе и тем самым получать необходимый образец оружия для решения конкретной боевой задачи. Этим модульный принцип и отличается от унификации оружия, сохраняя ее преимущества.



Рис. 1. Внешний вид модульного автомата

При унификации оружия различные его образцы могут создаваться на одной платформе и изготавливаться на оружейных предприятиях. При этом потребитель будет вынужден в случае боевой необходимости приобретать не один, а несколько новых образцов, что экономически невыгодно. При использовании же модульного оружия, например, в армейских условиях военнослужащий может целенаправленно подсоединять к платформе — основному оружейному модулю те или иные модули и получать «новые» образцы оружия для выполнения конкретных боевых задач, например, автомат, снайперскую винтовку, ручной пулемет, пистолет — пулемет. Модульное оружие становится конкурентоспособным. По такому принципу может быть выполнено и охотничье оружие, что подтверждает перспективность этого принципа и его практическую значимость. На рис. 1 показан внешний вид модульного автомата, кинематическая схема, модульная компоновка и внешний вид которого разрабатываются в ИжГТУ им. М.Т. Калашникова на кафедре «Стрелковое оружие» [3].

### Литература

- [1] Писарев С.А., Якимович Б.А., ред. *Профессия оружейник: единство образования, науки, производства*. Ижевск, Изд-во ИжГТУ, 2014.
- [2] Писарев С.А., Якимович Б.А., ред. *Оружие и его создатели — связь времен: ИжГТУ им. М.Т. Калашникова и подготовка конструкторов-оружейников; система создания оружия; записки оружейников о своем творчестве; молодые оружейники: начало пути*. Ижевск, Изд-во ИжГТУ, 2012.
- [3] URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21698396> (дата обращения 30.06.2015).

## **Инженерная методика оценки проникающего действия ударников с энерговывделяющим наполнителем при взаимодействии с металлическими преградами**

© Федорова Наталия Александровна, Федоров Сергей Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[kafsm4@bmstu.ru](mailto:kafsm4@bmstu.ru)

*На основе разработанной расчетной модели проанализирована возможность увеличения глубины проникания ударников в металлические преграды при скоростях взаимодействия в пределах 1000 м/с за счет размещения внутри ударника наполнителя из реакционного материала, в котором на определенной стадии проникания происходит энерговывделение с образованием сильно сжатых газообразных продуктов реакции. Показано, что на прирост глубины проникания можно рассчитывать, если предотвратить значительное радиальное расширение стенок камеры с продуктами реакции. Для этого необходимо, чтобы энерговывделение происходило после заглубления камеры с наполнителем в формирующуюся в преграде каверну ниже уровня лицевой поверхности.*

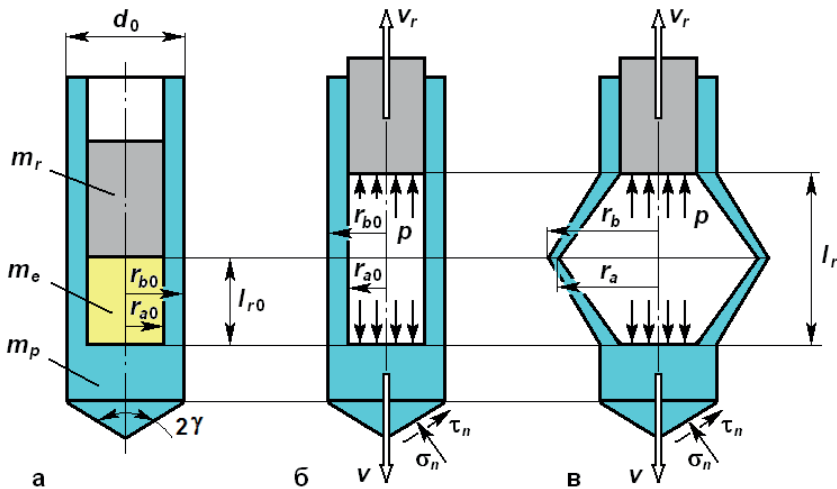
**Ключевые слова:** ударник, металлическая преграда, высокоскоростное проникание, реакционный наполнитель, энерговывделение.

При взаимодействии металлических ударников с металлическими преградами со скоростями свыше 1 000...1 200 м/с, как правило, реализуется гидродинамический режим проникания [1–3] (с растеканием материала ударника по поверхности формируемого в преграде кратера). В качестве возможных путей повышения эффективности пробивного действия может рассматриваться применение сегментированных [4–6] и телескопических ударников [7], а также ударников из пористого материала [8]. При скоростях взаимодействия менее 1 000 м/с, когда при изготовлении ударника из высокопрочной стали обеспечивается малость его деформаций в процессе проникания, для повышения пробивной способности ударников в настоящее время активно прорабатывается вопрос о возможности использования так называемых реакционных материалов, способных выделять при динамическом нагружении значительную энергию, обусловленную протеканием химических реакций. По зарубежной терминологии реакционные материалы — это композиции двух или более твердых веществ, не являющиеся взрывчатыми (в обычном понимании), в которых при высокоинтенсивной деформации или ударно-волновым воздействием может быть инициирована экзотермическая механохимическая реакция [9]. К таким материалам относятся, например, металлофторопластовые композиции, в которых высокоэффективными окислителями по отношению к металлам выступают фторорганические полимеры.

В данной работе рассмотрена простая расчетная методика, позволяющая учесть влияние энерговывделения реакционного наполнителя, входящего в состав ударника, на глубину его проникания в металлическую преграду при скоростях взаимодействия

600...800 м/с. Расчетная модель базируется на следующих основных допущениях (рис.1): при рассматриваемых скоростях взаимодействия деформации головной части ударника малы и ими можно пренебречь; сопротивление металлической преграды прониканию ударника подчиняется двучленному закону  $\sigma_n = Av_n^2 + C$  [10, 11], где  $\sigma_n$  — нормальные напряжения на поверхности контакта головной части с преградой,  $v_n$  — проекция скорости головной части ударника на нормаль к ее поверхности,  $A, C$  — эмпирические константы; касательные напряжения на контактной поверхности принимаются равными  $\tau_n \approx 0,5C$ , что соответствует отсутствию проскальзывания материалов ударника и преграды [12]; энерговыделение в реакционном наполнителе происходит мгновенно в заданный момент времени  $t_{r0}$ ; продуктом химической реакции является газ с показателем адиабаты  $k = 3$ .

В конструктивном отношении ударник предполагается состоящим из двух частей (рис. 1, а) — передней (проникающей) массой  $m_p$  и задней (отбрасываемой назад газообразными продуктами химической реакции наполнителя) массой  $m_r$ . При этом передняя часть ударника с тыльной стороны имеет участок трубчатой формы, в полости которого размещается реакционный материал массой  $m_e$  и отбрасываемая при его «срабатывании» задняя часть ударника. До момента энерговыделения наполнителя  $t_{r0}$  ударник рассматривается как единое целое тело общей массой  $m_0 = m_p + m_r + m_e$ , закон движения которого определяется только одной силой сопротивления преграды. После «срабатывания» наполнителя движение передней (проникающей) и задней (балластной) частей ударника рассчитывается отдельно — передняя часть двигается под действием силы сопротивления преграды и силы давления газообразных продуктов реакции [13, 14], а задняя часть тормозится только силой давления газа. Давление продуктов реакции, действующее на переднюю и заднюю части ударника, в зависимости от занимаемого газом объема определяется в адиабатическом приближении.

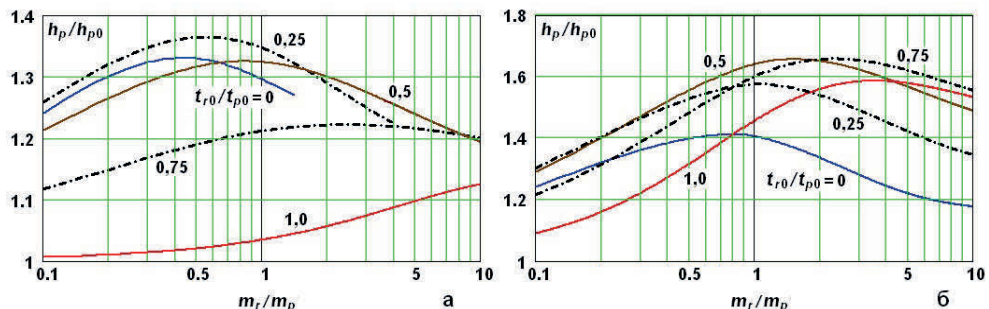


**Рис. 1.** Расчетная схема проникания в преграду ударника с реакционным наполнителем:

*а* — исходное состояние до начала энерговыделения; *б* — без учета радиального расширения корпуса в процессе энерговыделения; *в* — с учетом радиального расширения корпуса в процессе энерговыделения

При этом рассматривается два варианта — без учета радиального расширения стенок трубчатой части (рис. 1, б) и с его учетом (рис. 1, в). Во втором случае для определения динамики изменения радиуса камеры с продуктами реакции используется модель расширения цилиндрической оболочки из несжимаемого жесткопластического материала под действием внутреннего давления [1]. Влиянием поступательного движения самих продуктов реакции пренебрегается в силу предполагаемой малости их массы (совпадающей с массой реакционного наполнителя в ударнике). Величина последней характеризуется коэффициентом наполнения  $\alpha = m_e / m_0$ , задававшимся в расчетах в диапазоне 0,025...0,1. К числу параметров, используемых в расчетной методике для характеристики работоспособности наполнителя, относятся также его удельное энерговыделение  $e_0$  (в диапазоне 2...6 МДж/кг) и начальное давление газообразных продуктов реакции  $p_0$  (в диапазоне 2,5...20 ГПа).

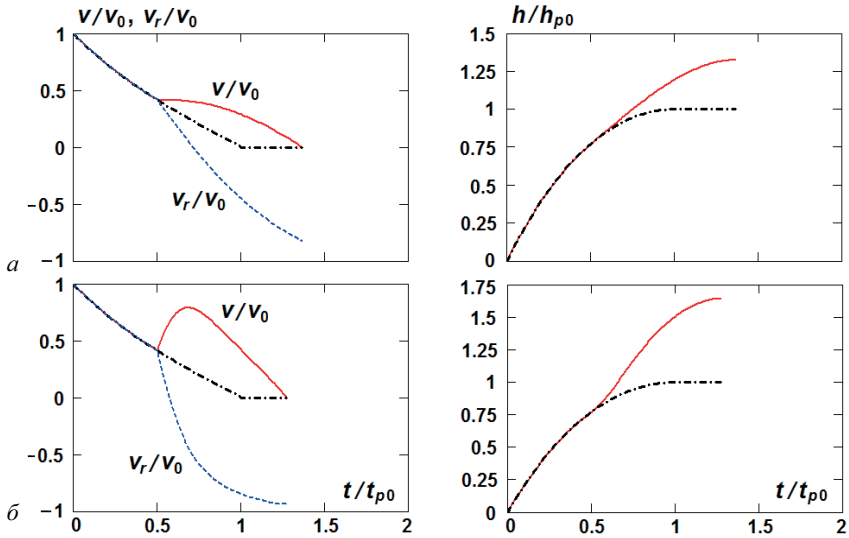
Расчеты проведены для ударника из высокопрочной стали диаметром  $d_0 = 30$  мм и массой  $m_0 = 0,4$  кг при начальной скорости взаимодействия  $v_0 = 800$  м/с со стальной и алюминиевой преградами, законы сопротивления которых установлены на основании пьезоакселерометрии проникания [15, 16]. Пробивное действие ударников с реакционным наполнителем сопоставлялось с пробитием эквивалентного по массе и скорости инертного ударника. Получены значения глубин проникания ударника в инертном исполнении  $h_{p0}$  в стальную и алюминиевую преграды соответственно 33 мм и 97 мм. Для схемы без учета радиального расширения стенок камеры (см. рис. 1, б) на рис. 2 представлена глубина проникания ударников с реакционным наполнителем  $h_p$ , отнесенная к значению  $h_{p0}$ , в зависимости от соотношения масс задней и передней частей ударника при энерговыделении на различных стадиях проникания, характеризуемых отношением времени «срабатывания» наполнителя  $t_r$  к полному времени проникания инертного ударника  $t_{p0}$ . Видно, что существуют оптимальные значения  $m_r/m_p$  и  $t_r/t_{p0}$ , при которых достигается весьма заметный прирост пробивного действия. Наличие оптимумов обусловлено конкуренцией при проникании ударника с энерговыделением наполнителя двух факторов [14]. С одной стороны, при «срабатывании» наполнителя происходит уменьшение проникающей массы, что отрицательно влияет на проникание, а с другой — появляется дополнительная сила (сила давления продуктов реакции), которая «толкает» переднюю проникающую часть ударника, способствуя ее более глубокому прониканию.



**Рис. 2.** Влияние на относительную глубину проникания ударника соотношения масс его задней и передней частей и момента энерговыделения наполнителя для схемы без учета радиального расширения стенок камеры ( $\alpha = 0,1$ ;  $e_0 = 4$  МДж/кг;  $p_0 = 10$  ГПа):

а — стальная преграда; б — алюминиевая преграда

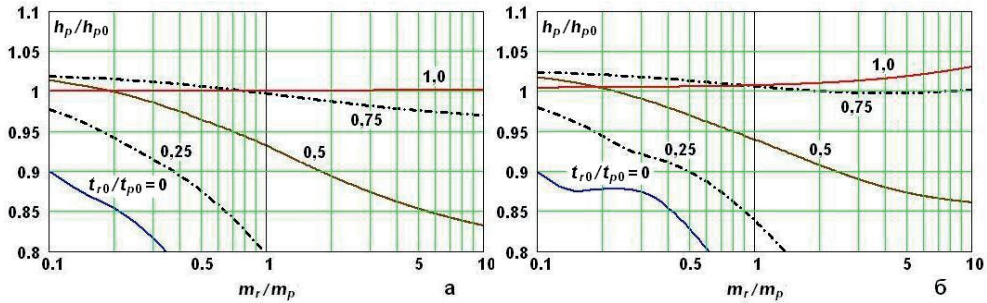
Сопоставление зависимостей от времени  $t$  текущей глубины  $h$  и скоростей передней  $v$  и задней  $v_r$  частей ударника с энерговыделением наполнителя (в схеме без учета радиального расширения стенок камеры) с параметрами проникания эквивалентного инертного ударника приведено на рис. 3. Видно, что «срабатывание» реакционного наполнителя происходит в момент, соответствующий половине полного времени проникания инертного ударника ( $t_{r0} / t_{p0} = 0,5$ ), когда текущая глубина проникания, как в стальную, так и в алюминиевую преграды, составляет примерно 75 % значения  $h_{p0}$ , а текущая скорость — ~40 % начального значения  $v_0$ . После этого момента темп торможения передней (проникающей) части ударника со «сработавшим» наполнителем в стальной преграде существенно снижается, а в обладающей меньшим сопротивлением алюминиевой в течение небольшого промежутка времени наблюдается даже прирост скорости проникающей части. Задняя (балластная) часть ударника с прореагировавшим наполнителем в результате приобретает скорость противоположного первоначальному направлению со значением, близким к начальной скорости ударника  $v_0$ .



**Рис. 3.** Сравнительный анализ динамики проникания ударника с энерговыделением наполнителя (без учета радиального расширения стенок камеры) и эквивалентного инертного ударника ( $\alpha = 0,1$ ;  $e_0 = 4$  МДж/кг;  $p_0 = 10$  ГПа;  $t_{r0} / t_{p0} = 0,5$ ;  $m_r / m_p = 1,0$ ):  
 а — стальная преграда; б — алюминиевая преграда; — — — — движение передней части ударника с реакционным наполнителем; - - - — — движение инертного ударника; - - - - — скорость задней части ударника с наполнителем

Прирост глубины проникания по сравнению с инертным ударником составляет при этом примерно 30 % в стальной преграде (рис. 3, а) и около 60 % в алюминиевой (рис. 3, б). Следует отметить, что для данных, представленных на рис. 3, полное энерговыделение реакционного наполнителя на 25 % превышает начальную кинетическую энергию ударника. Этим, очевидно, и объясняется эффект весьма заметного повышения пробивного действия.

При переходе к схеме с учетом радиального расширения стенок камеры (см. рис. 1, в) положительное влияние энерговыделения наполнителя на пробитие ударника в связи с очень резким падением давления продуктов реакции практически исчезает, и во многих случаях наблюдается, напротив, снижение глубины проникновения по сравнению с инертным ударником (рис. 4).



**Рис. 4.** Влияние на относительную глубину проникновения ударника соотношения масс его задней и передней частей и момента энерговыделения для схемы с учетом радиального расширения стенок камеры ( $\alpha = 0,1$ ;  $e_0 = 4$  МДж/кг;  $p_0 = 10$  ГПа): а — стальная преграда; б — алюминиевая преграда

Таким образом, один из основных выводов, к которому приводят результаты расчетов, заключается в том, что рассчитывать на прирост глубины проникновения ударников за счет энерговыделения реакционного наполнителя можно лишь при минимизации потерь, обусловленных радиальным расширением стенок камеры. Отрицательное влияние данного эффекта может быть снижено, если «срабатывание» реакционного наполнителя происходит после заглупления камеры, в которой он находится, ниже уровня лицевой поверхности преграды. В этом случае радиальному расширению стенок камеры будет препятствовать боковая поверхность каверны в преграде, формирующейся при проникании ударника.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-08319-а.*

## Литература

- [1] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*: в 2 т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [2] Федоров С.В., Велданов В.А., Смирнов В.Е. Численный анализ влияния скорости и прочности удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в стальную преграду. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 1(100), с. 65–83.
- [3] Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов. *Журнал технической физики*, 2011, т. 81, № 9, с. 45–51.
- [4] Weihrauch G., Wollmann E. Segmented penetrators. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1993, vol. 18, no 5, pp. 270–274.
- [5] Федоров С.В., Велданов В.А. Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников. *Журнал технической физики*, 2006, т. 76, № 7, с. 134–137.

- [6] Федоров С.В., Велданов В.А. Применение сегментированных ударников для формирования каверны в грунтово-скальных преградах. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2012, № 1(71), с. 43–50.
- [7] Westerling L., Lundberg P., Holmberg L., Lundberg B. High velocity penetration of homogeneous, segmented and telescopic projectiles into alumina targets. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, vol. 20, no 6–10, pp. 817–827.
- [8] Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперзвуковом взаимодействии // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 10. С. 131–134.
- [9] Имховик Н.А., Селиванов В.В., Симонов А.К., Сергеева А.И., Яшин Б.В. Об исследованиях по разработке за рубежом новых высокоплотных реактивных материалов («High-Density Reactive Materials») и их применению в боеприпасах повышенного могущества действия. *Вооружение и экономика*, 2014, № 1(26), с. 53–63.
- [10] Велданов В.А. Закон сопротивления прониканию ударников в грунт. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 32–34.
- [11] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Engineering models of high speed penetration into geological shields. *Central European Journal of Engineering*, 2014, no 4 (1), pp. 1–19.
- [12] Велданов В.А., Федоров С.В. Особенности поведения грунта на границе контакта с недеформируемым ударником при проникании. *Прикладная механика и техническая физика*, 2005, т. 46, № 6, с. 116–127.
- [13] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Optimization of penetration into geological and concrete shields by impactor with jet thruster. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2008, vol. 3, no 4, pp. 707–727.
- [14] Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. 2014. № 4 (84), с. 53–63.
- [15] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М., Федоров С.В. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 2, с. 37–46.
- [16] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии. *Журнал технической физики*, 2011, т. 81, № 7, с. 94–104.

УДК 621.22

## Гидропривод мобильных РЛС с LS-управлением

© Цыганов Е.А.

Российская Федерация, Ковров, АО «ВНИИ «Сигнал»

[Jorj871@rambler.ru](mailto:Jorj871@rambler.ru)

*Проведен анализ способов регулирования гидроприводов мобильных РЛС, выявлены недостатки гидроприводов широко известных РЛС. Дано обоснование применения гидроприводов с LS-регулирования. На примере РЛС «Волга» с помощью имитационного моделирования рассчитаны результаты времени свертывания и развертывания с модернизированным гидроприводом с LS-регулированием.*

**Ключевые слова:** РЛС, время развертывания, время свертывания, гидропривод, LS-регулирование.

В настоящее время в качестве систем для обнаружения воздушных, водных и наземных объектов, а также для определения их дальности, скорости и геометрических параметров используются мобильные радиолокационные станции (РЛС), построенные на базе автомобильных шасси и передвижных платформ.

Мобильность РЛС во многом определяется необходимостью их передислокации на новые позиции, условиями транспортирования, сроками развертывания антенных комплексов (временем полного перехода из транспортировочного положения в рабочее) и другими факторами. Для удобства транспортирования антенных комплексов предусматривают возможность свертывания антенн, позволяющую многократно уменьшить их габариты. Таким образом, задачей привода является обеспечение минимального времени развертывания-свертывания, которое можно обеспечить за счет увеличения скорости движения элементов РЛС. Однако увеличение скорости требует повышения прочности элементов РЛС из-за возрастания динамических нагрузок. Поэтому минимальное время развертывания можно обеспечить при совмещении движения разворачиваемых элементов РЛС за счет независимых скоростных режимов разворачиваемых элементов.

Системы свертывания-развертывания современных антенных комплексов снабжают различными типами приводов: ручными, электрическими, гидравлическими. Оснащение РЛС гидравлическим приводом, имеющим значительно меньшие габариты за счет большой удельной мощности, позволяет улучшить массогабаритные характеристики комплекса.

В настоящее время в приводах систем свертывания-развертывания мобильных РЛС используются в основном гидроприводы с объемным либо дроссельным регулированием.

Гидроприводы с дроссельным регулированием характеризуются наибольшей простотой реализации и низкой стоимостью, поэтому находят достаточно широкое применение, однако они имеют низкие КПД. Наряду с дроссельным, используется также объемное регулирование, характеризующееся высоким КПД. Однако общим недостатком для дроссельного и объемного регулирования является зависимость скоростей гидродвигателей от нагрузки.

Независимость скоростных режимов гидродвигателей от нагрузки позволяет осуществить объемно-дроссельное регулирование — LS-регулирование, которое также отличается высоким КПД.

За счет применения LS-регулирования в гидроприводах мобильных РЛС сокращается время свертывания — развертывания, в частности время развертывания РЛС «Волга» уменьшается на 30 %. Данные получены при проведении модельного эксперимента (были разработаны математические и имитационные модели гидропривода и нагрузок РЛС «Волга» и дроссельным и LS-регулированием).

## Литература

- [1] Башта Т.М., Булатов С.И. Объемные гидравлические приводы. Москва, Машиностроение, 1968, 628 с.
- [2] Гойдо М.Е., Макаренко Е.Д. Проектирование объемных гидроприводов. Москва, Машиностроение, 2009, 304 с.



- [3] Даршт Я.А. *Имитационное моделирование элементов гидропривода*. Ковров, КГТА, 2008, 80 с.
- [4] Наземцев А.С., Рыбальченко Д.Е. *Пневматические и гидравлические приводы и системы. Ч. 2. Гидравлические приводы и системы. Основы*. Москва, Форум, 2007, 304 с.

УДК 621.3

## **Анализ способов пуска асинхронного трехфазного двигателя в условиях ограниченной мощности системы электропитания наземного подвижного объекта**

© Шигин Илья Александрович<sup>1</sup>, Гаврилкин Виктор Константинович<sup>1</sup>,  
Горячев Олег Владимирович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Россия, г. Тула, АО «Конструкторское бюро приборостроения  
имени академика А.Г. Шипунова»

<sup>2</sup>Россия, г. Тула, Тульский государственный университет

[i.tula999@yandex.ru](mailto:i.tula999@yandex.ru)

*Проанализированы различные способы пуска асинхронного трехфазного двигателя с точки зрения минимального мгновенного потребления энергии — минимального мгновенного значения тока. Проведено моделирование пуска двигателя разными способами. По результатам исследования сделан вывод о том, что в условиях ограниченной мощности системы электропитания наиболее приемлемым является амплитудно-частотный способ пуска асинхронного трехфазного двигателя, позволяющий осуществить разгон со значениями токов в 3–5 раз меньшими значений токов при прямом пуске.*

**Ключевые слова:** асинхронный трехфазный двигатель, система электропитания, прямой пуск, амплитудный пуск, амплитудно-частотный пуск.

Система электропитания (СЭП) подвижного объекта является источником силового напряжения ограниченной мощности. При этом приводной асинхронный трехфазный двигатель электрогидравлического привода (ЭГП) в ряде случаев обладает мощностью, сопоставимой с мощностью СЭП. Прямой пуск электродвигателя такой мощности сопровождается большим мгновенным потреблением мощности, что приводит к значительным искажениям питающего напряжения и отключению ряда систем подвижного объекта [1, 2].

В связи с этим целесообразным является анализ различных способов пуска асинхронного трехфазного двигателя (АТД) с точки зрения минимального мгновенного потребления энергии — минимального мгновенного значения тока.

В настоящее время существует большое количество различных схем пуска АТД, которые подразделяют на три группы:

- 1) прямой пуск;
- 2) амплитудный пуск;
- 3) амплитудно-частотный пуск.

Наиболее простым способом пуска короткозамкнутого двигателя является включение обмотки его статора непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки статора. Такой пуск называется прямым. При этом в процессе пуска в обмотках статора возникает ток  $I_{\text{пуск}} = (4 \dots 7,5) I_{\text{ном}}$ . Современные короткозамкнутые асинхронные двигатели проектируют с таким расчетом, чтобы они по величине возникающих при пуске электродинамических усилий, действующих на обмотки, и по условиям нагрева обмоток допускали прямой пуск. Поэтому прямой пуск возможен, когда сеть достаточно мощная и пусковые токи двигателей не вызывают недопустимых падений напряжений в ней (не более 10...15 %).

Амплитудный пуск имеет много вариантов: тиристорный (комплекс «Панцирь»), реакторный (с использованием дросселей), конденсаторный, резисторный. Общим недостатком амплитудного пуска является то, что при линейном снижении тока падает в квадратичной зависимости момент электродвигателя. Так, если уменьшить пусковой ток с 480 А (паспортный пусковой ток электродвигателя 4А200М4У3) до 120 А (1,5 номинального тока этого двигателя), то пусковой момент при амплитудном способе пуска упадет в 25 раз и составит всего

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{ном}} \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} \frac{1}{16} = 240 \cdot 2 \cdot \frac{1}{16} = 30 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

при этом максимальный действующий момент сопротивления может достигать значения 150 Н·м.

Амплитудно-частотный пуск позволяет в любой точке разгонного участка находиться на рабочем отрезке механической характеристики, где сохраняется линейная зависимость момента от тока:

$$M_{\text{двиг}} = \frac{M_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} I_{\text{двиг}},$$

т. е. энергетически это наиболее выгодный режим эксплуатации асинхронного двигателя.

Промоделируем пуск двигателя различными способами и сравним значения токов в обмотках статора [3]. Схема моделирования АД в программе MatLab различными способами пуска изображена на рис. 1. Показания токов статора при различных способах пуска представлены на рис. 2–4.

Как видно из результатов моделирования, амплитудный пуск позволяет уменьшить токи в обмотках АД, однако при этом в квадратичной зависимости падает момент на валу АД. При амплитудно-частотном пуске токи и момент близки к номинальным значениям.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: что в условиях ограниченной мощности СЭП наиболее приемлемым является амплитудно-частотный способ пуска АД, позволяющий осуществить разгон со значениями токов в 3–5 раз меньшими значений токов при прямом пуске.

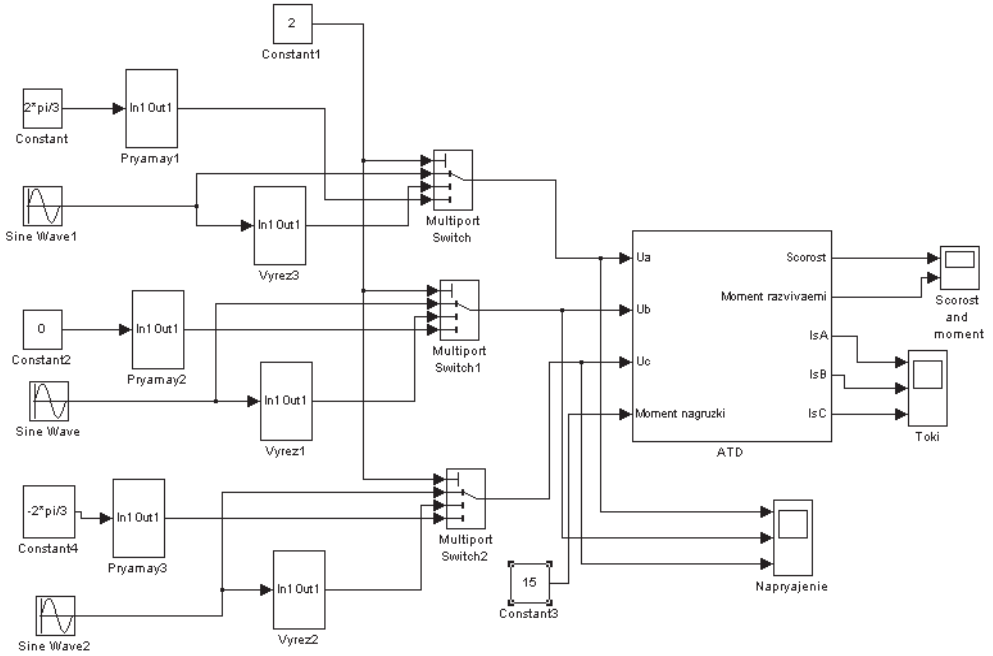


Рис. 1. Схема моделирования АТД различными способами пуска

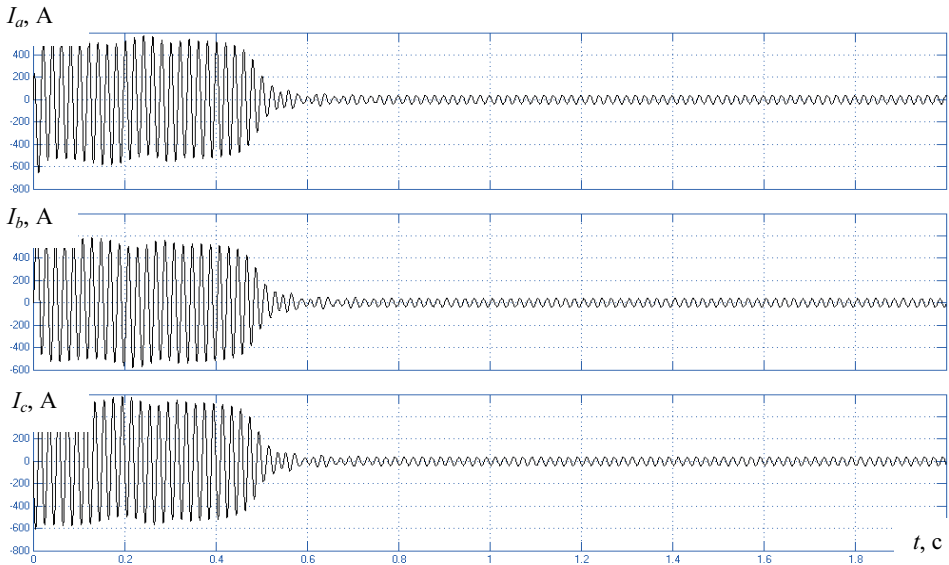


Рис. 2. Токи статора во время прямого пуска двигателя ( $U = \text{const}$ ;  $f = \text{const}$ ;  $M_H = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$ )

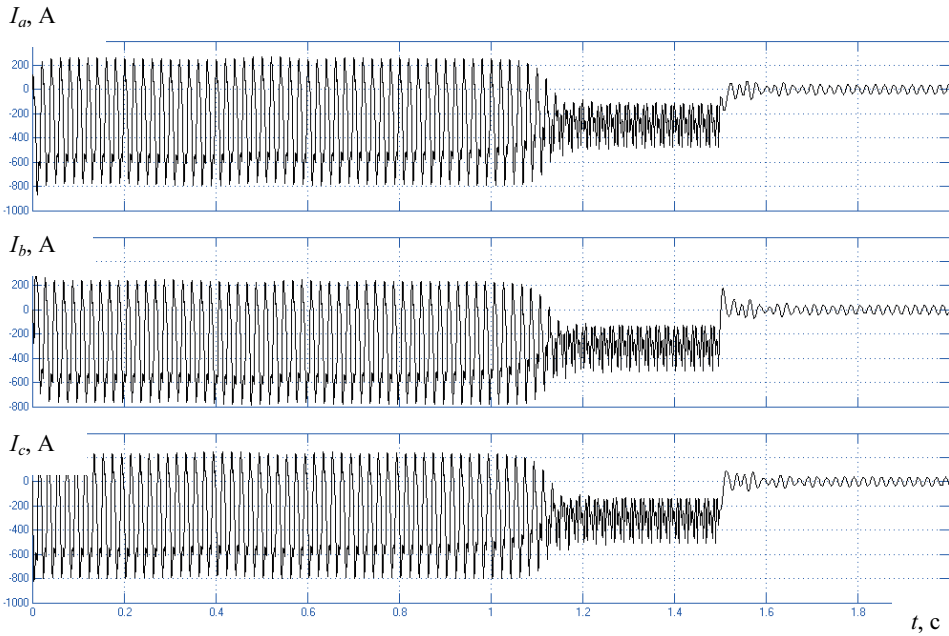


Рис. 3. Токи статора во время амплитудного пуска двигателя ( $U = \text{var}$ ;  $f = \text{const}$ ;  $M_H = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$ )

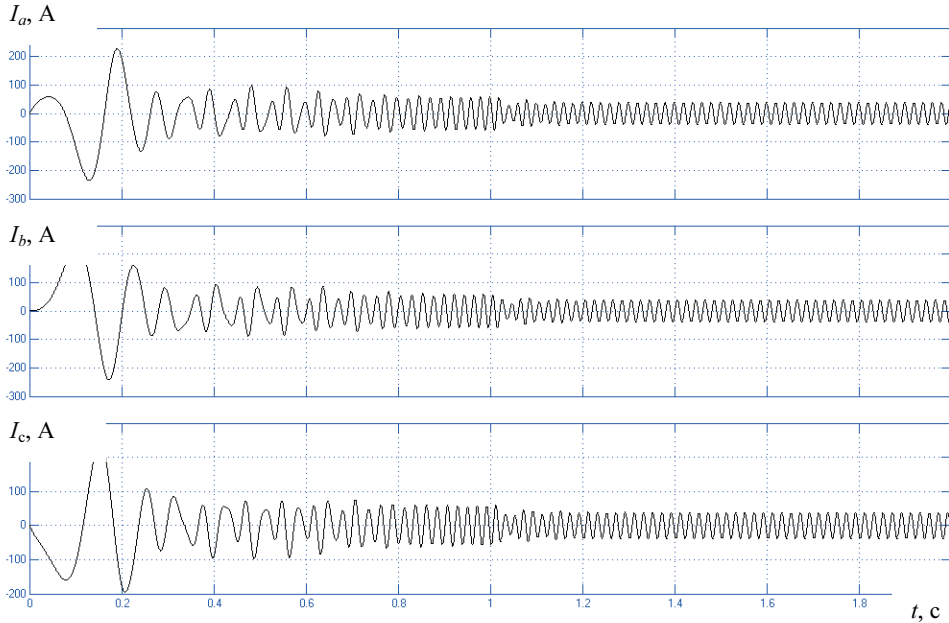


Рис. 4. Токи статора во время амплитудно-частотного пуска двигателя ( $U = \text{var}$ ;  $f = \text{var}$ ;  $M_H = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$ )

## Литература

- [1] Виноградов А.Б. *Векторное управление электроприводами переменного тока*. Иваново, Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина, 2008, 298 с.
- [2] Вольдек А.И. *Электрические машины. Машины переменного тока*. Санкт-Петербург, Питер, 2008, 350 с.
- [3] Герман-Галкин С.Г. *Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК*. Санкт-Петербург, КОРОНА-Век, 2008, 368 с.

УДК 533.6.013

## Методика формирования имитационных моделей информационно-управляющего поля кабин летательных аппаратов

© Шубин Валерий Сергеевич, Верещиков Дмитрий Викторович

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

[b-boy56@mail.ru](mailto:b-boy56@mail.ru)

*Проведение исследований по применению различных форматов индикации пилотажно-навигационных параметров летательного аппарата (ЛА) требует наличия моделирующей индикации и средств, позволяющих оперативно изменять их формат. В статье представлена методика формирования имитационных моделей информационно-управляющего поля кабин, разработанная в ВУНЦ ВВС «ВВА». Рассмотрены средства взаимодействия имитационной модели с математической моделью ЛА, разработанной в среде программирования Matlab@Simulink. Предлагаемая методика позволяет создавать модели многофункциональных цифровых индикаторов и индикаторов на лобовом стекле как существующих, так и перспективных ЛА, а также создавать специализированную индикацию, используемую для обеспечения экспериментов на пилотажных стендах с участием летчиков-экспертов.*

**Ключевые слова:** *информационно-управляющее поле, многофункциональный цифровой индикатор, индикатор на лобовом стекле, пилотажный кадр, моделирование, сетевой обмен, программно-моделирующий комплекс.*

Современные и перспективные боевые летательные аппараты (ЛА) должны решать широкий круг боевых задач в любое время суток, в простых и сложных метеоусловиях. Выполнение такого обширного круга задач подразумевает установку на ЛА разнообразного оборудования, позволяющего совершать полеты в различных условиях, получать и обрабатывать информацию о внешней обстановке, параметрах движения ЛА, состоянии бортовых систем и осуществлять воздействие по воздушным и наземным целям с помощью бортового оружия (ракет, пушек, бомб). При этом, экипаж ЛА, принимая решения об оптимальной траектории выхода к цели и применении оружия, должен управлять ЛА и использовать пилотажные, навигацион-

ные, радиолокационные и другие системы, а также средства радиолокационной борьбы. Кроме того экипаж должен постоянно контролировать результаты выполнения боевой задачи на основе полученной информации от бортовых разведывательно-прицельных средств и внешних источников. Выполнить такой объем задач невозможно без объединения систем и средств, используемых летчиком в процессе пилотирования, в интегрированные системы информационно-управляющего поля кабины.

На большинстве современных и перспективных ЛА в качестве основного элемента информационно-управляющего поля кабин используют индикаторы на лобовом стекле (ИЛС) и многофункциональные цифровые индикаторы (МФЦИ). Разработчики этих устройств стремятся решать одни и те же задачи в области эргономики и информационного пространства различными способами (рис. 1), а решение о применении того или иного формата индикации пилотажно-навигационных параметров может быть принято только путем длительной всесторонней экспертной оценки с участием большого количества летчиков-экспертов. Проведение таких исследований требует наличия моделирующей индикации (программных комплексов) и средств, позволяющих оперативно изменять их формат. Это необходимо как для изучения влияния отображения той или иной информации на эффективность выполнения различного рода задач, так и для совершенствования средств отображения информации в интересах расширения их возможностей (посадка на палубу авианосца, дозаправка в воздухе и др.).

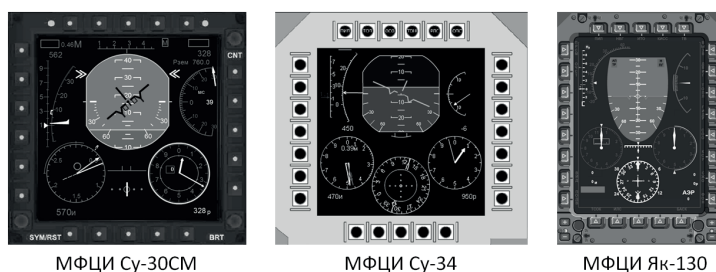


Рис. 1. Примеры пилотажных кадров различных самолетов

Задачи создания имитационных моделей информационно-управляющего поля кабин успешно решаются в Военном учебно-научном центре Военно-воздушных сил «Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»). Для проектирования имитационных моделей информационно-управляющего поля кабин ЛА была разработана методика построения МФЦИ и ИЛС с помощью мультимедийной платформы Adobe Flash Professional CS — лидирующей программы в отрасли разработки выразительного интерактивного контента, позволяющая создавать интерактивные приложения и анимацию различного уровня сложности.

Основой для формирования облика модели информационно-управляющего поля кабины ЛА являются технические описания и фотографии реально применяемых ИЛС и МФЦИ во всем многообразии их режимов работы. Фотографии должны быть высокого качества и используются в качестве подложки для формирования графического облика прибора. На подложке с помощью средств рисования мультимедийной платформы Adobe Flash обрисовываются все шкалы, стрелки, маркеры и другие элементы индикации прибора (рис. 2).

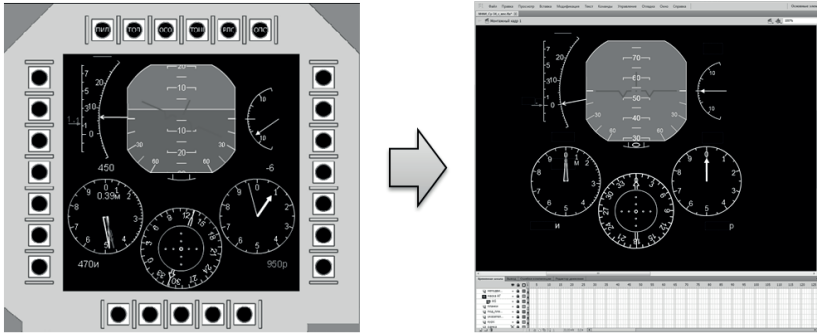


Рис. 2. Фотография МФЦИ самолета Су-34 и сформированный на его основе графический облик имитационной модели

Для упрощения обработки различных индикаторов их рекомендуется отрисовывать на различных слоях. Кроме того могут использоваться маскирующие слои для скрытия не отображаемых в данный момент фрагментов шкал и объектов индикации (рис. 3).

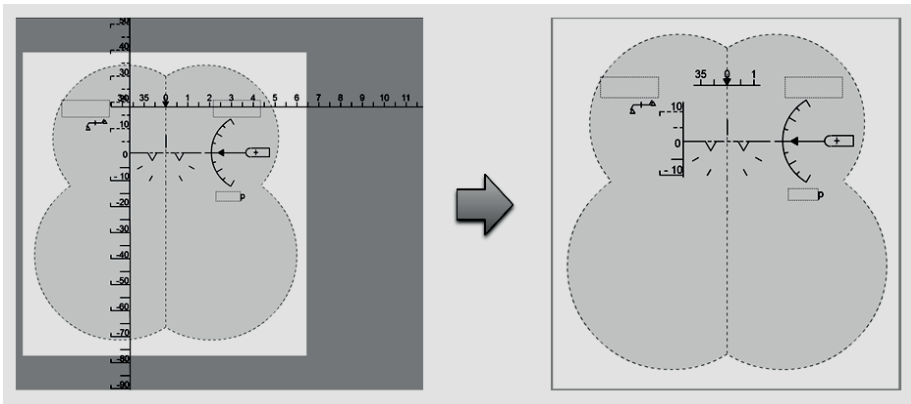


Рис. 3. Применение маскирующих слоев для шкал курса и тангажа в модели ИЛС

После формирования графического облика индикатора каждый подвижный элемент информационного поля преобразуется в символ с типом «фрагмент ролика» и для каждого символа задается уникальное имя символа и имя экземпляра. Каждый символ устанавливается в нулевое для себя положение, так же настраиваются центры их вращения и перемещения.

Для текстовой информации и различных счетчиков символ не создается, а задается лишь имя экземпляра. При необходимости аналогично можно создавать различные кнопки. Для этого формируется ее графический облик, который преобразуется в символ с типом «кнопка» и для каждой кнопки задается уникальное имя символа и имя экземпляра.

Логика перемещения подвижных объектов задается путем описания алгоритмов перемещения символов на языке ActionScript в панели «Действия». Для этого ис-

пользуется обработчик событий `addEventListener` (`Event.ENTER_FRAME`, «Пример»), который выполняет функцию «Пример» в каждом кадре. В самой функции «Пример» описываются все необходимые перемещения объектов. Перемещения объектов делятся на перемещения вдоль оси  $X$  (вправо или влево) и перемещения вдоль оси  $Y$  (вверх или вниз). Перемещения задаются в пикселях. Также можно задавать вращение объектов относительно центра вращения по часовой (положительное значение угла) или против часовой (отрицательное значение угла) стрелки. Вращения объектов задаются в градусах.

Для кнопок используется обработчик событий «Кнопка1».addEventListener (`MouseEvent.CLICK`, «КЛИК»). Этот обработчик в каждом кадре проверяет произведено ли нажатие на кнопку «Кнопка1» и при нажатии вызывает функцию «КЛИК», в которой описываются действия, выполняемые при нажатии на кнопку.

Информация о положении ЛА, высотнo-скоростных параметров, состоянии бортовых систем и т.п., на основании которой выполняются перемещения стрелок, шкал и других элементов индикации, формируется в математической модели ЛА, созданной в среде программирования `Matlab@Simulink`. Компонент `Simulink` этой среды широкие возможности для синтеза систем управления ЛА и моделирования его движения [1]. Связь между математической моделью ЛА и имитационной моделью информационно-управляющего поля кабины осуществляется с помощью сетевого обмена по протоколу `UDP` [2].

Для отправки данных из `Simulink` модели используется ряд стандартных блоков (рис. 4):

- `Data Type Conversion` — преобразование входных данных в тип `single`;
- `Byte Reversal` — перестановка байтов в обратном порядке;
- `Byte Pack` — упаковка данных в пакеты типа `single` где каждому значению отводится 4 байта;
- `UDP Send` — отправка данных на указанный IP и порт.

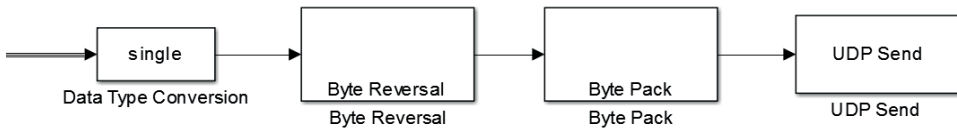


Рис. 4. Блоки отправки данных

Для приема данных по сети в имитационной модели информационно-управляющего поля кабины необходимо на языке `ActionScript` в панели «Действия» открыть датаграммный сокет, привязать его к определенному IP-адресу и порту, перевести в режим прослушивания и добавить обработчик событий «СОКЕТ».addEventListener (`DatagramSocketDataEvent.DATA`, «ЗАПИСЬ»). Этот обработчик на каждом кадре передает полученные данные с сокета «СОКЕТ» в функцию «ЗАПИСЬ», в которой необходимо организовать считывание информации из пакета принятых байтов. Считанная информация направляется в обработчик событий, обновляющий положение символов.

При необходимости возможна отправка информации из модели информационно-управляющего поля кабины обратно в математическую модель ЛА. В этом случае в математической модели используется блок `UDP Receive`, в котором прописывается IP-адрес, порт, количество и тип принимаемых данных. В имитационной модели в



обработчике событий добавляется функция формирования пакетов и отправки данных на указанный IP-адрес и порт.

Разработанные модели дополняются графическими подложками рамок экрана, различных кнопок и дисплеев (рис. 5). После тестирования и отработки индикации формируется итоговое приложение для запуска модели МФЦИ или ИЛС на экране ПЭВМ. При формировании итогового приложения для ИЛС стиль окна в настройках публикации выбирается как «заказной Chrome прозрачный» для отображения только самого ИЛС, а для МФЦИ и других приборных досок — «системный Chrome» для запуска приложения в отдельном окне.

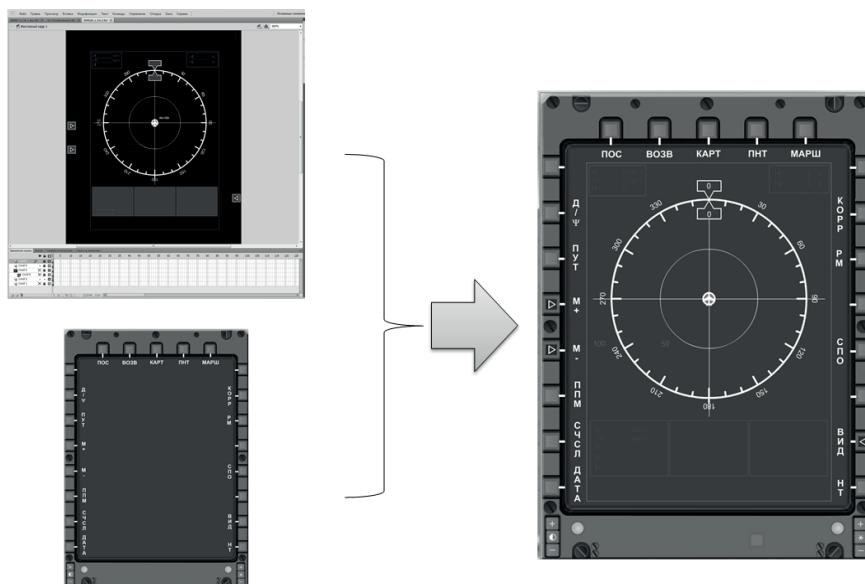


Рис. 5. Дополнение разработанных моделей различными графическими подложками

В ВУНЦ ВВС «ВВА» по данной методике были разработаны имитационные модели информационно-управляющего поля кабин самолетов Су-30СМ, Як-130, Су-34, МиГ-29К(КУБ), перспективные варианты МФЦИ и ИЛС, а так же специализированная индикация, используемая для обеспечения экспериментов на пилотажных стендах с участием летчиков-экспертов [3].

### Литература

- [1] *Разработка методических алгоритмических и программных средств исследования динамики маневренных самолетов с высокоавтоматизированными системами управления. Отчет по НИР № 1609351 (Шифр «ВАСУ»).* Воронеж, 2014, 186 с.
- [2] Разуваев И.Д., Шубин В.С. Система сетевого обмена для программно-моделирующих комплексов исследования динамики полета самолетов. *XLI Гагаринские чтения. Науч. тр. Междунар. молодежной науч. конф.: В 4 т, т 2: Проектирование, производство и эксплуатация авиакосмической техники.* Москва, Инфра-М, 2015, с. 35–36.
- [3] Костин П.С., Верещагин Ю.О., Волошин В.А. Программно-моделирующий комплекс для полунатурного моделирования динамики маневренного самолета. *Труды МАИ*, 2015, № 81, с. 1–30.

УДК 621. 86

## Влияние длины конвейера с подвесной лентой на распределение масс основных конструктивных узлов его металлоконструкции

© Бословяк Павел Валерьевич, Лагереv Александр Валерьевич

Россия, г. Брянск, Брянский государственный технический университет  
имени академика И.Г. Петровского

[boslovyak89@mail.ru](mailto:boslovyak89@mail.ru)

*Представлены главные особенности и преимущества конвейеров с подвесной лентой, перемещающих сыпучий груз. Приведена разработанная методика оптимального проектирования металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой, на основании которой выполнено исследование влияния длины конвейера с подвесной лентой на распределение масс основных конструктивных узлов его металлоконструкции. На основании данного исследования дана рекомендация по оптимальному проектированию металлоконструкций стационарных конвейеров с подвесной лентой.*

**Ключевые слова:** конвейер с подвесной лентой, металлоконструкция, оптимальное проектирование, конструктивные узлы, вклад масс, оптимизация.

В настоящее время на промышленных предприятиях одним из основных средств непрерывного транспорта является традиционный ленточный конвейер. Но он, как показывает многолетняя практика, имеет существенные недостатки. Поэтому была предложена новая конструкция специального ленточного конвейера — конвейер с подвесной лентой (рис. 1) [2].

Главными особенностями и преимуществами конвейеров с подвесной лентой (КПЛ) являются [1]:

- отсутствие просыпей груза на всей протяженности рабочей ветви ленты;
- уменьшение до 1,5 раза энергоемкости транспортирования груза;
- увеличение срока службы ленты в 1,5–2 раза;
- уменьшение пыления и дробления груза при его транспортировке;
- возможность изгиба в горизонтальной плоскости радиусом до 15–20 м.

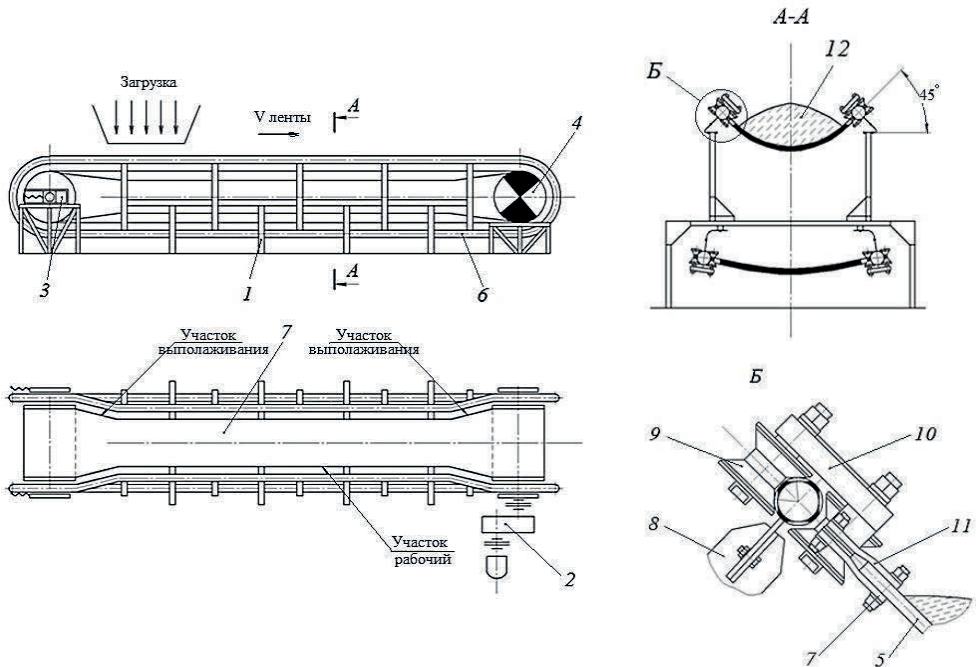


Рис. 1. Конвейер с подвесной лентой [1]:

1 — став; 2 — привод; 3 — натяжной барабан; 4 — приводной барабан; 5 — лента; 6 — направляющие; 7 — узел крепления; 8 — кронштейн; 9 — ролик; 10 — подвеска; 11 — ленточка; 12 — груз

Важной задачей при проектировании КПЛ остается снижение массы металлоконструкции (МК), которое достигается путем оптимизации конвейера с подвесной лентой на предварительном этапе проектирования [3–5].

Задача оптимального проектирования металлоконструкции стационарного КПЛ в общем виде формулируется следующим образом: для конкретного варианта МК требуется найти такое сочетание размеров ее конструктивных элементов, при котором достигается минимум массы МК с учетом конструктивных  $e_m$ , прочностных  $f_n$ , жесткостных  $g_p$  и коррозионных  $k_s$  ограничений [3, 4]:

$$Ц(\{x\}, \{z\}) \rightarrow \min;$$

$$e_m(\{x\}, \{z\}) \geq 0 \quad (m=1, \dots, M);$$

$$f_n(\{x\}, \{z\}) \geq 0 \quad (n=1, \dots, N);$$

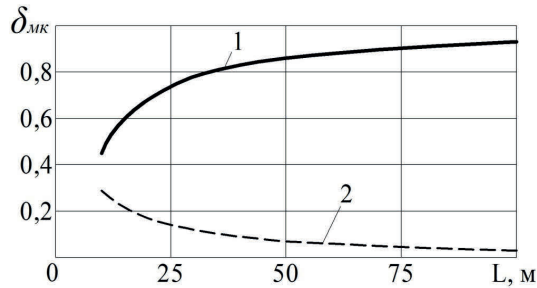
$$g_p(\{x\}, \{z\}) \geq 0 \quad (p=1, \dots, P);$$

$$k_s(\{x\}, \{z\}) \geq 0 \quad (s=1, \dots, S),$$

где  $Ц(\{x\}, \{z\})$  — целевая функция массы металлоконструкции стационарного КПЛ.

В работе рассмотрены распределения масс основных конструктивных узлов металлоконструкции КПЛ в зависимости от изменения его длины (рис. 2). Установлено, что с увеличением массовой производительности КПЛ от 50 до 300 т/ч распределе-

ние масс основных конструктивных узлов МК менялось до 5 %, поэтому его целесообразно принять постоянным для разной производительности при определенной длине конвейера.



**Рис. 2.** Графики соотношения вклада масс основных конструктивных узлов в металлоконструкцию в зависимости от длины КПЛ:  
1 — вклад массы линейной части  $\delta_{л.ч.}$ ; 2 — вклад массы приводной и натяжной станций  $\delta_{п.с.} + \delta_{н.с.}$

Вклады массы отдельных основных узлов в общую массу МК определялись по следующим формулам

$$\delta_{л.ч.} + \delta_{п.с.} + \delta_{н.с.} = 1;$$

$$\delta_{л.ч.} = \frac{m_{л.ч.}}{m_{м.к.}}; \quad \delta_{п.с.} = \frac{m_{п.с.}}{m_{м.к.}}; \quad \delta_{н.с.} = \frac{m_{н.с.}}{m_{м.к.}}$$

где  $m_{л.ч.}$ ,  $m_{п.с.}$ ,  $m_{н.с.}$ ,  $m_{м.к.}$  — масса линейной части, приводной станции, натяжной станции и всей металлоконструкции КПЛ соответственно.

График вклада масс от линейной части, приводной и натяжной станций КПЛ имеет параболический характер. Возрастание  $\delta_{л.ч.}$  и убывание  $\delta_{п.с.} + \delta_{н.с.}$  осуществляется в основном при длинах конвейера до 50 м. Далее зависимости приобретают приближенно линейный характер.

При длине конвейера с подвесной лентой более 50 м общий вклад масс от основных конструктивных узлов приводной и натяжной станций составляет менее 10...15 % суммарной массы конвейера, что объясняется увеличением числа линейных секций. Поэтому при длине КПЛ более 50 метров целесообразно переходить от полной оптимизации к параметрической, включающей оптимальное проектирование металлоконструкции только линейной части конвейера.

### Литература

- [1] Аверченков В.И., Давыдов В.И., Дунаев В.П. *Конвейеры с подвесной лентой*. Москва, Машиностроение-1, 2004, 256 с.
- [2] Лагерев А.В., Дунаев В.П. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой — инновационный вид машин непрерывного транспорта. *Инженерный журнал. Справочник*, 2009, № 10, с. 9–14.

- [3] Лагерев А.В., Бословяк П.В. Оптимальное проектирование узлов металлоконструкции конвейера с подвесной лентой в программном комплексе NX. *Вестник БГТУ*, 2014, № 2, с. 38–44.
- [4] Лагерев А.В., Бословяк П.В. Универсальная методика оптимального проектирования металлоконструкций конвейеров с подвесной лентой. *Вестник БГТУ*, 2014. № 1, с. 31–36.
- [5] Лагерев И.А., Лагерев А.В. *Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин*. Брянск, БГТУ, 2013, 228 с.

УДК 621.865.8

## Активная система трехмерной стабилизации оптических приборов для летательных аппаратов

© Овсянкин Георгий Игоревич, Рушева Дарья Викторовна,  
Бошляков Андрей Анатольевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н. Э. Баумана

[george.ovciankin@gmail.com](mailto:george.ovciankin@gmail.com), [irusheva@gmail.com](mailto:irusheva@gmail.com), [boshlyakov@mail.ru](mailto:boshlyakov@mail.ru)

*Проанализированы различные подходы к решению проблемы высокоточной 3-мерной стабилизации фото- и видеооборудования на борту беспилотных летательных аппаратов. Выдвигается концепция построения системы, где гексапод выбирается в качестве исполнительного механизма. Писано моделирование в среде MATLAB, которое подтверждает работоспособность трехосевой системы оптической стабилизации. По результатам моделирования сформулированы требования к исполнительным приводам гексапода, в качестве которых выбраны пьезоактюаторы. Построена динамическая модель электромеханической части системы в среде моделирования MATLAB и Adams, подтверждающая работоспособность предлагаемой системы.*

**Ключевые слова:** система стабилизации, гексапод, исполнительный модуль, математическая модель, пьезоактюатор.

В настоящее время широкое применение для исследования текущей обстановки с воздуха нашли беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Расширение спектра, решаемых БПЛА задач повысило требования к получаемым фото- и видеоматериалам.

Проводился анализ современных подходов к решению данной проблемы [1–3], который показал, что ни один из них не позволяет добиться требуемого качества изображения, получаемого непосредственно с аппаратуры. Было принято решение о необходимости разработки системы, позволяющей осуществлять трехмерную стабилизацию при поступающем на оптические приборы внешнем воздействии. Параметры внешнего воздействия на систему — вибрация с частотой 50 Гц и амплитудой 20', приходящая с борта БПЛА.

В качестве исполнительного механизма высокоточной системы стабилизации был выбран механизм параллельной кинематики — гексапод, так как он удовлетворяет предъявляемым требованиям к простоте и надежности конструкции системы.

Математическое моделирование [4] в среде MATLAB в пакете SimMechanics, подтвердило работоспособность трехмерной системы оптической стабилизации, а также сформировало требования к исполнительным приводам гексапода.

По результатам моделирования в качестве исполнительного модуля системы стабилизации были выбраны пьезоактуаторы, удовлетворяющие этим требованиям по своим паспортным данным [5] (перемещение порядка нескольких десятков микрометров, быстрота реакции на управляющий сигнал — доли миллисекунд, а также небольшие массогабаритные размеры).

С учетом проведенных исследований была построена динамическая модель электромеханической части системы стабилизации в среде моделирования MATLAB и Adams, включающая в себя платформу и шесть линейных приводов на основе пьезоактуаторов. Моделирование показало работоспособность предлагаемой системы.

### Литература

- [1] Canon. URL: <http://www.canon.ru> (дата обращения 13.07.2015)
- [2] Simple Brushless Gimbal Controller. URL: <http://www.simplebgc.com> (дата обращения 13.07.2015)
- [3] Антохин А.И., Власов А. И., Косолапов И. А. Концепция системы стабилизации на базе ЭМС гироскопа. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.*, 2011, № 10. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/228456.html> (дата обращения 13.07.2015)
- [4] Бошляков А.А., Овсянкин Г.И., Рушева Д.В. Активная система 3-мерной стабилизации фото- и видеоборудования для беспилотных летательных аппаратов. *Вестник МАИ*, 2014, т. 21, № 5, с. 27–35.
- [5] НИИ ЭППА. URL: <http://elapiezo.ru> (дата обращения 13.07.2015)

УДК 621.867

## Моделирование динамики конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом

© Толкачев Евгений Николаевич, Лагерев Александр Валерьевич

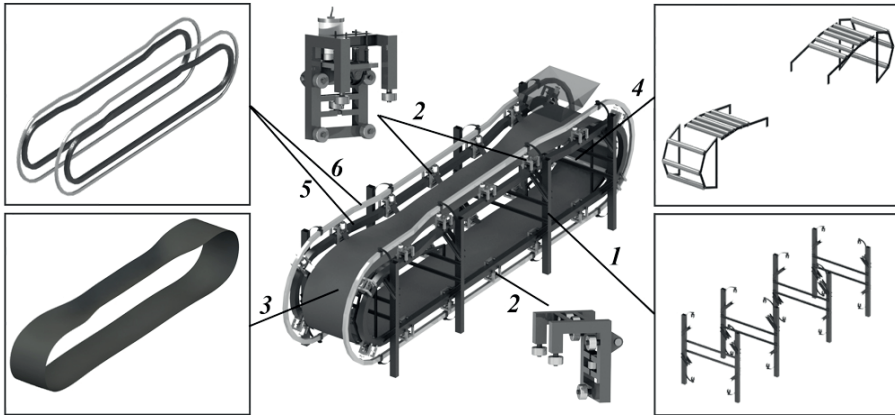
Россия, г. Брянск, Брянский государственный технический университет  
имени академика И.Г. Петровского

[tolkachev\\_en@mail.ru](mailto:tolkachev_en@mail.ru)

*Приводится описание разработанной конструкции конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом. Выполнены анализ и оценка динамических характеристик основных элементов конвейера на основании математического моделирования. Приведен ряд допущений, принятых при математическом моделировании, а также уравнения, описывающие динамическое поведение ведущих и ведомых подвесок конвейера. Смоделированы режимы движения приводных роликов ведущих подвесок.*

**Ключевые слова:** математическая модель, ленточный конвейер, подвесная лента, распределенный привод, подвеска, режимы движения.

Конвейер с подвесной лентой и распределенным приводом — наиболее перспективная разработка в направлении совершенствования и модернизации традиционных ленточных конвейеров, являвшихся на протяжении десятилетий неотъемлемой составляющей производственного процесса. Разработанный конвейер позволяет справиться с большинством проблем, возникающих при эксплуатации ленточных конвейеров в результате взаимодействия грузонесущей ленты со стационарными роликоопорами [1]. Причина этого — принципиально новый способ удержания ленты. В новой конструкции борта ленты прикреплены к размещенным вдоль трассы конвейера подвескам, которые перемещаются по направляющим качения и поддерживают ленту в подвешенном положении (рис. 1). Главной отличительной особенностью представленной конструкции по сравнению с существующими аналогами является оснащение части подвесок индивидуальным приводом, служащим для приведения системы в движение. Такое техническое решение позволяет не только увеличить ресурс самого дорогого элемента конвейера — грузонесущей ленты, но и повысить надежность работы системы за счет резервирования ее элементов.



**Рис. 1.** Общий вид конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом:  
 1 — став; 2 — подвески; 3 — лента; 4 — стационарные роликовые опоры; 5 — направляющие качения; 6 — токопроводящие троллеи

Анализ и оценку динамических процессов, возникающих при работе конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом, с целью выбора рациональных параметров основных элементов и узлов еще на этапе проектирования целесообразно выполнять на основе математического моделирования. Ранее авторами были разработаны модели движения дискретного участка (группы подвесок, состоящих из одной приводной и нескольких неприводных подвесок) и всего конвейера [2, 3]. Однако с учетом использования достаточно ненадежного фрикционного способа передачи тягового усилия ведущими роликами приводных подвесок важно реализовать в математической модели возможные режимы качения приводных роликов в процессе работы конвейера, так как характер движения приводных роликов определяет эффективность работы конвейерной установки.

Расчетная схема конвейера (рис. 2) строится с учетом следующих допущений:

1) конвейер с подвесной лентой и распределенным приводом моделируется системой дискретных масс, соединенных друг с другом упруговязкими связями;

2) каждая дискретная масса характеризует подвеску с сопряженным с ней участком ленты и грузом и представлена роликом с приведенными к его центру силами и массами;

3) продольным провисанием ленты под действием груза и ее поперечными колебаниями, приводящими к возникновению дополнительных сопротивлений пренебрегают;

4) ролики подвесок являются абсолютно жесткими, недеформируемыми элементами;

5) насыпной груз равномерно распределен между подвесками;

6) подвески на разноименных направляющих расположены абсолютно симметрично и имеют равные перемещения, скорости и ускорения.

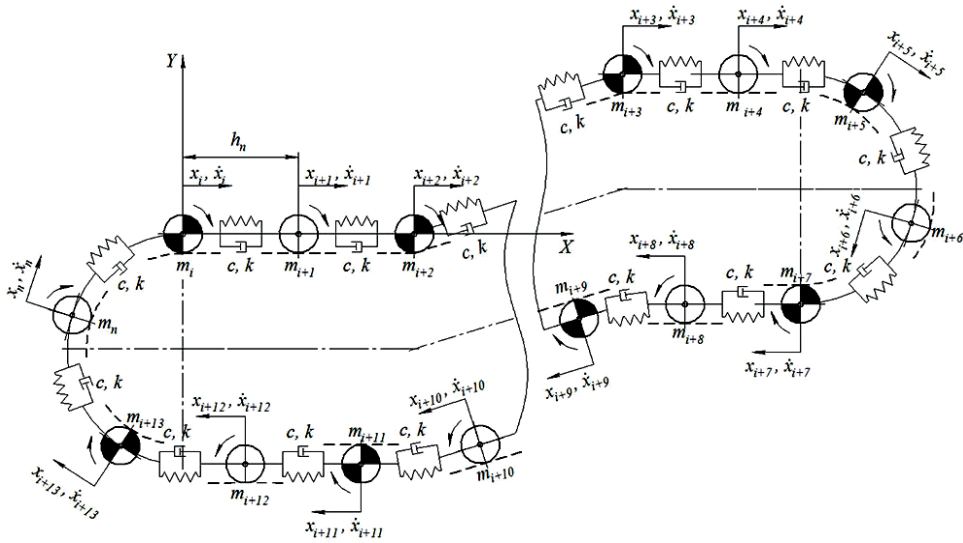


Рис. 2. Расчетная схема конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом

Преобразовав составленные системы уравнений динамики подвесок с возможностью проскальзывания только приводных роликов модели, получим:

- ускорение центра масс и угловое ускорение приводного ролика (рис. 3, а):

$$\begin{cases} \ddot{x}_n = \frac{1}{m_{ni}} (F_{cui} + (G_n + T_i \sin \beta_i) \sin \alpha_i + k_i (\dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}) + c(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1})); \\ \ddot{\varphi}_n = \frac{1}{J_{0ni}} (M_{kpi} - F_{cui} r_{np} - (G_n'' \cos \alpha_i + F_{np}) f_{np} - M_{\Sigma i}^{np}), \end{cases}$$

где  $\ddot{x}_n$  — линейное ускорение ведущего ролика в направлении оси  $OX$ ;  $\ddot{\varphi}_n$  — угловое ускорение ведущего ролика относительно оси вращения;  $\dot{x}$ ,  $x$  — скорости и перемещения роликов подвесок;  $m_n$ ,  $J_{0n}$  — приведенные масса и момент инерции приводной подвески;  $G_n$ ,  $G_n''$  — силы тяжести приводной подвески и прижимной секции приводной подвески;  $T$  — усилие от тяжести груза и ленты, действующее со



стороны крепления подвески с лентой;  $F_{np}$  — сила, действующая на ведущий ролик со стороны прижимного устройства;  $F_{сн}$  — сила сцепления ведущего ролика с опорной поверхностью;  $M_{кр}$  — крутящий момент мотор-редуктора приводной подвески;  $M_{\Sigma}^{np}$  — приведенный момент сопротивления движению приводной подвески;  $f_{np}$  — коэффициент трения качения ведущего ролика с опорной поверхностью;  $c$  — приведенная жесткость упругого элемента (ленты);  $k$  — коэффициент сопротивления демпфирующего элемента;  $r_{np}$  — наружный радиус ведущего ролика;  $\alpha$  — угол наклона подвески в вертикальной плоскости;  $\beta$  — угол наклона бортов ленты к горизонту;  $i$  — порядковый номер подвески;

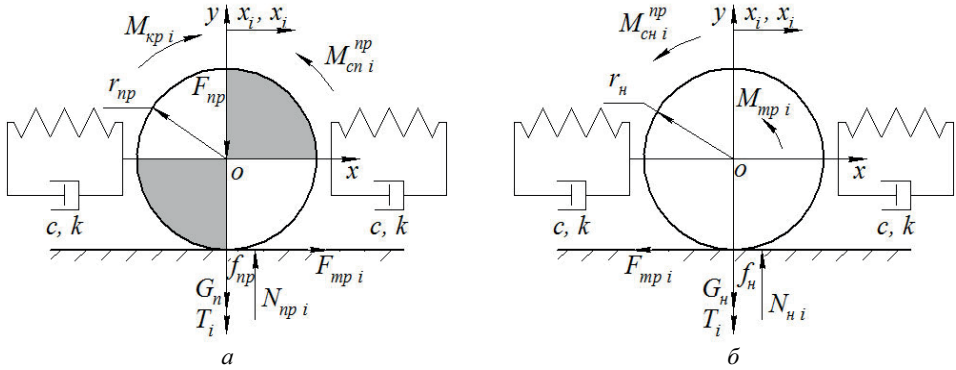


Рис. 3. Расчетные схемы роликов:  $a$  — приводного;  $b$  — холостого

- ускорение центра масс неприводного ролика ведомой подвески (рис. 3, б):

$$\ddot{x}_{ni} = \frac{r_n}{J_{0ni} + m_{ni}r_n^2} \left[ -M_{\Sigma i}^{np} + r_n \left( (G_n + T_i \sin \beta_i) \sin \alpha_i + k_i (\dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}) + c(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) \right) - (f_n + \mu_{н.о} r_n) (G_n + T_i \sin \beta_i) \cos \gamma_i \right],$$

где  $\ddot{x}_{ni}$ ,  $\ddot{y}_{ni}$  — линейное ускорение ведомого ролика в направлении оси  $OX$ ;  $\ddot{\phi}_{ni}$  — угловое ускорение ведомого ролика относительно оси вращения;  $m_n$ ,  $J_{0n}$  — приведенные масса и момент инерции неприводной подвески;  $G_n$  — сила тяжести неприводной подвески;  $M_{\Sigma}^{np}$  — приведенный момент сопротивления движению неприводной подвески;  $f_n$  — коэффициент трения качения ведомого ролика с опорной поверхностью;  $\mu_{н.о}$  — коэффициент трения скольжения в оси ролика;  $r_n$  — наружный радиус ведомого ролика.

Ведущие ролики приводных подвесок имеют возможность двигаться в одном из возможных режимов качения. В том случае, когда скорость точки соприкосновения ролика с неподвижной опорой направляющей качения больше нуля:

$$\dot{\phi}_{ni} r_{np} - \dot{x}_{ni} > 0,$$

происходит буксование приводного ролика. Сила трения определяется как

$$F'_{сн i} = \mu_{np} N_{np i} = \mu_{np} (G_n'' \cos \alpha_i + F_{np i}),$$

где  $\mu_{\text{пр}}$  — коэффициент трения скольжения ведущего ролика по опорной поверхности.

Если же скорость точки соприкосновения ролика с неподвижной опорой направляющей качения меньше нуля:

$$\dot{\phi}_{\text{пр}i} r_{\text{пр}} - \dot{x}_{\text{пр}i} < 0,$$

движение подвески сопровождается скольжением (юзом) ведущего ролика. Сила трения

$$F_{\text{сц}i}'' = -\mu_{\text{пр}} N_{\text{пр}i} = -\mu_{\text{пр}} (G_n'' \cos \alpha_i + F_{\text{пр}}). .$$

В противном случае, когда точка соприкосновения ролика с опорной поверхностью неподвижна,

$$\dot{\phi}_{\text{пр}i} r_{\text{пр}} - \dot{x}_{\text{пр}i} = 0,$$

и происходит чистое качение ведущего ролика без проскальзывания по опорной поверхности. Сила трения определяется полученным на основе уравнения кинематических связей выражением

$$F_{\text{сц}i} = \frac{1}{J_{0i} + m_i r_{\text{пр}}^2} \left[ m_i r_{\text{пр}} \left( M_{\text{кpi}} - M_{\Sigma}^{\text{пр}} - (G_n'' \cos \alpha_i + F_{\text{пр}}) f_{\text{пр}} \right) - J_{0i} \left( (G_n + T_i \sin \beta_i) \sin \alpha_i + \right. \right. \\ \left. \left. + k_i (\dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}) + c(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) \right) \right].$$

Приведенные уравнения характеризуют динамику приводных и неприводных подвесок. Динамическое поведение конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом определяется решением системы дифференциальных уравнений первого порядка, количество которых зависит от численности и типа подвесок.

Для конкретного сочетания технических параметров было выполнено моделирование динамики конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом. Получены графические зависимости динамических характеристик подвесок конвейера, оценено поведение приводных роликов ведущих подвесок на соответствующих участках трассы. Разработанная математическая модель позволяет анализировать динамические показатели конвейеров с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой, характеризующихся различными производительностью, условиями и режимами работы, а на основе анализа — определять рациональные параметры основных элементов соответствующих машин непрерывного транспорта.

### Литература

- [1] Лагереv А.В., Дунаев В.В. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой — инновационный вид машин непрерывного транспорта. *Справочник. Инженерный журнал*, 2009, № 10, с. 9–14.
- [2] Лагереv А.В., Толкачев Е.Н. Исследование движения подвесок дискретного участка конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой с помощью одномассовой динамической модели. *Вестник БГТУ*, 2013, № 4, с. 33–40.
- [3] Лагереv А.В., Толкачев Е.Н. Математическая модель конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой. *Вестник БГТУ*, 2014, № 3, с. 44–52.

УДК 621.86

### Методика анализа динамического взаимодействия манипуляционной установки и базового шасси

© Лагерев Игорь Александрович

Россия, г. Брянск, Брянский государственный университет  
имени академика И.Г. Петровского

[lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru)

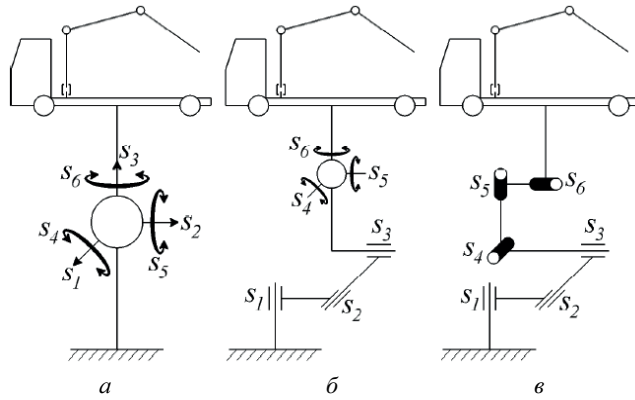
*Рассмотрены подходы к моделированию взаимодействия манипуляционной установки с базовым шасси транспортно-технологической машины. Первый, упрощенный, подход предполагает включение в расчетную схему у основания манипулятора дополнительного шарнира, второй — детальное моделирование базового шасси. Оба подхода предусматривают численное моделирование работы манипулятора.*

**Ключевые слова:** манипулятор, кран-манипулятор, транспортная машина, динамика, нагруженность, базовое шасси.

В настоящее время рынок крано-манипуляторных установок динамично развивается. Большая часть манипуляторов импортируется из стран Евросоюза. Однако в сложившейся геополитической обстановки требуется их импортозамещение отечественными конкурентоспособными установками. Для этого необходимо на научной основе совершенствовать методики прочностного расчета манипуляционных установок.

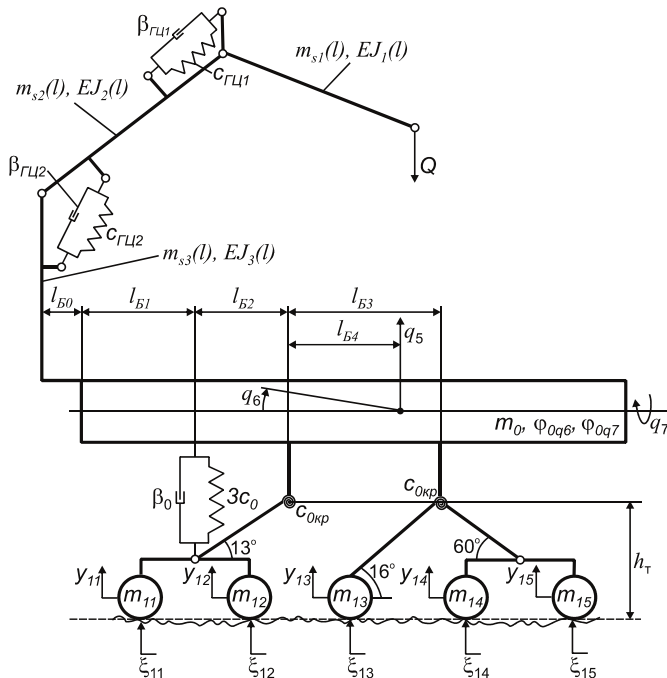
Для исследования динамики манипуляционной установки могут быть применены численные методы [1–3], являющиеся развитием общеизвестных алгоритмов кинематического и динамического анализа многосвязных манипуляторов. Одно из главных допущений этих методик — манипулятор установлен на абсолютно жестком неподвижном основании. Это допущение не вносит значительных погрешностей при исследовании промышленных роботов-манипуляторов. Однако для манипуляторов различных транспортных машин, работающих на пересеченной местности, такой подход может привести к значительным ошибкам в расчетах.

Для упрощенного моделирования влияния шасси на манипулятор можно ввести между крайним звеном манипулятора и опорной поверхностью дополнительный шарнир со свойствами, эквивалентными приведенным динамическим характеристикам базового шасси (рис. 1).



**Рис. 1.** Сочленение с шестью степенями свободы, моделируемое: *a* — единым шарниром; *b* — комбинацией сферического и призматических шарниров; *в* — набором петлевых и призматических шарниров

Однако такой подход не позволяет детально изучить динамическую нагруженность отдельных элементов шасси в процессе работы, а также влияние реологии грунта на динамику системы в целом. Для решения таких задач требуется построение детальных динамических моделей как манипуляционной установки, так и шасси. Пример такого подхода приведен в [4]. Динамическая модель манипуляционной установки на шасси показана на рис. 2.



**Рис. 2.** Динамическая модель крана-манипулятора

С использованием данных моделей и методик исследована динамическая нагруженность крана-манипулятора и шасси машины АСТ-4-А. Дальнейшие исследования будут посвящены оценке динамической нагруженности кранов-манипуляторов типовых машин с учетом реологии грунтов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых-кандидатов наук № МК-92.2014.8.*

#### Литература

- [1] Lagerev A.V., Milto A.A., Lagerev I.A. Tool for Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Cranes. *International Review on Modelling and Simulations*, 2014, vol. 7, no 4, pp. 644–652.
- [2] Lagerev, A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Preliminary Dynamics and Stress Analysis of Articulating Non-Telescoping Boom Cranes Using Finite Element Method. *International Review on Modelling and Simulations*, 2015, vol. 8, no 2, pp. 223–226.
- [3] Лагерев И.А. Динамическая нагруженность крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов при движении с грузом. *Подъемно-транспортное дело*, 2011, № 3, с. 7–9.
- [4] Лагерев И.А. Исследование движения базового шасси крана-манипулятора с помощью многомассовых динамических моделей. *Вестник БГТУ*, 2013, № 1, с. 36–40.

УДК 629.113

## Доводка конструкции коробки передач по результатам тест-драйва автомобиля

© Новиков Дмитрий Сергеевич

Российская Федерация, г. Ярославль, ОАО «Автодизель»

[NovikovDS81@gmail.com](mailto:NovikovDS81@gmail.com)

*Проанализирован первый опыт ОАО «Автодизель» (ЯМЗ) и ОАО «АЗ «Урал» оценки коробок передач различных производителей, которыми комплектуют силовые агрегаты на базе двигателей ЯМЗ, применяемых в составе транспортных средств Урал. Показаны дальнейшие усовершенствование конструкции модернизированной коробки передач по результатам тест-драйва автомобилей.*

**Ключевые слова:** механическая коробка передач, тест-драйв, уровень шума в кабине, усилие переключения передач, четкость включения передач.

В 2014 г. на ОАО «Автодизель» (ЯМЗ) была разработана модернизированная коробка передач (КП) ЯМЗ-1205, предназначенная для комплектования автомобилей производства ОАО «АЗ «Урал» [1].

Для оценки технического уровня модернизированной КП ЯМЗ-1205 по сравнению с импортными КП, применяемыми на транспортных средствах «Урал», и КП ЯМЗ предыдущих поколений (табл. 1) на ОАО «АЗ «Урал» были проведены тест-

драйвы автомобилей, которые оценивали по пятибалльной шкале профессиональные водители и специалисты различных инженерных служб ОАО «АЗ «Урал» и ОАО «Автодизель».

Таблица 1

**Сравнение некоторых эксплуатационных параметров КП по результатам тест-драйва автомобилей Урал, балл\***

Эксплуатационный параметр	Модель КП				
	ZF 9S1310TO	FG 9S135TA	ЯМЗ-1205	ЯМЗ-1105	ЯМЗ-2361
Усилие переключения передач	4,0	4,1	3,8	2,6	2,4
Четкость переключения передач	4,1	4,0	3,7	2,4	2,6
Четкость переключения с высшей передачи на низшую передачу	4,4	3,8	3,4	2,3	2,7
Уровень шума в кабине	4,5	4,0	3,6	2,5	2,9
<b>Итого</b>	17	15,9	14,5	9,8	10,6
* Средний по 7 опросным листам.					

По оценкам участников тест-драйва модернизированная КП ЯМЗ-1205 по эксплуатационным показателям значительно превосходит КП предыдущих поколений, выпускаемых ОАО «Автодизель» и незначительно отстает от своих конкурентов импортного производства для тестируемого класса автомобилей «Урал» (см. табл. 1).

С целью дальнейшего улучшения эксплуатационных параметров КП ЯМЗ-1205 было принято решение о проведении второго этапа модернизации по результатам тест-драйва. Из оценочных параметров конструкция КП ЯМЗ-1205 позволяет улучшить параметры «усилие переключения передач», «четкость переключения передач», «четкость переключения с высшей передачи на низшую передачу».

Модернизация проведена за счет отказа от устаревшей схемы включения 1-й передачи и заднего хода подвижной шестерней и заменой ее более современной схемой с постоянным зацеплением шестерен 1-й передачи и заднего хода [2, 3], в которой переключение производится за счет подвижной муфты, что, в свою очередь, приблизительно в 8 раз снизит массу перемещаемых деталей и, как следствие, уменьшит усилие на переключение передач. Кроме того применение последней схемы позволяет использовать шестерни 1-ой передачи и заднего хода с косым зубом, что, в свою очередь, позволит снизить уровень шума, излучаемый КП в окружающую среду при работе на данных передачах, а также увеличить ресурс КП.

Отрицательными моментами при изменении схемы является незначительное увеличение массы КП ( $\approx 4\%$ ) и времени подготовки производства, а также повышение цены, но высокий курс доллара и евро по отношению к российскому рублю позволит КП оставаться на конкурентном уровне.

С целью подтверждения улучшения конструкции КП в настоящее время на ОАО «Автодизель» готовятся опытные образцы для следующего тест-драйва.

Первый опыт совместного ОАО «Автодизель» (ЯМЗ) и ОАО «АЗ «Урал» тест-драйва показал, что на данном этапе можно выявить недостатки новой КП, являющиеся критичными для конечного потребителя, сравнить ее с конкурентами и наметить дальнейшие пути совершенствования конструкции.

Литература

- [1] Новиков Д.С. Возможности модернизации коробок передач в условиях действующего производства. *Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*. Москва, 24–27 сентября 2014 г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, с. 374–375.
- [2] Блохин А.Н., Маньковский В.В., Недялков А.П. Инновационные коробки передач «КОМНАМИ» с механическим и автоматизированным управлением. *Наука и образование*, 2011, № 9. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/214551.html> (дата обращения 21.06.2015).
- [3] Naunheimer H., Bertsche B., Ryborz J., Novak W. *Automotive Transmissions*. Berlin, Springer, 2011, 717 p.

УДК 629.113

## Анализ продольного сноса нормальной реакции твердой плоской опоры на эластичное колесо

© Сторчилова Татьяна Алексеевна, Балакина Екатерина Викторовна,  
Зотов Николай Михайлович

Россия, г. Волгоград, Волгоградский государственный технический университет

[stor4ilova@rambler.ru](mailto:stor4ilova@rambler.ru)

*По итогам исследований реакций, образующихся при взаимодействии опорной поверхности и эластичного колеса, а также сносов этих реакций, предложено разделение общепринятого в настоящее время понятия продольного сноса нормальной реакции опорной поверхности не на две, а на три составляющих. Представлены основные результаты, полученные в ходе экспериментальных измерений продольного сноса нормальной реакции.*

**Ключевые слова:** эластичное колесо, опорная поверхность, снос, реакции, реакции в пятне контакта.

Устойчивость движения эластичного колеса определяется, как известно, силами и моментами в пятне контакта, обуславливающими явления увода, колебаний управляемых колес, сохранением контакта колеса с опорной плоскостью и др.

При решении статических задач по определению нормальных (вертикальных) реакций при неподвижной оси колеса, известно, что точка приложения вертикальной реакции располагается в центре пятна контакта. Исследования качения колеса в ведомом режиме хорошо изучены и их результатами является утверждение, что вертикальная реакция в этом случае смещена в сторону движения на величину  $a = fR_k$ , где  $f$  — коэффициент сопротивления качению;  $R_k$  — динамический радиус колеса [1–4]. Причиной возникновения смещения является необходимость преодоления различных потерь энергии как непосредственно в зоне контакта, так и в самом материале колеса, участки которого при качении колеса подвергаются постоянно периодически меняющимся по направлению деформациям. Более поздние исследования показали, что

картина смещения точки приложения вертикальной составляющей реакции определяется не только потерями в зоне пятна контакта и в материале колеса, но и упругими связями колеса, из-за чего положение оси колеса оказывается не неизменным в продольном направлении, а зависит от величины продольных сил [5].

Авторами данной работы предложено разделение общепринятого понятия продольного сноса нормальной реакции опорной поверхности не на две составляющих, как общепринято, а на три составляющих [2, 6]. Одна составляющая, как обычно, характеризует гистерезисные потери (радиальные и тангенциальные) на качение колеса; другая составляющая, как обычно, характеризует продольное упругое перемещение оси колеса относительно геометрического центра пятна контакта, а третья составляющая, введенная авторами, характеризует упругие угловые деформации шины, вызывающие несимметричность эпюры нормальных напряжений в зоне пятна контакта.

Приведенные ниже используемые обозначения выбраны таким образом, чтобы можно было сопоставить описываемые параметры с параметрами, используемыми другими авторами:  $b$  — продольный снос нормальной реакции опорной поверхности, т. е. расстояние от нормальной реакции опорной поверхности  $R_z$  до геометрического центра пятна контакта;  $c$  — продольное упругое перемещение оси колеса относительно геометрического центра пятна контакта;  $a$  — продольный снос нормальной реакции из-за гистерезисных потерь в колесе;  $e$  — продольный снос нормальной реакции вследствие упругих угловых деформаций шины.

Составляющие  $a$  и  $c$  несложно определить расчетным путем. Составляющую  $e$  на сегодняшний день рассчитать не представляется возможным. Для ее экспериментального определения в ВолгГТУ создана установка [7], фотография и схема которой приведены на рис. 1, 2.



Рис. 1. Фотография установки

Ступица колеса шарнирно установлена на односторонне закрепленную в шарнирах горизонтальную раму с горизонтальным расположением оси колеса. На балки этой рамы воздействуют радиальным нагружающим силовым фактором, создающим



радиальную нагрузку в плоскости вращения колеса, которая проходит через геометрический центр колеса, причем горизонтальная рама параллельна поворотной измерительной опорной площадке. Ось поворота этой площадки установлена в шарнирах и всегда параллельна оси колеса, взаимодействующей с шиной колеса и создающей грузом в контактной точке нормальную реакцию опорной поверхности, пропорциональную радиальному нагружающему силовому фактору при отсутствии другого силового фактора.

Нормальную реакцию опорной поверхности вычисляют из первичных показаний датчика силовых воздействий измерительной опорной площадки. Ось колеса не параллельна поворотной измерительной опорной площадке при наличии дополнительного крутильного нагружающего силового фактора в плоскости вращения колеса, вызывающего перемещение в горизонтальной плоскости, перпендикулярно оси колеса, точки приложения нормальной реакции опорной поверхности, пропорциональное дополнительному крутильному нагружающему силовому фактору, которое вычисляют из вторичных показаний датчика силовых воздействий измерительной опорной площадки.

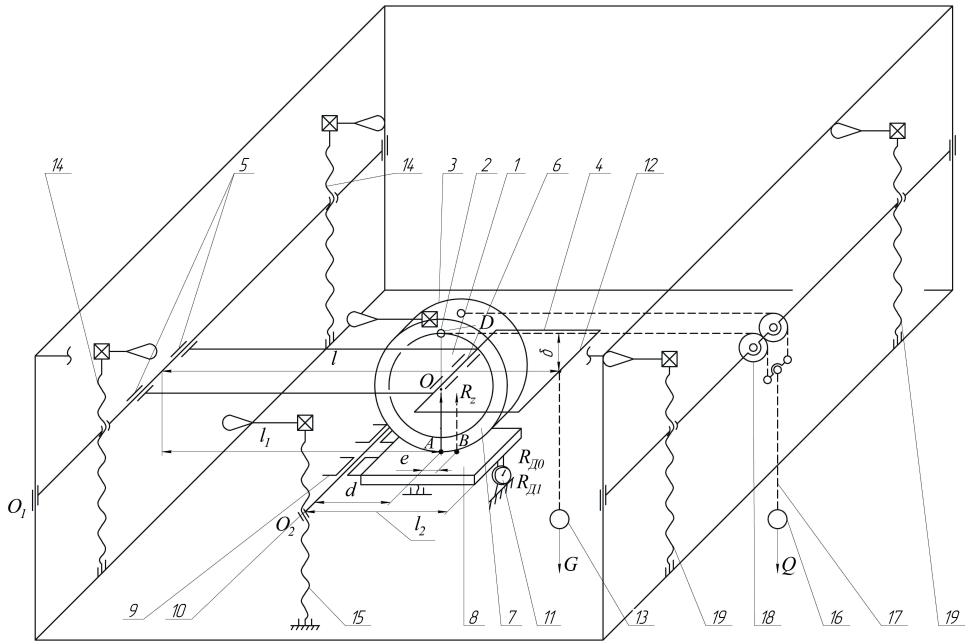


Рис. 2. Схема установки

На установке, представленной на рис. 1 и 2, использовалась шина модели 3.25/3.00-8 (Китай), аналогичная другим шинам не только геометрически, но и по упругим свойствам ( $p_{\max} = 25 \text{ PSI} = 1,72 \text{ bar} = 1,72 \text{ атм}$ ). Фотография динамометра (см. рис. 2, поз. 11) показана на рис. 3.

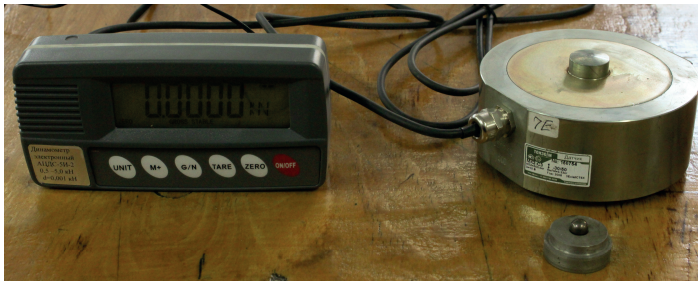


Рис. 3. Фотография динамометра

Сила  $Q$  измерялась динамометром ДПУ-0,2-2 (заводской №384, максимальная вариация показаний  $\pm 2\%$ ).

Конструктивные параметры установки, приведенной на рис. 2, имели следующие значения:

Параметр	$l$	$l_1$	$d$	$l_2$	$\delta$
Значение, мм	980	515	32	65	80

Результаты измерений представлены на рис. 4.

Подобные эксперименты уже проводились авторами и их результаты опубликованы в работе [6]. В данной статье изложены результаты повторных экспериментов, выполненных с большей скоростью нагружения шины, что не позволяло явлению релаксации материала шины оказывать влияние на измеряемые параметры. В результате в левой части каждого графика отсутствует «петля», расположенная ниже оси ординат.

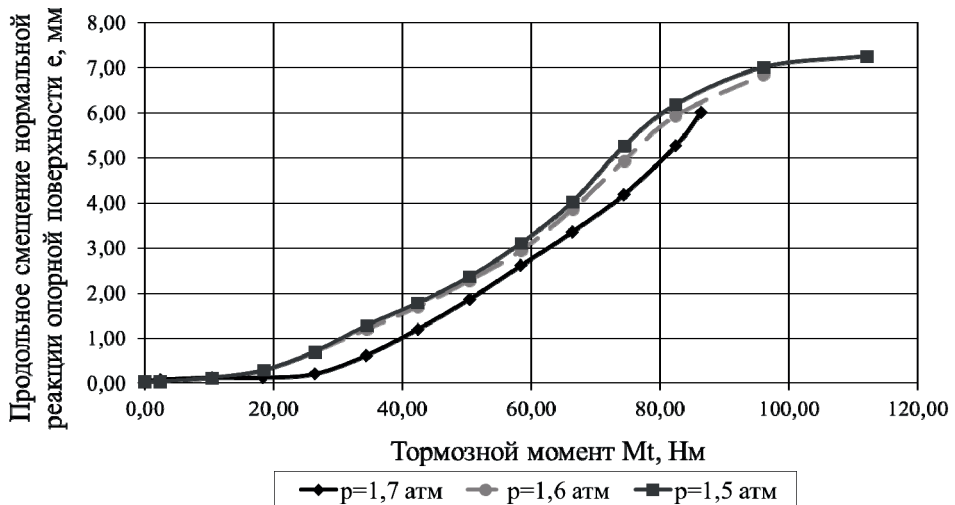


Рис. 4. Зависимость смещения нормальной реакции опорной поверхности от тормозного момента для шины модели 3.25/3.00-8 ( $p_{\max} = 25 \text{ PSI} = 1,72 \text{ bar} = 1,72 \text{ атм}$ )

На рис. 4 видно, что при  $p = 0,8, p_{\min} \dots p_{\max}, e_{\max} = 6 \dots 7,3 \text{ мм}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ.  
Проект № 14-08-00042 «Развитие исследования и моделирования взаимосвязанных явлений в контакте эластичного колеса с твердой опорой в новом представлении».

### Литература

- [1] Балакина Е.В., Зотов Н.М. *Устойчивость движения колесных машин*. Волгоград, РПК «Политехник», 2011, 464 с.
- [2] Балакина Е.В., Зотов Н.М. Определение взаимного расположения сил, реакций и зон трения в пятне контакта эластичного колеса с твердой поверхностью. *Трение и износ*, 2015, т. 36, № 1, с. 36–40.
- [3] Кравец В.Н., Селифонов В.В. *Теория автомобиля*. Москва, ООО «Гринлайт», 2011, 884 с.
- [4] Ларин В.В. *Теория движения полноприводных колесных машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 392 с.
- [5] Петрушов В.А. *Автомобили и автопоезда: новые технологии исследования сопротивлений качения и воздуха*. Москва, ТОРУС ПРЕСС, 2008, 352 с.
- [6] Balakina E.V., Zotov N.M. Determination of the Mutual Arrangement of Forces, Reactions, and Friction Zones in the Contact Zone of an Elastic Wheel with a Solid Surface. *Journal of Friction and Wear*, 2015, vol. 36, no 1, pp. 29–32. URL: <http://link.springer.com/article/10.3103/S106836661501002X> (lfnfj,hfotybz 12/05/2015)).
- [7] Балакина Е.В., Зотов Н.М., Зотов В.М., Федин А.П. *Способ определения силовых факторов, действующих на колесо транспортного средства*. Пат. № 2539847 Российская Федерация, МПК G01L 5/16, G01M 17/013. 2015, бюл. № 3, 5 с.

УДК 656.135

## Классификация транспортных систем с применением логистического подхода

© Тюкина Людмила Владимировна, Мочалин Сергей Михайлович

Россия, г. Омск, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия

[lyudmila.omsk@mail.ru](mailto:lyudmila.omsk@mail.ru)

*Рассмотрены существующие подходы к управлению транспортными системами. Обоснована необходимость применения и развития концепций «точно в срок» и «точно в последовательности» при доставке грузов автомобильным транспортом. На основе исследования заявок на доставку грузов установлено, что доставки делятся на моно- и полипартионные. Дана характеристика моно- и полипартионной доставки, приведены возможные варианты этих доставок в зависимости от условий и ограничений, представленных в заявке. На основе логистического подхода разработаны дополнительные классификационные признаки транспортной системы.*

**Ключевые слова:** транспортная система, монопартионная доставка, полипартионная доставка, «точно в срок», «точно в последовательности».

Транспортная отрасль развивается достаточно активно и для упрощения управления транспортными системами разрабатываются новые методы и технологии [1]. Несмотря на некоторые положительные результаты, вопросы планирования транспортного процесса решаются без учета всех требований, предъявляемых участниками доставки грузов [2]. При оперативном планировании доставки грузов не в полном объеме учитываются требования заказчика транспортных услуг — доставка груза в точно определенное время, в конкретно определенной последовательности, что, естественно, снижает эффективность предлагаемых и реализуемых мероприятий.

Существующий традиционный подход к управлению транспортными системами сводится к выбору оптимальной очередности наращивания пропускной способности транспортных коммуникаций так, чтобы затраты на транспортировку были минимальными. Однако в условиях конкуренции перевозчиков данный подход не актуален, так как не учитывает интересов потребителей транспортных услуг. Основным принципом большинства технологий управления транспортными системами является координация цепей поставок, основанная на синхронизации бизнес процессов участников цепи поставок.

В отличие от традиционного подхода объектом логистического подхода является результат деятельности логистических потоков. Применение логистического подхода позволяет сохранить устойчивость транспортной системы [1]. В настоящее время данный подход широко применяется в процессе перевозок [3]. Один из способов управления транспортными системами — адаптация системы в сложившейся ситуации. Подробнее данные методы адаптации рассмотрены в [1]. Для реализации механизмов адаптации необходимо взаимодействие всех элементов транспортной системы. Требования современного рынка ставят перед логистикой новые задачи по управлению транспортными системами, в частности доставками. В результате возникает необходимость осуществлять доставки не только точно в срок (JIT), но и в определенной последовательности (JIS) [4].

В наибольшей степени для организации работы транспортной системы по перевозкам грузов автомобильным транспортом с предъявляемыми требованиями по времени и последовательности доставки отвечает логистический подход. На транспортный процесс, который осуществляет АТП в транспортной системе, накладываются свои условия и ограничения. Условия и ограничения могут накладываться грузоотправителем (ГО), грузополучателем (ГП) и они будут уникальны только для этой транспортной системы. Главное из таких требований — полнота и своевременность удовлетворения спроса на необходимый конечному потребителю товар [5, 6]. Именно на стыках функциональных областей основной и сопутствующие потоки нуждаются в организации планирования и управления взаимодействия участников транспортной системы [7].

Однако, прежде чем планировать процесс доставки груза и составлять расписание, необходимо идентифицировать транспортную систему на основе классификационных признаков.

В настоящее время известны разные подходы и принципы классификации многоуровневых иерархических систем и, в зависимости от решаемой задачи, можно выбрать различные аспекты рассмотрения системы и ее элементов. В качестве примера можно указать классификацию по сложности поведения К. Боулдинга, Г.Н. Поворова и классификацию по сложности поведения Б.С. Флейшмана.

Рассматривая системы доставки грузов с позиций организации и управления грузовыми перевозками, можно заметить, что любая транспортная система, каких бы

она ни была размеров, представляет собой совокупность средств и путей сообщения, а также погрузочных и разгрузочных пунктов, подразделений анализа, планирования и управления процессами подготовки и доставки грузов [8].

Классификация транспортных систем должна быть основана на системном подходе. Применение системного подхода заключается в том, что структура управления транспортными системами рассматривается как многоуровневая. И только системный подход позволяет провести исследование транспортной системы комплексно с учетом особенностей протекания транспортных процессов.

Каждая транспортная система отличается своей уникальностью и прежде чем оказаться в сборочном цехе комплектующие проходят свой путь. Каждый комплектующий поставляется по конкретной сложившейся транспортной системе. Доставка комплектующих в течение смены может осуществляться как однократно, так и многократно.

В настоящей работе объектом исследования является доставка груза одним автомобилем, работа которого осуществляется по маятниковому маршруту с обратным холостым пробегом. В ходе исследования заявок на доставку груза установлены следующие ограничения, накладываемые на этот процесс:

- регулярность доставки;
- объем перевозимого груза;
- грузоподъемность транспортного средства;
- количество автомобилей, работающих в системе равно 1 ( $A_c = 1$  ед.).
- совместимость времени работы грузоотправителя, грузополучателя.

В ходе проведенных исследований также были определены следующие условия доставки груза:

- грузоподъемность транспортного средства ( $q$ );
- класс груза — 1;
- сроки доставки ( $T_{тв}$ );
- объем перевозимого груза указанный в заявке ( $Q$ ) не должен превышать пропускную способность цепи поставки ( $W_c$ );
- поступление груза к грузополучателю осуществляется точно в определенной последовательности.

На основе проведенных исследований выявлено, что доставки делятся на моно- и полипартионные [9].

*Монопартионная доставка* — поставка груза, в которой предъявленный объем груза к перевозке доставляется за одну партию ( $n$ ), где  $n = 1$ .

*Полипартионная доставка* — поставка, в которой предъявленный объем груза к перевозке доставляется за  $n$ -е количество партий, где  $n > 1$ .

Таким образом, на основе логистического подхода сформулированы следующие классификационные признаки транспортной системы.

*Количество звеньев в процессе доставки ( $N$ ):*

- без участия посредников — прямая транспортная система,  $N = 1$ ;
- с участием посредников — эшелонированная транспортная система,  $N > 1$ .

*Объем перевозок грузов в транспортной системе ( $Q_{м.п}$ ):*

- $Q_{м.п} < W_{т.с}$ ,  $A_c = 1$  ( $Q_{м.п}$  — мощность материального потока;  $W_{т.с}$  — производительность транспортной системы;  $A_c$  — требуемое количество транспортных средств);
- $Q_{м.п} > W_{т.с}$ ,  $A_c > 1$ ;
- $Q_{м.п} < Q_{т.с}$ ,  $T_d = 1$  ( $Q_{т.с}$  — пропускная способность транспортной системы;  $T_d$  — количество дней, необходимых для осуществления поставки);

- $Q_{м.п} > Q_{т.с}, T_d > 1$ .

*Партионность поставки в рамках одной заявки* ( $\Pi_n$ ).  $\Pi_n = 1, 2, 3, \dots, k$  ( $k$  — количество партий в рамках одной заявки):

- если  $\Pi_n = 1$ , монопартионная поставка;
- если  $\Pi_n > 1$ , полипартионная поставка.

*Объем перевозимого груза за одну партию* ( $Q_{гр}$ ):

- с фиксированным объемом перевозимого груза за партию —  $Q_{гр} = \text{const}$ ;
- с нефиксированным объемом перевозимого груза за партию —  $Q_{гр} \neq \text{const}$ .

*Время ожидания грузополучателем очередной партии груза* ( $T_{п.ож}$ ):

- с одинаковым временем ожидания —  $T_{п.ож}^n = \text{const}$  ( $i$  — порядковый номер партии,  $n$  — заключительная партия);

- с различным временем ожидания —  $T_{п.ож}^n \neq \text{const}$ .

*Время ожидания автомобиля начала исполнения партии* ( $t_{ож.а}$ ):

- без времени ожидания —  $t_{ож.а}^n = 0$  ( $i$  — порядковый номер партии,  $n$  — заключительная партия);

- с одинаковым временем ожидания —  $t_{ож.а}^n = \text{const}$ ,

- с различным временем ожидания —  $t_{ож.а}^n \neq \text{const}$ .

*Ограничение по времени начала и окончания поставки партии* ( $T_{огр}$ ):

- с ограничением времени начала поставки ( $T_{н.п}$ ) партии —  $T_{огр} = T_{н.п}$ ;
- с ограничением времени окончания поставки ( $T_{ок.п}$ ) партии —  $T_{огр} = T_{ок.п}$ ;
- с ограничением времени начала и окончания поставки партии —  $T_{н.п} = T_{огр}, T_{ок.п} = T_{огр}$ .

*Номенклатурность груза* ( $H_i$  — номенклатурность  $i$ -й партии) характеризуется количеством номенклатурных единиц груза в  $i$ -й партии. Данный признак важен для соблюдения условий поставки по концепции JIS. За  $i$ -е количество партий груз может быть различной номенклатуры:

- $H_i = 1$  — моногруз;
- $H_i > 1$  — полигруз.

Идентификация транспортной системы позволяет организовать эффективные доставки с применением концепций ЛТ и ЛС, что, в свою очередь, обеспечивает качественное управление транспортными системами, направленное на обслуживание клиентов на более высоком уровне, с меньшими издержками, с гарантированными сроками и последовательностью доставок.

## Литература

- [1] Рахмангулов А.Н., Трофимов С.В., Корнилов С.Н. *Управление транспортными системами. Теоретические основы*. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2001, 191 с.
- [2] Тюкина Л.В. Анализ параметров заявки на доставку грузов автомобильным транспортом. *Сб. науч. тр. молодых ученых по материалам Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационное лидерство строительной и транспортной отрасли глазами молодых ученых»*. Омск, 2014, с. 352–357.

- [3] Галабурда В.Г., Персианов В.А., Тимошин А.А. *Единая транспортная система*. Москва, Транспорт, 1996, 295 с.
- [4] Мочалин С.М., Тюкина Л.В. Алгоритм планирования доставки грузов на основе логистических концепций ЛТ, ЛС в прямых цепях поставок. *Материалы IV науч.-практ. конф. ФГОУ ВПО «СибАДИ» в рамках Междунар. конгр. Омск, 2013, т. 4, с. 70–74.*
- [5] Лазарев, А.А., Гафаров Е.Р. *Теория расписания. Задачи и алгоритмы*. Москва, Экзамен, 2011, 213 с.
- [6] Уотерс Д. *Логистика. Управление цепью поставок. Сер. Зарубежный учебник*. Москва, Изд-во Юнити-ДАНА, 2003, 530 с.
- [7] Иванов Д.А. *Управление цепями поставок*. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2009, 660 с.
- [8] Николин В.И. *Научные основы совершенствования теории грузовых автомобильных перевозок*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2000.
- [9] Мочалин, С.М., Тюкин, Л.В. Особенности применения логистических принципов в организации доставки грузов автомобильным транспортом. *Вестник СибАДИ*, 2014, № 1, с. 20–24.

УДК 629.3.027.74

## **Перспективы применения резиноармированных гусениц на транспортных и тяговых машинах различного назначения**

© Федоткин Роман Сергеевич, Крючков Виталий Алексеевич

Россия, г. Москва, ОАО «Научно-исследовательский институт стали»

[ns\\_oxhs@tplants.com](mailto:ns_oxhs@tplants.com), [frs89@bk.ru](mailto:frs89@bk.ru)

*Проведен краткий анализ конструкции резиноармированных гусениц с указанием их основных преимуществ использования по сравнению с металлическими. Оценены дальнейшие перспективы их применения на транспортных и тяговых машинах, в том числе военного назначения.*

**Ключевые слова:** *резиноармированная гусеница, резиоленточная гусеница, движитель, ходовая система, тяговая машина, бронетанковая техника.*

В XX веке до, во время и после Второй Мировой войны конструкции резиноармированных (РАГ) и резиоленточных гусениц (РЛГ) активно применялись на двухполугусеничных машинах — вездеходах и тягачах как в СССР, так и в Германии [1]. Первые отечественные натурные образцы РАГ появились в 1980-х годах в НПО «НАТИ», где был разработан типоразмерный ряд конструкций РАГ от узких (230 мм и менее) до широких (более 1 000 мм) типоразмеров: 230 65 (52...70), 320 90 (42...66), 470 125 (58...62), 645 125 (66...82) [2].

В настоящее время в РФ ОАО «НИИ стали», ОАО «ЧАЗ» и ООО «ККУ «КТЗ» ведут работы по подготовке организации серийного производства РАГ типоразмеров 645 125 75 и 400 126 59 (усиленные) для машин ОАО «ЧАЗ», в опытной эксплуатации находятся полноразмерные РАГ типоразмеров 645 125 75, 645 125 90 и 470 126

61 соответственно сельскохозяйственного трактора «Агромаш-Руслан» (рис. 1, *а*), комбайна «Енисей-858» (рис. 1, *б*), лабораторные испытания проходят фрагменты РАГ типоразмера 470 126 61 с различными схемами армирования.



*а*



*б*

**Рис. 1.** Примеры применения РАГ на сельскохозяйственной технике:  
*а* — трактор «Агромаш-Руслан»; *б* — комбайн «Енисей-858»

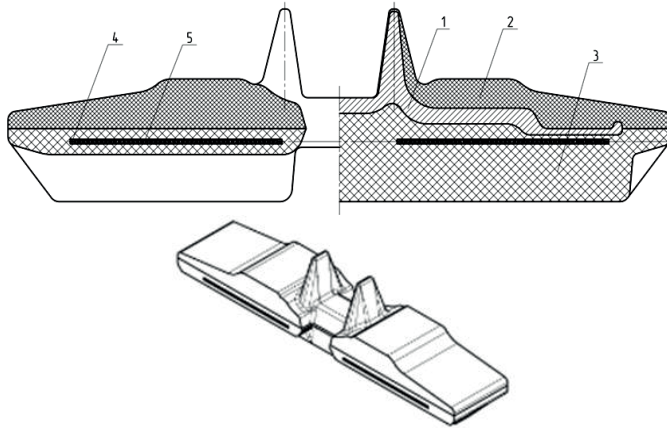
В состав отечественных РАГ входят следующие основные элементы (рис. 2) [3–5]:

- закладные элементы (ЗЭ), выполненные литьем, что позволяет снизить их массу в отличие от штамповок при сохранении прочности, предназначенные для зацепления с зубьями ведущего колеса (ВК), направления движения и ограничения съезда опорных катков с беговых дорожек, а также восприятия и передачи на опорную поверхность нагрузки от веса машины;
- слой беговой резины, образующий беговую дорожку для опорных катков и покрывающий направляющие гребни ЗЭ;
- слой протекторной резины, образующий почвозащепы для обеспечения надежного сцепления и устойчивости машины, взаимодействующий с опорной поверхностью;



- слой обкладочной резины, образующий с равномерно уложенным металлическим тросом или кордом армирующий сердечник — тяговую основу гусеницы;
- металлическая продольная арматура в виде металлотроса или металлокорда (в исследуемой конструкции РАГ армирующий слой образован продольно уложенными стальными латунированными тросами конструкции) [2, 3, 4].

Подробное описание конструкции РАГ и ее отдельных компонентов, в том числе армирующего сердечника (тросового и кордного полотна), а также клеевых соединений приведено в работах [3–5].



**Рис. 2.** Конструкция РАГ типоразмера 645×125×75 (90) трактора «Агротрактор-Руслан» и комбайна «Енисей-858»:  
 1 — 3Э; 2 — слой беговой резины; 3 — слой протекторной резины; 4 — слой обкладочной резины; 5 — продольно уложенные стальные тросы

Кроме применения на сельскохозяйственной и промышленной технике, в настоящее время РАГ находят все более широкое применение на бронетанковой военной технике (БТВТ). Так, например, еще в 1937–1943 годах образцы РАГ использовались в ходовых системах самого массового американского полугусеничного БТР М2 Halftrack Car. Работы по РАГ для БТВТ ведутся в настоящее время в Швеции, США, Канаде, Норвегии, Великобритании, Франции, Германии, Италии. Имеется информация о применении РАГ на шведских двухзвенных четырехгусеничных БТР BV-206 и Viking BVS10; норвежском БТР CV 90 массой 28...35 т; на американском БТР M113 и бульдозере Caterpillar 30/30.

По мнению военных специалистов применение РАГ на БТВТ обеспечивает:

- снижение веса машин более чем на 1 т по сравнению с аналогичными стальными гусеницами;
- уменьшение уровня шума на 10 дБ, улучшение звуковой маскировки БТВТ;
- снижение уровня вибрации на 65 %;
- уменьшение утомляемости экипажа и повышение его боеспособности;
- увеличение времени жизни электроники, оптики и систем ведения огня;
- обеспечение движения на дорогах с улучшенным покрытием со скоростью до 110 км/ч без их разрушения;
- снижение стоимости эксплуатации машин за счет снижения расхода топлива до 30 % и расхода запасных частей.

Разработкой ходовых систем с РАГ для БТВТ занимаются фирмы ВАЕ Systems (филиалы в Англии, Швеции) и Soucy International в Квебеке (Канада). Фирмы ВАЕ Systems и Soucy International также активно занимаются разработкой конструкторско-технологических способов повышения долговечности РАГ.

Многолетний опыт создания и использования движителей с РАГ показал, что, благодаря указанным выше преимуществам гусениц этого типа над другими в ближайшей перспективе они найдут широкое применение на транспортных и тяговых машинах различного назначения, в том числе на БТВТ легкой и средней категории по массе.

Отметим, что в ближайшее время различия в конструкциях РАГ и РЛГ будут сведены к минимуму за счет применения новых технологий армирования и материалов.

### Литература

- [1] Кириндас А. *Полугусеничные вездеходы Красной армии*. Москва, ООО «Издательский центр «Экспрент», 2004, 48 с.
- [2] Шарипов В.М. *Конструирование и расчет тракторов*. Москва, Машиностроение, 2009, 752 с.
- [3] Люсова Л.Р., Веселов И.В., Миропольская Н.С. *Обоснование применения материалов для производства резиноармированных гусениц*. Москва, МГАТХТ им. М.В. Ломоносова; ООО «НТЦ «НИИШП», 2010, 128 с.
- [4] Юрцев Л.Н. *Разработка конструкции резиноармированной гусеницы*. Москва, МГАТХТ им. М.В. Ломоносова, 2010, 42 с.
- [5] Щельцын Н.А. *Разработка конструкций и технологических процессов изготовления резинометаллических и пневматических гусениц для сельскохозяйственных тракторов, комбайнов и иных гусеничных машин*. Москва, ОАО «НИИ стали», 2011, 149 с.

УДК 628.1.032

## Экологическая безопасность источников нецентрализованного водоснабжения Мурманска

© Царева Валерия Андреевна, Гапоненков Иван Андреевич,  
Федорова Ольга Анатольевна

Россия, г. Мурманск, Мурманский государственный технический университет

[leurka@rambler.ru](mailto:leurka@rambler.ru)

*В рамках научно-исследовательской работы проведены мониторинговые исследования качества питьевой воды нецентрализованных источников водоснабжения. Результаты исследований по контролируемым показателям были сравнены с нормативами качества для воды нецентрализованных источников водоснабжения. Представлены обобщенные выводы проведенного гидрохимического анализа родниковой воды. По результатам проведенных исследований сделаны выводы о качестве родниковой воды Мурманской области и ее безопасности для населения.*

**Ключевые слова:** мониторинговые исследования, гидрохимический анализ, питьевая вода.

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в настоящее время приблизительно 2,4 млрд человек во всем мире живут в условиях исключительно высокой антисанитарии и имеют настолько плохую гигиеническую практику, что воздействие на них рисков заболеваемости и распространения инфекционных болезней является огромным [1].

В настоящее время в Мурманской области проблема качества питьевой воды довольно актуальна. Многие жители г. Мурманска и области не доверяют качеству водопроводной воды, в основном из-за изношенности трубопроводов водоснабжения, что влечет за собой ухудшение качества воды, поступающей непосредственно к потребителю. И, как следствие этому, родники как источники питьевой воды набирают все большую популярность среди жителей города и области, поэтому во избежание критических ситуаций необходимо контролировать качество воды в них.

Цель научно-исследовательской работы — мониторинговые исследования качества питьевой воды нецентрализованных источников питьевого водоснабжения.

Для достижения поставленной цели была составлена программа мониторинговых исследований, согласно которой отборы проб воды производились 1 раз в месяц, начиная с марта 2014 г., из родников г. Мурманска и его пригорода, г. Североморска, г. Кола, пгт. Мурмаши и близрасположенных поселков [2]. Выбор этих объектов неслучаен, они давно известны населению, находятся в непосредственной близости от жилой застройки и пользуются большой популярностью у жителей.

Исследования проводились по следующим гидрохимическим показателям: нитрат-ионы, нитрит-ионы, фосфат-ионы, и др. [3]. Качество родниковой воды оценивалось путем сравнения полученных данных с нормативами СанПиН 2.1.4.1175-02 «Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованных систем питьевого водоснабжения. Санитарная охрана источников».

Полученные данные о качестве родниковых вод были систематизированы и проанализированы и представлены в виде таблиц и графиков, характеризующих сезонную и годовую динамику изменения показателей качества воды.

В результате обработки и анализа полученных данных о качестве родниковых вод в г. Мурманске и его пригороде можно сделать следующие выводы:

- в целом качество родниковой воды по контролируемым показателям удовлетворительное, за исключением воды в родниках г. Североморска в летнем, осеннем и весеннем периодах (цветность и фосфат-ионы, ПОК), а также в летний и весенний периоды в роднике по дороге в аэропорт «Мурмаши» (нитрат-ионы, фосфат-ионы, рН) и в весеннем и летнем периодах в роднике Причального (фосфат-ионы, нитрат-ионы), в зимний и весенний периоды в роднике в районе Пивзавода (цветность, общее железо, хлорид-ионы);

- качество воды неудовлетворительное за весь контролируемый период в роднике по ул. Кооперативная (нитрит-ионы, хлорид-ионы, сульфат-ионы, общая жесткость), а также по ул. Капитана Маклакова (рН, цветность);

- качество воды во всех исследуемых родниках в весенний и летний периоды ухудшается, а в осенний и зимний — улучшается, что может быть связано с инфильтрационной природой подземных вод;

- для получения более полной картины о качестве воды в родниках необходимо продолжить наблюдение на протяжении нескольких лет для подтверждения или опровержения полученных результатов.

Результаты исследования характеризуют воду большинства родников как пригодную для питьевого водоснабжения, но существует необходимость проведения постоянного контроля их качества.

Постоянные мониторинговые исследования родниковых вод необходимы для обеспечения безопасности населения, использующего родники в качестве источников питьевой воды.

### **Литература**

- [1] *Развитие водоснабжения, санитарии и гигиены*: ВОЗ, 2014. URL: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/hygiene/ru/](http://www.who.int/water_sanitation_health/hygiene/ru/) (дата обращения 13.04.2015).
- [2] Гагарина О.В., сост. *Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы*. Ижевск, Удмуртский ун-т, 2012, 199 с.
- [3] Ананьев В.Н. *Родники Мурманской области: справочник*. Мурманск, Книжное изд-во, 2010, 88 с.

УДК 621.365.5

## Исследование нагрева локализатора с переменной толщиной стенок с учетом естественной конвекции

© Баскаков Павел Александрович, Кувалдин Александр Борисович

Россия, г. Москва, Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»

[pawel\\_baskakow@mail.ru](mailto:pawel_baskakow@mail.ru)

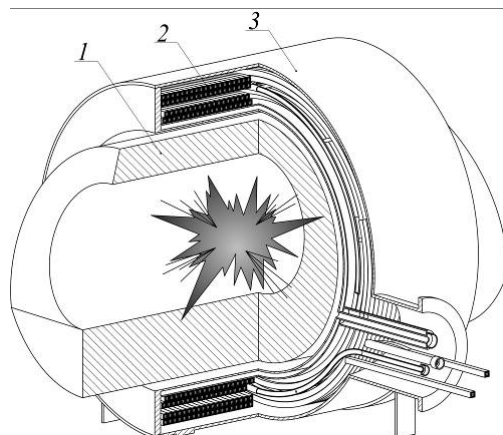
*Рассмотрены вопросы моделирования нагрева локализатора с переменной толщиной стенок с учетом конвективного теплообмена при естественном движении воздуха. Необходимость моделирования естественной конвекции обусловлена наличием обмотки, препятствующей движению воздуха, и сильным влиянием краевых эффектов. Исследовано влияние конструктивных параметров нагревателя на равномерность нагрева локализатора с экспериментальным подтверждением результатов.*

**Ключевые слова:** *индукционно-резистивный нагреватель, уничтожение боеприпасов, локализатор, естественная конвекция, коэффициент теплоотдачи.*

Одной из важных проблем является уничтожение мелкокалиберных боеприпасов, содержащих до 0,7 кг взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте. Сложность их уничтожения обусловлена широкой номенклатурой типов и размеров уничтожаемых боеприпасов. Наиболее экономичным и экологически безопасным методом их уничтожения является подрыв внутри герметичной камеры с последующей очисткой образовавшихся продуктов взрыва. Учитывая огромное количество боеприпасов, процесс их уничтожения должен быть максимально автоматизирован.

Для решения данной проблемы разработан индукционно-резистивный нагреватель (ИРН) (рис. 1), в котором подрыв боеприпаса осуществляется при его нагреве внутри локализатора (1), нагреваемого вихревыми токами, создаваемыми многослойной обмоткой (2), размещенной в защитном кожухе (3) [1].

Основное назначение локализатора — защита обмотки от поражающих факторов взрыва, к которым относятся ударная и детонационные волны, высокоскоростные осколки. Для этого он выполнен из жаропрочной ферромагнитной стали.



**Рис. 1.** Общий вид ИРН для уничтожения боеприпасов многослойной обмоткой

Прочностные расчеты показали, что наибольшие деформации при взрыве возникают в месте под боеприпасом. Для увеличения ресурса работы локализатор выполнен с переменной толщиной стенок, наибольшей в месте размещения боеприпаса (120 мм) и наименьшей в верхней части (60 мм) [2].

Для обмотки используется жаростойкий кабель с минеральной изоляцией и защитной оболочкой из коррозионно-стойкой стали, его выбор обусловлен высокой механической прочностью и стойкостью к агрессивным продуктам взрыва. Особенностью многослойной обмотки из данного кабеля является то, что локализатор одновременно нагревается индукционным полем и резистивным теплом, выделяющимся в оболочке кабеля.

Расчеты кинетики разложения взрывчатого вещества внутри боеприпаса при нагреве показали [3], что для уничтожения боеприпаса за время 5...6 мин, температура локализатора должна быть  $T_{\text{лок}} = 450 \pm 20$  °С, при этом для полного уничтожения боеприпасов с несколькими разрывными зарядами перепад температуры по длине локализатора не должен превышать  $\Delta = 40$  °С.

Как показали исследования [4], для нагрева массивного локализатора длиной  $L = 700$  мм, наружным  $D_{\text{нар}} = 430$  мм и внутренним  $D_{\text{вн}} = 250$  мм диаметрами и массой 500 кг лучше всего подходит многослойная обмотка с четырьмя слоями и питанием от промышленной сети частотой 50 Гц. При ширине индуктора  $0,6L$ , зазоре между локализатором и обмоткой 30 мм ИРН имеет электрический КПД 0,45 и  $\cos \varphi = 0,76$ .

Основная цель исследования — определение времени нагрева и перепада температуры по длине локализатора с переменной толщиной стенок при его нагреве индукционным полем и резистивным теплом, выделяющимся в оболочке кабеля.

Решение поставленной задачи осуществлялось моделированием сопряженной электромагнитной и тепловой задач в программном пакете ANSYS. В настоящей статье приведены результаты моделирования тепловой задачи с учетом естественной конвекции. Необходимость моделирования естественной конвекции в ANSYS CFX обусловлена ограничениями эмпирического подхода при определении коэффициента теплоотдачи, основанного на решении критериальных уравнений, а также влияния краевых эффектов ИРН на движение воздуха.

Из-за смещенного отверстия в локализаторе моделирование тепловой и газодинамической задач осуществлялось в трехмерной постановке, при этом расчетная область (рис. 2) представляла собой 1/4 часть нагревателя с заданием на отсеченных плоскостях симметрии  $XY$ ,  $YZ$  условий симметрии. Размеры расчетной области  $A \times B \times C$  выбирались из условия отсутствия их влияния на свободное движение воздуха и нагрев локализатора.

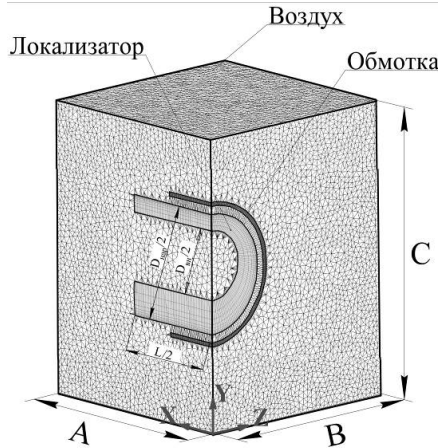


Рис. 2. Расчетная область модели

В тепловой модели приняты: граничное условие 1-го рода — начальная температура элементов модели, равная  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2-го рода — условие равенства производной температуры по нормали к плоскостям симметрии, 3-го рода — коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи на наружных поверхностях локализатора. Лучистый теплообмен учитывался заданием степени черноты  $\varepsilon = 0,93$ , а конвективный теплообмен — заданием коэффициента теплоотдачи как функции температуры  $\alpha = f(T)$ , полученной при решении газодинамической задачи естественной конвекции.

В газодинамической задаче на всех поверхностях локализатора задавалось «условие прилипания», равенство нулю скорости воздуха. В модели не учитывалась сжимаемость воздуха, поскольку при скоростях менее  $50\text{ м/с}$  данный параметр вносит несущественную погрешность.

Теплофизические свойства локализатора и воздуха задавались как функции температуры, полученные аппроксимацией справочных данных. В качестве допущения в моделях не учитывалось влияние защитного кожуха на теплообменные процессы.

Тепловая задача решалась для нестационарного и стационарного режимов работы, газодинамическая — только для стационарного.

Анализ распределения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , полученного при решении газодинамической задачи (рис. 3), выявил, что в локализаторе можно выделить четыре области с одинаковыми условиями теплоотдачи: внутренняя поверхность (4), торцы (3), центральная часть (1), охваченная индуктором, и края (2).

С использованием тепловой модели исследовалось влияние ширины обмотки  $H_{\text{ин}}$  (рис. 4, а), зазора между локализатором и обмоткой  $\delta$  (рис. 4, б) и тока  $I$  (рис. 4, в) на равномерность температурного поля по длине локализатора.

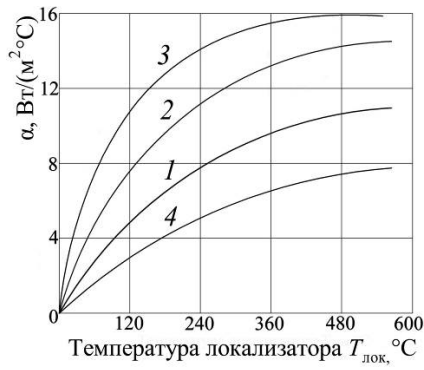
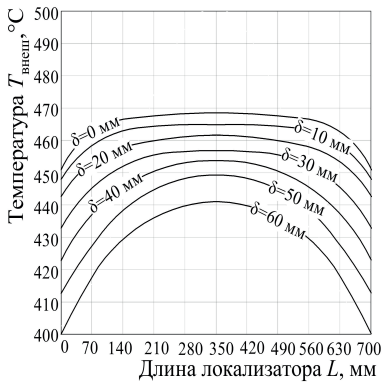
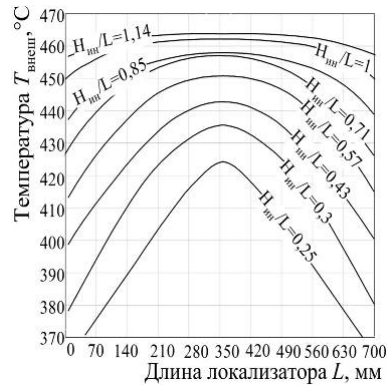


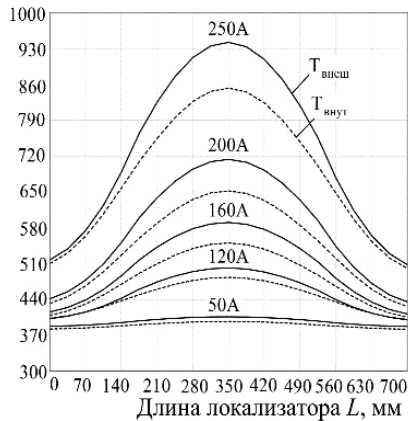
Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи в разных частях локализатора от температуры



а



б



в

Рис. 4. Зависимость распределения температуры по длине локализатора от ширины индуктора (а), зазора между локализатором и обмоткой (б), тока в обмотке (в)



Исследования показали, что с увеличением  $\delta$  происходит возрастание неравномерности температуры по длине локализатора. Аналогичный эффект наблюдается при уменьшении ширины обмотки. Для достижения требуемого перепада температуры  $40\text{ }^\circ\text{C}$  зазор должен составлять  $\delta = 30\dots 40\text{ мм}$ , соотношение ширины индуктора и длины локализатора  $H_{\text{ин}}/L = 0,4\dots 0,5$ , ток  $I = 110\text{ А}$ .

Анализ температурного поля в локализаторе с переменной толщиной стенки  $s$ , показали, что с увеличением толщины стенки температура по длине выравнивается (рис. 5, а), а время нагрева до рабочей температуры увеличивается (рис. 5, б).

Для оценки адекватности разработанной модели и полученных результатов проведены экспериментальные работы на испытательном стенде, который включает опытный образец ИРН, систему охлаждения обмотки и систему регистрации электрических параметров. Распределение температуры по длине локализатора оценивалось вручную при помощи тепловизора FLIR T250 и инфракрасного пирометра Fluke-66. Измерение проводилось на внутренне поверхности локализатора в точках, соответствующих толщинах стенки  $T_1 = 120$ ,  $T_2 = 100$  и  $T_3 = 60\text{ мм}$ .

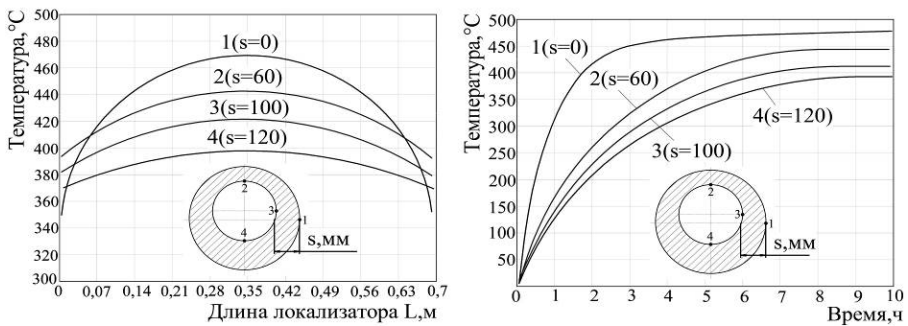


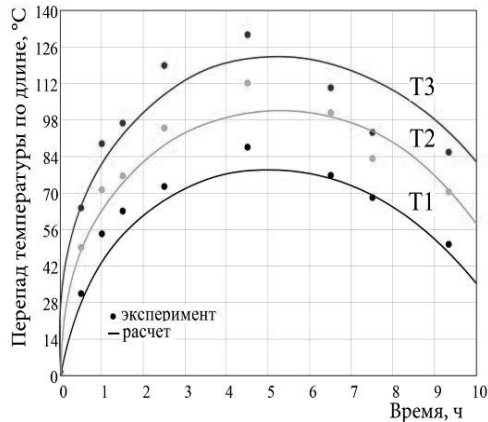
Рис. 5. Распределение температуры по длине (а), динамика нагрева (б) локализатора в разных сечениях

На рис. 6 видно, что вначале перепад температуры по длине локализатора возрастает, затем после 5 ч нагрева температура по длине локализатора выравнивается. Данный эффект объясняется тем, что вначале происходит ступенчатый нагрев локализатора из-за ограничения температуры обмотки. Затем температура локализатора достигает  $500\text{ }^\circ\text{C}$  и поддерживается на данном уровне, при этом наблюдается уменьшение перепада с выравниванием температуры в средней части локализатора.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных перепада температуры по длине локализатора подтверждает адекватность разработанной тепловой модели.

Сопоставление интегральных параметров ИРН, таких как мощность, ток напряжение,  $\cos \phi$  и т. д., полученных на опытном образце, с параметрами моделирования подтверждает высокую точность численного расчета, погрешность которого не превышает 10 %.

В результате исследования определены тепловые параметры ИРН, обеспечивающие полное и гарантированное уничтожение боеприпасов. Проведены экспериментальные работы по оценке перепада температуры по длине локализатора в процессе его нагрева.



**Рис. 6.** Изменение перепада температуры по длине локализатора при его нагреве

Полученные данные могут быть использованы при проектировании ИРН для уничтожения боеприпасов, а также для получения регрессионных уравнений при построении и анализе системы регулирования температуры ИРН.

### Литература

- [1] Баскаков П.А. Создание индукционного нагревателя для уничтожения малогабаритных боеприпасов. *Итоги диссертационных исследований. Т. 2. Матер. VI Всерос. конк. молодых ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева*. Москва, РАН, 2014, с. 56–62.
- [2] Баскаков П.А. Моделирование взрывного нагружения индукционного нагревателя для уничтожения боеприпасов. *Тр. XV Всерос. науч.-техн. конф. «Наука. Промышленность. Оборона»*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2014, с. 65–69.
- [3] Баскаков П.А. Исследование режимов нагрева боеприпаса, обеспечивающих его полное уничтожение. *Тр. XV Всерос. науч.-техн. конф. «Наука. Промышленность. Оборона»*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2014, с. 61–65.
- [4] Баскаков П.А., Кувалдин А.Б., Затрубщиков Н.Б. Разработка и исследование индукционно-резистивного нагревателя. *Вестник МЭИ*, 2014, № 4, с. 41–48.

УДК 62-752.2

## Адаптивный регулятор продольных колебаний низа бурильной колонны

© Башмур Кирилл Александрович, Терамес Кирилл Сергеевич,  
Петровский Эдуард Аркадьевич

Россия, г. Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа

[bashmur@bk.ru](mailto:bashmur@bk.ru)

*В процессе бурения возникают интенсивные по амплитуде колебательные процессы. Рассмотрены причины их возникновения. Установлено, что существующие устройства, использующиеся для снижения уровня вибраций бурильной колонны, имеют низкую надежность и небольшой срок службы. Разработана конструкция адаптивного регулятора низа бурильной колонны, основанная на ударно-импульсном методе гашения вибраций. Описан принцип действия регулятора.*

**Ключевые слова:** бурильная колонна, долото, снижение вибраций, адаптивный регулятор.

В процессе бурения на колонну воздействуют различные по величине и характеру возмущающие силы и силы сопротивления, что вызывает ее интенсивные колебания. От них зависят технико-экономические показатели бурения, долговечность, надежность и условия работы долота, компоновки низа бурильной колонны (КНБК) [1].

Одними из наиболее энергоемких являются продольные колебания, обусловленные ухабиистостью забоя, перекачиванием шарошек долота, неоднородностью разбуриваемой породы, неравномерной подачей бурового инструмента и др. [2, 3]. Среди них выделяют «грунтовые» низкочастотные высокоамплитудные колебания долота — наиболее энергоемкие из возникающих в системе «забой — долото — колонна». «Грунтовые» колебания могут стать следствием потери 2/3 мощности на валу забойного двигателя, что приводит к существенному снижению мощности, направленной непосредственно на разрушение забоя [3]. Этот вид колебаний является доминирующей причиной большинства аварий с элементами бурильной колонны и интенсивной отработки опор шарошечных долот при бурении в твердых и крепких породах. В этой связи актуальной становится задача защиты бурильной колонны от вибрационных и ударных воздействий.

Для борьбы с продольными колебаниями колонны предложены многочисленные конструкции виброгасителей [4, 5]. Однако при всем многообразии данных устройств в их конструкции неизменно присутствует упругий элемент, что отрицательно сказывается на их сроке службы и надежности, вследствие тяжелых условий нагружения [6]. Эффективными и компактными являются виброгасители ударного действия. Благодаря простоте конструкции, надежности в эксплуатации и достаточно высокой эффективности, они нашли широкое применение в технике для гашения вибраций.

На основе сказанного выше была разработана конструкция ударного адаптивного регулятора, изображенная на рис. 1 [7].

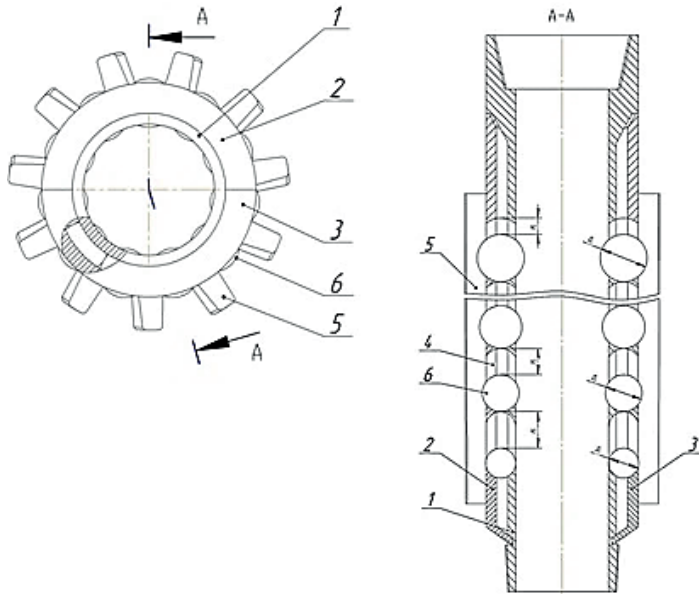


Рис. 1. Виброгаситель-калибратор

Адаптивный регулятор устанавливается над долотом. В его состав входят: перфорированный в продольном и окружном направлениях корпус *1* с призматическими продольными пазами на наружной поверхности, калибрующая втулка из двух симметричных половин *2, 3* с ответными пазами на внутренней поверхности, с наружной стороны которых, между пазами, запаяны твердосплавные ребра *4*. Пазы образуют обойму *5*, в которую установлены стальные шары *6*, причем диаметр шаров увеличивается  $D_1 < D_2 < \dots < D_n$ , а расстояние до следующего шара уменьшается  $H_1 > H_2 > \dots > H_n$  в продольном направлении виброгасителя снизу вверх. Количество шаров *n* зависит от интенсивности вибраций.

Возникающие продольные вибрации от долота воспринимает корпус *1* с втулкой *2*, образующих обойму *5*, в котором происходит гашение колебаний за счет диссипативных сил металлических шаров *6*. Эти шары обеспечивают импульсное гашение колебаний в продольном направлении в фазе от шара к шару, обеспеченной за счет разности диаметров  $D_n$ , а следовательно, масс шаров *6* и разницы в зазорах  $H_n$ . Это способствует гашению силы тяжести, и передачи части энергии калибрующей втулке *2* с твердосплавными ребрами *4* на формирование стенки ствола скважины посредством поперечных колебаний шаров *6*. Шары находятся в буровом растворе, что увеличивает логарифмический декремент затухания колебаний при импульсном гашении колебаний, диссипацию энергии колебаний за счет жидкостного трения шаров *6*, а также их сглаженное возвращение в исходное положение.

Применение адаптивного регулятора должно способствовать повышению стойкости долота, элементов бурильной колонны, обеспечению заданного режима бурения, увеличению проходки за рейс и повышению эффективности буровых работ в целом.

## Литература

- [1] Sowers S.F., Dupriest F.E. Устранение колебаний бурового долота и компоновки низа буровой колонны. *Нефтегазовые технологии*, 2009, № 11, с. 24.
- [2] Шлык Ю.К., Мавлютов М.Р., Санников Р.Х. *Механико-гидравлический канал связи с забоем при турбинном бурении скважин*. Тюмень, Вектор Бук, 1999, 200 с.
- [3] Янтурин Р.А. Об основных видах продольных, крутильных и поперечных колебаний буровой колонны. *Техника и технология бурения*, 2008, № 1, с. 6–7.
- [4] Ботко П.И., Ненков Н.Д., Стоянов Д.И. *Забойный амортизатор*. А.с. 1819975 СССР, МКИ E21B 17/07. № 7774441/03; заявл. 23.02.1987; опубл. 07.06.1993; бюл. № 21, 3 с.
- [5] Ахунов С.М., Ямалтдинов А.И., Султанов Б.З. *Виброгаситель-калибратор*. А.с. 832033 СССР, МКИ E 21 В 17/06. опубл.23.07.1981, № 2691607/22-03, заявл. 04.12.78; опубл. 25.05.81; бюл. № 19, 3 с.
- [6] Бармин Б.П. *Вибрации и режимы резания*. Москва, Машиностроение, 1972, 72 с.
- [7] Башмур К.А., Петровский Э.А. *Виброгаситель-калибратор*. Пат. 2533793 Российская Федерация, МПК E21B 17/07 (2006.01) E21B 17/10 (2006.01). № 2013138759/03; заявл. 20.08.2013; опубл. 20.11.2014; бюл. № 32, 3 с.

УДК 621.77

## Особенности напряженно-деформированного состояния тонкостенных волноводов при пластическом изгибе

© Гоцелюк Ольга Борисовна, Кудрявцев Илья Владимирович

Россия, Красноярский край, г. Железногорск, Сибирский федеральный университет

[gotseluk\\_ob@mail.ru](mailto:gotseluk_ob@mail.ru)

*Рассмотрена проблема изготовления криволинейных участков волноводов с уменьшенной толщиной стенки и малыми радиусами изгиба путем пластического изгиба его прямых участков. Исследование напряженно-деформированного состояния волноводов при пластическом изгибе показало, что наиболее критичными зонами, ограничивающими возможностигиба, являются наружная и внутренняя его стенки. На основе выполненных расчетов составлены рекомендации в технологиюгиба.*

**Ключевые слова:** волновод, пластический изгиб, напряженно-деформированное состояние, стенка, система дифференциальных уравнений, упрочнение.

В составе практически любой конструкции волноводно-распределительной системы (ВРС) содержатся криволинейные участки волноводов, которые изготавливаются путем пластического изгиба прямых элементов на трубогибочных станках [1].

Рассмотрим процесс гибки (рис. 1, а) прямого волновода одним из наиболее распространенных способов — намоткой заготовки на вращающийся копир с применением оснастки: гибочной головки, переднего и заднего прижимов, складкодержателя (дорна). Если выполнять пластический гиб прямого тонкостенного элемента без принятия специальных мер по предотвращению нежелательных деформаций, то поперечное сечение в областигиба будет последовательно принимать формы 1–4, показанные на рис. 1, б [2].

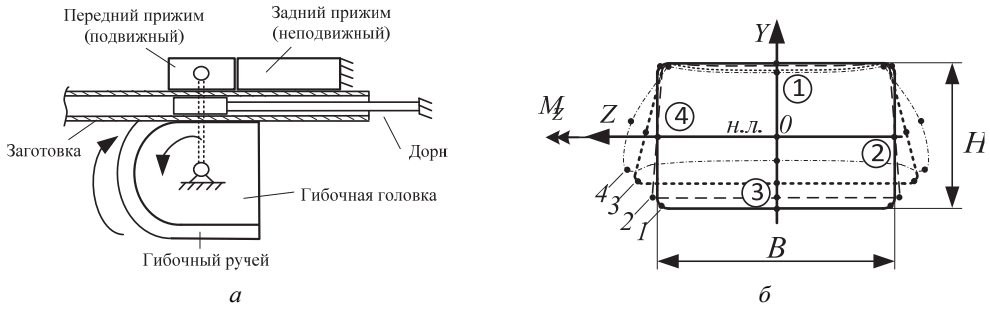


Рис. 1. Схема процесса гибки на станке (а) и изменение формы поперечного сечения волновода (б)

При изгибе волноводов неосесимметричного поперечного сечения, особенно с малой толщиной стенки, возникает ряд проблем, усложняющих этот процесс: недопустимое утонение, трещины и разрывы стенок, потеря устойчивости боковых стенок заготовки и др., что приводит к искажению исходной формы поперечного сечения и ухудшению радиотехнических параметров волноводов. Поэтому для получения качественного изделия, необходимо теоретически исследовать напряженно-деформированное состояние (НДС) тонкостенных элементов волноводов при пластическом гнбе с учетом всех особенностей условий закрепления и нагружения.

Для ограничения искажения профиля и размеров поперечного сечения при гнбе в заготовку перед гнбом вводят дорн либо наполнитель соответствующих размеров, а для предотвращения выпучивания стенок поперечного сечения наружу в гибочном станке предусмотрен гибочный ручей в виде специальных пазов и направляющих. В результате комплекса подобных мер форма и размеры поперечного сечения в процессе гнба в основном сохраняют исходную геометрию. Вместе с тем остается проблема недопустимого утонения наружной стенки и образования гофр на внутренней стенке.

Литературный обзор по этой тематике показал [1], что данное направление исследований изучено в основном с экспериментальной стороны, теоретическая же составляющая изучена недостаточно подробно и содержит много неточностей.

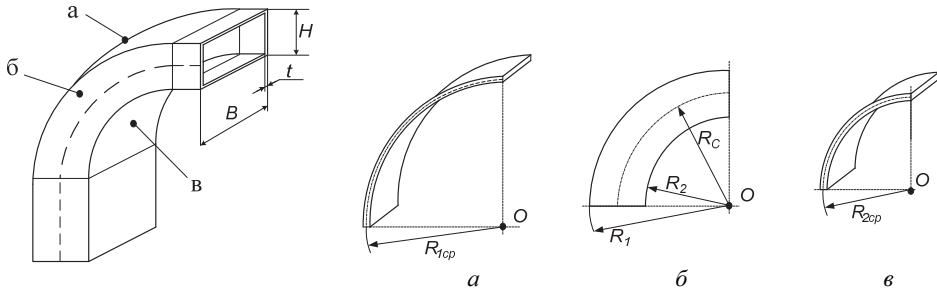
Например, в работе [3] НДС наружной и внутренней стенок волновода оценено только по схеме чистого изгиба широкого листа (такая же ошибка повторена и в [4]).

Анализ поведения тонкостенного элемента заготовки при гнбе показывает, что каждая пластинка, составляющая его сечение, находится в разных условиях нагружения, поэтому рассмотрим их НДС по отдельности (рис. 2). В этом случае система нелинейных дифференциальных уравнений состояния волновода, учитывающая взаимовлияние всех компонентов НДС, имеет следующий вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^4 \varphi_i &= Eh \left[ \left( \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i^2} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \beta_i^2} \right]; \\ \nabla^4 \omega_i &= \frac{1}{D} \left[ \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \beta_i^2} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i^2} - 2 \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \alpha_i \partial \beta_i} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial \alpha_i^2} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \beta_i^2} - q_{\alpha i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \alpha_i} - q_{\beta i} \frac{\partial \omega_i}{\partial \beta_i} + q_{z i} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial \alpha_i^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial \alpha_i^2 \partial \beta_i^2} + \frac{\partial^4}{\partial \beta_i^4}$ .

Решение данной системы показывает, что внешняя стенка (рис. 2, а) при гibe заготовки подвергается внецентренному растяжению, которое является сочетанием центрального растяжения и изгиба. Согласно расчетам в зависимости от плоскости изгиба растягивающие напряжения по отношению к изгибным компонентам будут в отношении  $B/t$ , либо  $H/t$ , т. е. на порядок больше. Следовательно, нейтральная поверхность при изгибе этих пластинок будет находиться за пределами их геометрии.



**Рис. 2.** Основные составляющие тонкостенного элемента  
 а — внешняя стенка; б — боковая стенка; в — внутренняя стенка

Внутренняя стенка (рис. 2, б) в процессе гibe подвергается внецентренному сжатию, которое является сочетанием центрального сжатия и изгиба, причем сжимающие напряжения также на порядок превышают изгибные компоненты.

Боковые стенки (рис. 2, в) волновода подвергаются изгибу в своей плоскости. При этом в пластической области остается справедливой гипотеза плоских сечений.

Напряжения в пластинках при пластическом гibe будут изменяться согласно закону упрочнения материала волновода. В работе [5] показано, что текущее значение предела текучести алюминиевых сплавов, используемых при изготовлении волновода, с учетом упрочнения описывается уравнением Холомона

$$\sigma_S = \sigma_{S1} \epsilon^k, \tag{2}$$

где  $\sigma_{S1}$  и  $k$  — постоянные для данного материала.

Распределение напряжений по объему прямого элемента при гibe представлено на рис. 3. Расчеты показывают, что изгибные компоненты напряжений по толщине наружной 1 и внутренней 3 пластинок изменяют полное напряжение в них не более чем на 1 %, т. е. практически постоянны, и ими можно пренебречь.

Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки при гibe показывает, что наиболее критичным фактором, ограничивающим величину минимального радиуса изгиба снизу, является значение предельной деформации материала волновода  $\epsilon_{\max}^P$ , а также утонение наружной стенки.

При изгибе волновода максимальные растягивающие деформации расположены на внешней поверхности наружной пластинки и равны:

$$\epsilon_{\max}^P = \ln \left( \frac{R_1}{R_C} \right) = \ln \left( \frac{H(n+1)}{H(n+0,5)} \right) = \ln \left( \frac{n+1}{n+0,5} \right), \tag{3}$$

где  $n$  — коэффициент, определяющий относительный радиус гibe,  $n = R_2/H$  (см. рис. 2).

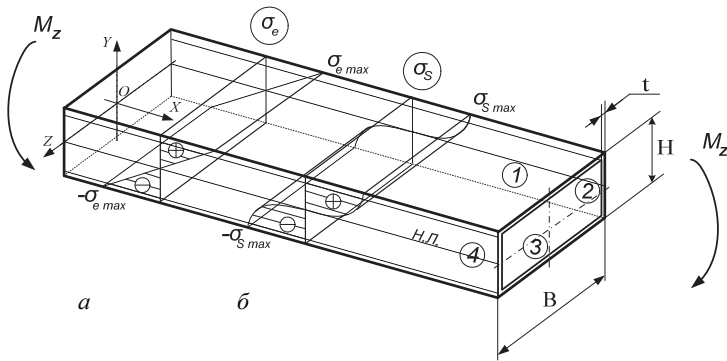


Рис. 3. Распределение напряжений по объему прямого элемента при гйбе: *a* — упругая стадия; *б* — пластическое нагружение

Полученное выражение позволяет в первом приближении оценивать максимальную растягивающую деформацию наружной стенки волновода при его свободном деформировании, а также решать обратную задачу — по известной предельной деформации материала оценить минимальный радиус изгиба:

$$n = \frac{e^{-\varepsilon_{\max}} - 0,5}{1 - e^{-\varepsilon_{\max}}} = \frac{1 - 0,5e^{\varepsilon_{\max}}}{e^{\varepsilon_{\max}} - 1}. \quad (4)$$

Например, для предельной деформации 25 %  $n = 1,26$ , т. е. минимально допустимый относительный радиус гйба будет равен  $R_{2 \min} = 1,26 H$ .

Утонение материала на наружной стенке *1* волновода можно оценить по действующим в ней напряжениям  $\sigma_{\alpha 1}$  через обобщенный закон Гука:

$$\varepsilon_{z1} = -\frac{\sigma_{\alpha 1}}{E} \mu. \quad (5)$$

Полученное значение для минимального радиуса гйба и утонения наружной стенки определяется только предельными, не стесненными деформациями материала и в зависимости от условий нагружения данное значение будет изменяться. Так, при использовании наполнителя или дорна (см. рис. 1, *a*) наблюдается ограничение свободного деформирования пластинок *1* и *3* в поперечном направлении, что обуславливает появление поперечных растягивающих нормальных напряжений и, соответственно, их двусосному НДС. В этом случае утонение наружной пластинки *1* будет происходить в результате совместного действия продольных  $\sigma_{\alpha 1}$  и поперечных напряжений  $\sigma_{\beta 1}$ :

$$\sigma_{\beta 1} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\mu \varepsilon_{\alpha 1} + \varepsilon_{\beta 1}) = \frac{E}{1 - \mu^2} \mu \varepsilon_{\alpha 1} = \frac{\mu}{1 - \mu^2} \sigma_{\alpha 1}. \quad (6)$$

В этом случае поперечная деформация (утонение стенки)

$$\varepsilon_{z1} = \frac{1}{E} \left( -\mu \sigma_{\alpha 1} - \frac{\mu^2}{1 - \mu^2} \sigma_{\alpha 1} \right) = -\frac{\sigma_{\alpha 1}}{E} \mu \left( 1 + \frac{\mu}{1 - \mu^2} \right) = -\varepsilon_{\alpha 1} \mu \left( 1 + \frac{\mu}{1 - \mu^2} \right). \quad (7)$$



Сравнение (5) и (7) показывает, что в случае применения наполнителя будет происходить более интенсивное, в  $k = \mu \left( 1 + \frac{\mu}{1 - \mu^2} \right)$  раз, утонение стенки 1 прямого

элемента из-за ее двустороннего растяжения, чем без наполнителя. В зависимости от значения коэффициента Пуассона,  $k = 0,24 \dots 0,48$ . В наиболее распространенном случае  $\mu = 0,3$ , отсюда  $k \approx 0,4$ , что подтверждается практикой: так, в [1] отмечено, что при гибке с оправкой утонение наружной стенки на 20...50 % больше чем без нее.

Двустороннее растяжение кроме большего утонения приводит к значительно бóльшим (в 5–6 раз) величинам концентраций напряжений в местах различных неоднородностей структуры материала растягиваемой стенки, микротрещинам и неровностям ее поверхности и др. В результате при гибке волновода микро- и макротрещины начинают появляться именно на наружной стенке, приводя к разрыву.

Возможными способами повышения пластических свойств материала наружной пластинки 1 при гибке по схеме, приведенной на рис. 1, а, является полировка ее стенок для уменьшения микронеровностей поверхностей, а также нагрев. При этом локальный нагрев лишь незначительно улучшает пластические свойства материала, по данным [1] всего на 10 %. Повысить пластичность также можно путем добавления сжимающих осевых усилий на заготовку, либо используя гидростатическую формовку, что, однако, приводит к существенному удорожанию технологии.

Более перспективным направлением является создание особых режимов сверхпластичности материала, при которых предельная деформация может достигать 500 % и более, однако это направление требует дополнительных исследований [6].

### Литература

- [1] Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. *Технология холодной штамповки*. Москва, Машиностроение, 1989, 304 с.
- [2] Kerman D. Bending collapse of rectangular and square section tubes. *Int J Mech Sci*, 1983, vol. 25 (9/10). pp. 623–636.
- [3] Siao Siaotin. Improvement of the technology of bending of pipes of rectangular section pushing. Dis. ... kand. techn. nauk. Moscow, 2004, 178 p.
- [4] Zverintseva L.V., Kvytkovskiy I.U., Zverintsev V.V. Flexible waveguide pipes of rectangular section with variable radius. *Reshetniov's read*, 2013, pp. 415–417.
- [5] Кроха В.А., Ерманок М.З. О выполнении степенного закона упрочнения для алюминия и его сплавов. *Металлы*, 1991, № 1, с. 149–152.
- [6] Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. *Сверхпластичность: материалы, теория, технологии*. Москва, Комкнига, 2005, 320 с.

УДК 614.84

## Обоснование необходимости создания аварийно-спасательного автомобиля в климатическом исполнении ХЛ

© Гусев Иван Александрович, Ольховский Иван Александрович,  
Плосконосов Александр Владимирович, Двоенко Олег Викторович,  
Алешков Михаил Владимирович

Россия, г. Москва, Академия государственной противопожарной службы  
МЧС России

[ivan.gusev.92@inbox.ru](mailto:ivan.gusev.92@inbox.ru)

*Рассмотрено проведение аварийно-спасательных работ с применением специального инструмента и техники в условиях низких температур. Низкая температура — одна из главных причин развития чрезвычайных ситуаций до крупных масштабов. Наиболее сложная оперативная обстановка в зимний период во многом объясняется отсутствием на вооружении подразделений МЧС России аварийно-спасательной техники в «северном» исполнении, приспособленной для эксплуатации в условиях низких температур.*

**Ключевые слова:** *аварийно-спасательный автомобиль, низкие температуры, Арктика, эксплуатация техники на Севере.*

Одна из задач МЧС России — выполнение спасательных и неотложных аварийно-восстановительных работ при чрезвычайных ситуациях (ЧС) различного характера.

Аварийно-спасательные и другие неотложные работы (АСДНР) производятся для спасения пострадавших, ликвидации последствий ЧС, локализации и тушения пожаров, снижения ущерба и вторичных факторов ЧС.

В современных условиях участвующих ЧС природного и техногенного характера возрастают масштабы последствий, увеличивается продолжительность и объем АСДНР. Успешное выполнение больших и трудоемких АСДНР во многом зависит от оснащенности подразделений МЧС современными средствами механизации и подготовки личного состава основным приемам и способам ведения работ.

Разнообразные климатические условия на территории России определяют условия и специфику деятельности аварийно-спасательных подразделений и эксплуатацию аварийно-спасательных машин. Аварийно-спасательная техника используется в самых разнообразных, зачастую сложных дорожных и климатических условиях. Особыми считаются условия эксплуатации машин в районах с особо низкой температурой воздуха, в горных районах, а также в распутицу и бездорожье.

Низкая температура окружающего воздуха затрудняет пуск двигателя, оказывает отрицательное влияние на работу всех его систем и поддержание нормального теплового режима, а также приводит к увеличению вязкости электролита аккумуляторных батарей, снижению их емкости и способствует быстрому разряду батарей при пользовании стартером. Повышенная вязкость масла при низких температурах воздуха вызывает резкое увеличение сопротивления вращению коленчатого вала, что затрудняет достижение требуемой для пуска двигателя частоты вращения коленчатого вала.

Особого внимания в зимний период требует система охлаждения, поскольку существует опасность размораживания блока цилиндров и радиатора при использовании воды в качестве охлаждающей жидкости. Установлено, что при температуре охлаждающей жидкости +55 °С степень износа деталей двигателя увеличивается в 4 раза, при +40 °С — в 12 раз, при +30 °С — в 20 раз по сравнению со степенью износа, происходящей при нормальном тепловом режиме работы (85...90 °С).

При эксплуатации аварийно-спасательных автомобилей в зимний период предъявляются повышенные требования к качеству трансмиссионных масел. Понижение температуры окружающего воздуха способствует повышению вязкости трансмиссионного масла, что обуславливает значительное увеличение потерь на трение в агрегатах и механизмах трансмиссии и ходовой части аварийно-спасательной техники.

При работе автомобиля в зимний период необходимо учитывать отрицательное влияние низких температур на металлы, резину и другие материалы, так как они становятся более хрупкими и не переносят ударные нагрузки, а лакокрасочные покрытия теряют механическую прочность, растрескиваются и отслаиваются.

Большой объем работ в очагах аварий невозможно выполнить в короткие сроки без применения различной аварийно-спасательной техники. Только широкая механизация всех видов работ позволит своевременно осуществить спасение пострадавших и выполнение неотложных аварийно-восстановительных работ.

Низкие температуры также являются одной из главных причин развития чрезвычайных ситуаций до крупных размеров. Наиболее сложная обстановка при ликвидации ЧС складывается в зимний период года, во многом объясняется отсутствием на вооружении гарнизонов аварийно-спасательной техники в «северном» исполнении, приспособленной для эксплуатации в условиях низких температур.

Разработка и создание аварийно-спасательной техники в «северном» исполнении в настоящее время особо актуальны в связи с интенсивным освоением районов Арктической зоны России. В соответствии с Основами государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу, утвержденными Президентом Российской Федерации 18 сентября 2008 г. № Пр-1969, предусмотрено социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации, а также модернизация и развитие инфраструктуры, что повлечет строительство новых объектов различного назначения в зонах экстремально низких температур (включая Арктическую зону).

Быстрое развитие Арктической зоны Российской Федерации требует разработки и внедрения новых форм и способов ликвидации ЧС с учетом местных климатических особенностей. Это создает необходимость совершенствования государственной системы предупреждения ЧС. Климатические особенности Арктической зоны самым существенным образом сказываются на реализации потенциальных свойств аварийно-спасательных автомобилей и входящего в их комплектацию оборудования.

Как показало время и опыт использования аварийно-спасательной техники в МЧС, за прошедшее 10-летие на вооружении имеются образцы спасательных и специальных технических средств, эксплуатация которых подтвердила высокую оценку российской техники в России и за рубежом. Однако эта аварийно-спасательная техника рассчитана по условиям работы на районы умеренного климата с годовым перепадом температур в пределах от +35...–40 °С. Кроме того, аварийно-спасательные автомобили отличаются от остальных своим функциональным назначением, что сказывается на особенностях их конструкции и условиях эксплуатации. Поэтому выполнение задач в сложившейся ЧС не должно зависеть от окружающей температуры.

Следует отметить, что на сегодняшний день создано несколько образцов инновационной пожарной техники в «северном» исполнении. Это пожарная автоцистерна АЦ-С-8,0-70 (6339) и пожарно-спасательный автомобиль ПСА-С-6,0-40 (6339). При создании этой техники была реализована концепция «северного» пожарного автомобиля, которая позволила обеспечить работоспособность автомобилей при температуре до  $-60$  °С. Однако эта техника не позволяет решать весь спектр аварийно-спасательных работ, которые могут возникать при ЧС в условиях низких температур.

В настоящее время выполнен анализ существующих образцов базовых шасси, приспособленных для работы в условиях низких температур. Наиболее перспективными являются шасси отечественного производства с повышенной проходимостью марок УРАЛ, КАМАЗ, ИВЕКО. Доработка подобных шасси и поиск технических решений позволит приблизить температуру их эксплуатации к  $-60$  °С., и на их базе изготовить современный аварийно-спасательный автомобиль в климатическом исполнении ХЛ.

Таким образом, качественное переоснащение сил МЧС России новыми, высокоэффективными аварийно-спасательными автомобилями, способными обеспечить проведение аварийно-спасательных работ в условиях низких температур в настоящее время является одной из основных задач обеспечения безопасности объектов расположенных и строящихся в Арктической зоне России.

### Литература

- [1] Алешков М.В. Результаты исследования защищенности критически важных объектов энергетики от крупных пожаров при экстремальных природно-климатических условиях. *Науч.-техн. сб. соискателей, докторантов и адъюнктов академии ГПС МЧС России*, 2013, № 4, с. 3–25.
- [2] Глебов В.Ю., Головина Н.С. Об оценке защищенности критически важных объектов России от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного характера и террористических актов. *Технологии техносферной безопасности*, 2009, № 6. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-6/09-06-09.ttb.pdf> (Дата обращения 10.04.2015).
- [3] Двоенко О.В. *Насосно-рукавные системы пожарных автомобилей, обеспечивающие тушение пожаров и аварийное водоснабжение на объектах энергетики в условиях низких температур*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014, 190 с.
- [4] Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ (в ред. от 11 февраля 2013 г. *О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера*. Москва, 2013.
- [5] Тетерин И.М., Алешков М.В., Двоенко О.В. *Тактические приемы. Схемы боевого развертывания и нормативы применения современных образцов пожарной и аварийно-спасательной техники*. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2013. —312 с.

УДК 621.9.048.7

## Перспективные методы повышения достоверности оценки параметров качества материала изделий ракетно-космической техники

© Абашин Михаил Иванович, Кислов Никита Владимирович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[abashin@bmstu.ru](mailto:abashin@bmstu.ru), [nikkislov@yandex.ru](mailto:nikkislov@yandex.ru)

*Рассмотрены методы диагностики параметров качества материала изделий, основанные на регистрации и анализе ультразвуковых колебаний, которые возбуждаются в материале посредством специального диагностического воздействия. Сформулирован вывод о перспективности использования гибридных методов диагностики изделий ракетно-космической техники, сочетающих в себе регистрацию и анализ ультразвуковых колебаний, сгенерированных высокоэнергетическими потоками.*

**Ключевые слова:** диагностика, ультразвуковые колебания, акустическая эмиссия, ракетно-космическая техника, повышение достоверности.

В настоящее время обеспечение высокого и стабильного качества изделий ракетно-космического машиностроения — одна из основных задач, на решение которой направлены усилия ученых и специалистов различных организаций и учреждений.

К числу важных факторов, влияющих на качество ракетно-космической техники (РКТ), относятся дефекты внутреннего строения изделий, в частности топливных баков, сосудов давления, шар-баллонов и др. Согласно общеизвестным данным существенная часть возникающих отказов при испытаниях и эксплуатации изделий РКТ обусловлена проявлением не обнаруженных на этапе технологического процесса, дефектов изготовления. В этой связи разработка новых и совершенствование существующих неразрушающих методов контроля (НК) играет важную роль для производственного процесса изделий РКТ. При этом данные методы должны обладать высокой чувствительностью и разрешающей способностью, что повышает сложность поставленной задачи контроля и диагностики. На сегодняшний день одним из наиболее распространенных в машиностроении методов контроля является метод, основанный на использовании информативных параметров волн акустической эмиссии АЭ).

Наиболее широкое распространение среди методов технологической диагностики приобрели акустические методы благодаря чувствительности, относительной легкости, достаточно высокой производительности. Различают активные и пассивные акустические методы контроля. К активным методам относят методы, использующие излучение и последующую регистрацию акустических волн. Пассивные методы используют только регистрацию акустических волн, генерируемых в исследуемом объекте.

Физической основой акустических методов является распространение в упругих средах ультразвуковых колебаний. В зависимости от упругих свойств среды, в ней мо-

гут распространяться различные виды колебаний: продольные, сдвиговые, поверхностные и др. Высокочастотные волны подчиняются законам распространения света, т. е. они отражаются, преломляются, испытывают явления интерференции и дифракции.

Проведенный анализ наиболее распространенных методов диагностики показывает, что их дальнейшее развитие в значительной степени будет определяться созданием комплексных средств технологической диагностики, использующих одновременно различные по своей физической природе явления, каждое из которых характеризуется определенными энергетическими превращениями. Поэтому развитие новых методов технологической диагностики должно основываться на принципе увеличения стадий энергетических превращений в контролируемом объекте при диагностическом воздействии.

Лазерное излучение — один из возможных видов подобного воздействия. Генерация акустического сигнала при таком воздействии вызывается различными факторами, зависящими от энергетических режимов лазерного излучения. Наиболее информативными параметрами акустического сигнала являются его форма, величина амплитуды и длительность импульса, которые зависят от характеристик светового импульса. Поэтому изменение мощности излучения и длительности светового импульса позволяют управлять пространственно-временными и энергетическими характеристиками акустических сигналов. При этом параметры акустического сигнала для различных материалов при одинаковых энергетических режимах лазерного излучения будут различны.

Также в качестве диагностического воздействия, возбуждающего генерацию АЭ в материале, может быть использован удар высокоскоростной струи жидкости. Для создания подобной водяной струи используются установки, предназначенные для гидроструйного и гидроабразивного резания материалов.

Преимуществом подобного метода, как показано в [1], является то, что высокоскоростная струя может служить не только для генерации АЭ в диагностируемом материале, но и для имитации воздействия на материал, аналогичного эксплуатационному. При этом на практике технологические возможности гидроструйного оборудования позволяют путем варьирования ряда параметров, прежде всего давления жидкости, создавать необходимый уровень напряжений, сопоставимый с теми или иными условиями эксплуатации.

Возможность применения гибридной диагностики материалов исследована в [2, 3]. Данные значений АЭ, полученные в результате диагностики, дополняются данными, полученными в результате воздействия на диагностируемый материал высокоскоростной струи жидкости, такими, как унос массы, форма и размеры гидрокаверны, высота валика пластического отгеснения материала из зоны воздействия струи жидкости и другие. В результате может быть получена более объективная картина качественных и эксплуатационных характеристик данного материала. В работе [4] показана возможность при помощи АЭ проводить диагностику процессов гидрообработки и работы гидрорежущего оборудования.

Обобщая изложенное выше, можно сказать, что наиболее перспективными методами оценки свойств материала изделий РКТ являются способы, основанные на регистрации ультразвуковых колебаний в материале, сгенерированных потоками с высокой плотностью энергии.

## Литература

- [1] Галиновский А.Л., Муляр С.Г., Хафизов М.В. Применение гибридной диагностики для оценки эксплуатационных свойств конструкционной керамики. *Изв. вузов. Сер. Машиностроение*, 2012, с. 65–69.
- [2] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И. Технология ультразвуковой экспресс-диагностики качества поверхности изделий машиностроения. *Машиностроительные технологии и оборудование*. Москва, Спектр, 2012, с. 43–75.
- [3] Абашин М.И., Хафизов М.В., Проваторов А.С. Разработка методики ультразвуковой диагностики эксплуатационно-технологических характеристик поверхностного слоя материала изделий РКТ. *Сб. ст. участников Молодежной науч.-инж. выставки «Политехника»*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
- [4] Барзов А.А. *Эмиссионная технологическая диагностика*. Москва, Машиностроение, 2005, 384 с.

УДК 681.5

## Прогноз износа промышленного оборудования на основе ПИД-регулятора

© Ковалев Андрей Владимирович, Сальников Владимир Сергеевич

Россия, г. Тула, АО «Конструкторское бюро приборостроения  
имени академика А.Г. Шипунова»

[a.w-91@mail.ru](mailto:a.w-91@mail.ru)

*Исследовано снижение затрат на обслуживание оборудования. Наиболее экономически выгодным является подход, основанный на фактическом состоянии оборудования. Представлена структурная схема прогнозирования износа промышленного оборудования. Проведено моделирование прогноза износа промышленного оборудования, по результатам которого сделан вывод о том, что при применении предложенной методики можно снизить затраты на обслуживание оборудования, уменьшить вероятность простоев оборудования, повысить эффективность работы ремонтной службы.*

**Ключевые слова:** промышленное оборудование, ПИД-регулятор, прогнозирование, износ.

Особенности современного производства таковы, что затраты на обслуживание оборудования превышают стоимость самого оборудования. Для снижения этого вида затрат существует целый комплекс мер. Одним из самых эффективных методов является своевременное техническое обслуживание. В промышленности известны три основных подхода к поддержанию приемлемого уровня технического состояния: обслуживание при аварии, планово-предупредительный ремонт и обслуживание по фактическому состоянию. Наиболее экономически выгодным является подход, основанный на фактическом состоянии оборудования, хотя он требует дополнительных

затрат на средства диагностики для определения текущего уровня технического состояния. С целью освобождения складских помещений от неостребованных запасных частей возможно использование методик прогнозирования времени износа диагностируемого узла до критической величины [1].

Проведенный анализ показал, что наиболее подходящей для прогноза является показательная функция. Ее коэффициенты рассчитываются по предварительным данным наблюдения за изменениями уровня износа. Это позволяет достичь точности прогнозирования достижения критического момента времени. Однако в ходе работы оборудования могут возникнуть аварийные ситуации, которые существенно влияют на интенсивность износа. Для нейтрализации этой составляющей в прогнозную модель введем пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор) [2]. Он включает в себя три независимых закона управления, объединяя их положительные и отрицательные стороны.

Пропорциональная составляющая управления отвечает за компенсацию ошибки в текущий момент времени. Главным преимуществом пропорционального регулирования является относительная простота расчета. Однако пропорциональный регулятор ограничен по точности в системах с большой инерционностью и запаздыванием, но на точность прогноза данные недостатки критично не влияют.

Дифференциальная составляющая управления определяет величину ошибки в будущем и реагирует на тенденцию ее изменения. Дифференциальный регулятор позволяет добиться наибольшего быстрого действия. Система реагирует не только на величину ошибки, но и на скорость ее проявления. Основным недостатком является низкая защищенность от шумов. Это вызывает отклик системы регулирования даже на незначительные изменения диагностического сигнала, обусловленные отсутствием идеальных условий.

Интегральная составляющая управления накапливает ошибку за все время наблюдения и сглаживает шумы в диагностическом сигнале, что повышает точность прогноза. При этом входной сигнал в каждый момент времени пропорционален интегралу ошибки. Соответственно, интегральный регулятор откликается только на длительные отклонения входных и выходных величин, а к кратковременным отклонениям нечувствителен. Ошибки в той или иной мере присутствуют всегда, и постоянное их накопление приводит к снижению стабильности системы и, соответственно, к снижению точности прогноза. Несмотря на высокую точность в переходных режимах интегральное управление имеет меньшую величину быстрого действия и высокую колебательность.

Совокупное использование перечисленных подходов позволяет минимизировать негативные стороны и в полной мере использовать лучшие их качества.

В прогнозной модели ПИД-регулятор необходимо устанавливать в качестве обратной связи, тем самым можно достичь минимальных отклонений прогнозной величины от уровня износа оборудования.

Структурная схема прогнозирования износа промышленного оборудования представлена на рис. 1. В представленной структуре прогнозная модель содержит элемент запаздывания относительно диагностического сигнала, благодаря чему удастся достичь оптимальных параметров регулятора и качественного прогноза износа при дальнейшей эксплуатации оборудования.

С использованием структурной схемы, приведенной на рис. 1, и произвольного входного воздействия, заданного в виде показательной функции, смоделируем прогноз износа промышленного оборудования.



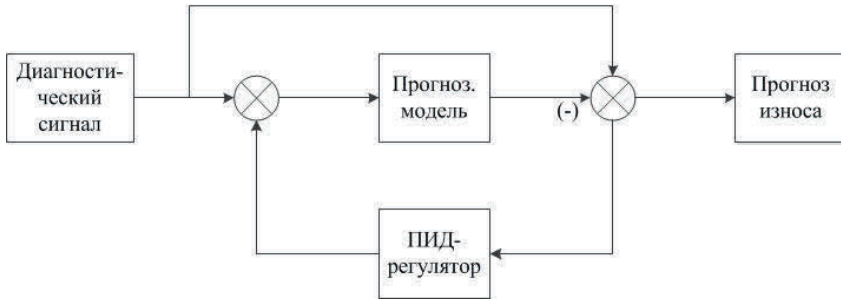


Рис. 1. Структурная схема прогнозирования износа промышленного оборудования

Кривая износа, прогноз износа и отклонение прогнозного значения от действительного представлены на рис. 2. Как видно, в начальный момент времени ошибка прогноза возрастает, но затем, в связи с накоплением статистики, резко снижается и находится в зоне допусков.

Одновременно со снижением ошибки прогнозирования наблюдается незначительное опережение входной величины (кривая 1) прогнозом (кривая 2). Данное отклонение необходимо при практическом применении представленной методики для защиты от возможных нештатных ситуаций при эксплуатации оборудования.

В ходе моделирования было выявлено, что представленная модель прогнозирования износа промышленного оборудования достаточно перспективна. Она точно определяет тренд диагностического сигнала и своевременно реагирует на скачкообразные изменения диагностического сигнала.

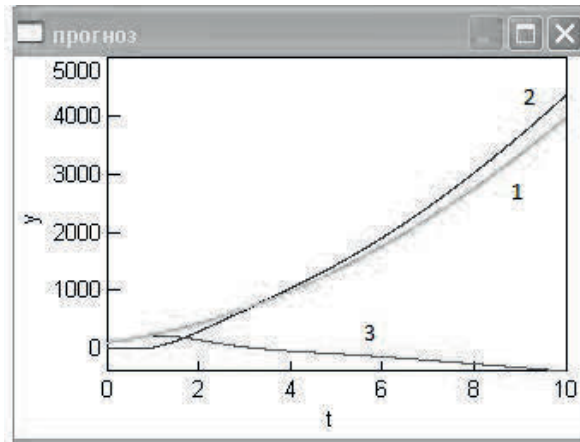


Рис. 2. Прогноз износа оборудования:

$y$  — условная величина износа;  $t$  — время наблюдения; 1 — износ оборудования; 2 — прогноз износа оборудования; 3 — ошибка прогноза

При практическом применении данной методики возможно снизить затраты на обслуживание оборудования, уменьшить вероятность простоев оборудования, повысить эффективность работы ремонтной службы.

## Литература

- [1] Ковалев А.В., Трушин Н.Н., Сальников В.С. Прогнозирование технического состояния технологического оборудования. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2014, вып. 11: в 2 ч., ч. 2, с. 554–560.
- [2] Ушкин И.С., Шумилкин А.А., Адилов Р.М. Использование ПИД-регуляторов в системах автоматического управления. *Успехи современного естествознания*, 2011, № 7, с. 226.

УДК 620.1

## Разработка методики ультраструйной диагностики качества наноструктурированных покрытий

© Проваторов Александр Сергеевич, Галиновский Андрей Леонидович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[sanru41@rambler.ru](mailto:sanru41@rambler.ru)

*Рассмотрена проблема технологической подготовки производства изделий с наноструктурированными покрытиями (НП). Проанализированы характерные особенности их создания, диагностики и применения. Выявлена и обоснована необходимость совместного использования классических методов диагностики изделий с НП и перспективного метода ультраструйной диагностики. На основе проведенного исследования предлагается выделить возможности ультраструйной диагностики НП.*

**Ключевые слова:** наноструктурированные покрытия, диагностика, ультраструя, гидрокаверна, нагрузка, твердость, напряжения.

Эффективным и перспективным направлением повышения эксплуатационных показателей ряда изделий является нанесение на них наноструктурированных покрытий (НП) различного состава, назначения и свойств. Свойства покрытий предопределяются, в частности, малым размером кристаллов и большой объемной долей границ зерен. Технологические покрытия, благодаря комплексу своих свойств, имеют большое значение в современном машиностроительном производстве. Развитие этого направления науки и техники весьма востребовано в связи с заметным расширением поля деятельности человека и переходом на области с экстремальными условиями эксплуатации техники.

Для этапа технологической подготовки производства изделий с НП важно получение информации о функционально-эксплуатационных параметрах изделия, а, следовательно, большое значение имеет решение задачи создания для этих целей диагностических средств. При этом следует учитывать, что обработка режимов нанесения покрытий достаточно затратна ввиду значительного числа варьируемых технологических параметров, высокой энергоемкости и стоимости материалов.

Анализ диссертационных исследований по тематике, связанной с созданием, диагностикой и применением НП показал, что в последнее 10-летие отмечается устой-

чивый рост числа таких научных работ, что подтверждает сделанные выводы об актуальности данной тематики. В рассмотренных исследованиях использовались различные методы диагностики и оценки показателей качества НП, основанные на просвечивающей электронной микроскопии, применении микротвердомеров, трибометров, адгезиометров и др.

Многообразие методов диагностики, соответствующих стандартам ISO 14577-1-4:2002, ASTM E 2546-07, обладает рядом недостатков, обусловленных невозможностью оценить устойчивость покрытия к действию внешних динамических знакопеременных нагрузок, имеющих волновой нестационарный характер.

Так, измерение микротвердости НП сильно зависит от глубины проникновения индентора, толщины покрытия и микротвердости подложки, что необходимо учитывать для корректного сравнения результатов. Применение адгезиометров не достаточно эффективно при диагностике покрытий, нанесенных на относительно пластичные материалы, например коррозитонно-стойкую сталь, поскольку при внедрении индентора происходит деформация основания, а само покрытие сохраняет свою целостность. Оптические средства микроскопии способны оценить лишь качество поверхностного слоя покрытия, в то время как внутренняя структура покрытия может содержать множественные трещины и дефекты, что обусловлено наличием в поверхностных слоях НП сжимающих напряжений, препятствующих выходу на поверхность трещин. Этот факт был подтвержден в результате экспериментальных исследований на ионно-электронном микроскопе.

Кроме того, указанные методы диагностики не способны решить задачу оценки остаточного ресурса изделия, содержащего НП. Вместе с тем известно, что подавляющее большинство деталей работает в условиях знакопеременных нагрузок. В результате проведенных исследований были определены факторы, влияющие на геометрические характеристики валика пластического оттеснения: усилие вдавливания; диаметр индентора, диаметр отпечатка, толщина покрытия; механические свойства основного металла и металла поверхностного слоя, поверхностные остаточные напряжения. Установлено, что остаточные напряжения вызывают значительные изменения в распределении нормальных перемещений в наплыве вокруг отпечатка. Сжимающие остаточные напряжения вызывают увеличение перемещения, причем с их ростом это перемещение возрастает. Растягивающие остаточные напряжения, наоборот, вызывают уменьшение перемещения. В МГТУ им. Н.Э. Баумана предложен метод ультразвуковой диагностики (УСД) поверхностного слоя материалов, который был использован для решения задач оценки качества, эксплуатационных свойств и остаточного ресурса НП. Этот метод может быть особенно эффективным для диагностики тех разновидностей НП, которые применяются в изделиях, предназначенных для работы в условиях воздействия жидкостного и абразивно-жидкостного потока (лопатки турбин, гребные винты, наносы и их элементы, гидроклапаны и др.).

Ультразвуковая жидкости, как специфический диагностический инструмент, может использоваться как подобие классических методов диагностики поверхностного слоя НП. При этом основными информативными параметрами являются валик пластического оттеснения и глубина гидрокаверны.

Кроме оценки методом УСД такого эксплуатационного показателя как износостойкость, может быть оценен остаточный ресурс покрытия, что было доказано в результате экспериментальных исследований на образцах (ГОСТ 25.502). Данные образцы с нанесенным покрытием из нитрида титана методом газозащитного осажде-

ния (PVD) подвергались малоцикловым усталостным испытаниям на симметричный изгиб на специально изготовленном для этого устройстве (усталостная машина). В результате испытаний с помощью усталостной машины были получены образцы с известной картиной характерных зон с различной поврежденностью. Далее было осуществлено диагностическое воздействие на НП из нитрида титана, нанесенное на описанный образец из нержавеющей стали, с помощью адгезиометра (скрайбирование поверхности) и ультразвуковым методом (эрозия поверхности). Измерение глубины гидрокаверны проводилось на образцах, прошедших усталостные испытания с разным числом циклов ( $2 \cdot 10^4 \dots 10^5$  циклов) с помощью профилографа-профилометра. Следует отметить, что метод адгезиометрии является традиционным и широко представлен в технической литературе. Для изучения поверхности НП после обоих видов воздействия был использован двулучевой ионно-электронный микроскоп с 3D-эффектом, позволяющий получить кросс-секции на любом участке гидрокаверны и канавки, образованной под действием индентора.

В целом в результате анализа полученных экспериментальных данных было установлено, что глубина гидрокаверн значительно отличается в каждом случае и отмечен интенсивный рост глубины на образцах, прошедших  $6 \cdot 10^4$  и более циклов. Учитывая изменение профиля гидрокаверны в результате варьирования ряда технологических параметров, в экспериментах они были неизменными. Были сделаны выводы о том, что после данного числа нагружений происходит нарушение адгезии НП, которое, в свою очередь, начинает работать при взаимодействии с натекающей ультразвукой как своеобразный микроабразив, имеющий высокую твердость. Кроме того было отмечено плавное уменьшение глубины гидрокаверны на числе циклов менее  $6 \cdot 10^4$ , что может быть связано с выработкой пластичности материала подложки.

Таким образом, УСД НП позволяет:

- определять ресурс НП на деталях до момента начала необратимых процессов нарушения адгезионных свойств;
- проводить сравнительную оценку твердости подложки;
- варьируя скорость подачи ультразвуки и ее скорость подбирать необходимый режим УСД НП с различными физико-механическими параметрами и толщинами;
- создавать динамические нестационарные воздействия на поверхность образцов, имитируя реальные условия эксплуатации, прежде всего, воздействие жидкостного, гидроабразивного, кавитационного и других потоков.

На следующем этапе были проанализированы результаты диагностики, оценены достоинства и недостатки каждого метода. При изучении канавки на НП было отмечено, что изменение ширины наглядно демонстрирует увеличение твердости материала ввиду выработки пластичности подложки в результате усталостных испытаний. Однако при этом на одних и тех же участках не наблюдается отрыва покрытия и следов нарушения адгезионной прочности. Вместе с тем применение УСД НП этих же образцов показало заметное увеличение глубины гидрокаверны несмотря на рост твердости, что обусловлено описанными выше причинами.

В заключение отметим некоторые сходства и отличия в возможностях представленных методов. Продолжительность технологической операции диагностики в обоих случаях примерно одинакова с учетом подготовительно-заключительного времени. Оборудование является во многом уникальным, однако для процедур УСД применяется не специальное диагностическое оборудование как в случае с адгезиометрами, а стандартные станки для гидроабразивной резки материалов.

## Литература

- [1] Григорьев С.Н., Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Калустян Г.Г., Бычкова М.Я. Влияние режимов импульсного лазерного осаждения на трибомеханические свойства тонкопленочных покрытий Mo-Se-Ni-C. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2011, № 9, с. 23–31.
- [2] Левашов Е.А., Петржик М.И., Тюрина (Бычкова) М.Я., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Цыганков П.А., Рогачев А.С. Многослойные наноструктурные тепловыделяющие покрытия. Получение и аттестация их механических и трибологических свойств. *Металлург*, 2010, № 9, с. 66–74.
- [3] Левашов Е.А., Штанский Д.В., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Петржик М.И., Тюрина (Бычкова) М.Я., Швейко А.Н. Многофункциональные наноструктурные покрытия: получение, структура и обеспечение единства измерений механических и трибологических свойств. *Деформация и разрушение материалов*, 2009, № 11, с. 19–36.
- [4] Levashov E.A., Shtansky D.V., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Petrzhik M.I., Tyurina (Bychkova) M.Ya., Sheveyko A.N. Multifunctional Nanostructured Coatings: Formation, Structure, and the Uniformity of Measuring Their Mechanical and Tribological Properties. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010, no 10, pp. 917–935.

УДК 622.22

## Анализ возможного технического решения перфорационной системы с наддувом легким газом

© Рубашкин Вячеслав Вячеславович, Бабкин Александр Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана,

[pc-os@bmstu.ru](mailto:pc-os@bmstu.ru)

*Рассматриваемое решение направлено на повышение пробития кумулятивных перфораторов. Использование газа под высоким давлением должно иметь положительное влияние на процесс формирования и движения кумулятивной струи. Выполнено численное моделирование данного технического решения с целью подтверждения наличия влияния газа под высоким давлением на материал струи. Расчеты велись в системе ANSYS AUTODYN.*

**Ключевые слова:** кумулятивный перфоратор, увеличение пробития, легкий газ.

В представленной работе проанализировано и исследовано одно из возможных технических решений перфорационной системы – с наддувом легким газом ее внутренней полости и полостей кумулятивных зарядов-перфораторов. Как показывают опыты, проведенные за рубежом, в рамках такой схемы в определенных случаях удавалось получать повышения среднего пробития почти на 40 % [1, 2].

Ключевая физическая идея заключается в следующем. Кумулятивные струи из пористых композитных облицовок по ходу их движения могут испытывать радиальное рассеивание, приводящее к падению плотности струи и к снижению пробивного действия [3]. Этому можно противодействовать радиальным обжатием струи газом с

высоким давлением. Воздействие должно быть организовано так, чтобы исключить побочные негативные эффекты влияния газа с высоким давлением на схлопывание облицовки и формирование кумулятивной струи.

В расчетах рассматривался «ливерморский» кумулятивный заряд. Диаметр заряда  $D = 46$  мм, масса взрывчатого вещества (ВВ) 23 г (98,5...99 % гексогена и 1...1,5 % парафина). Материал композитной порошковой облицовки: вольфрам (45,20 %), медь (43,19 %), олово (11,05 %), графит (0,53 %), смазочное масло (0,03 %). Начальная пористость  $\sim 10$  %. Вид заряда показан на рис. 1.

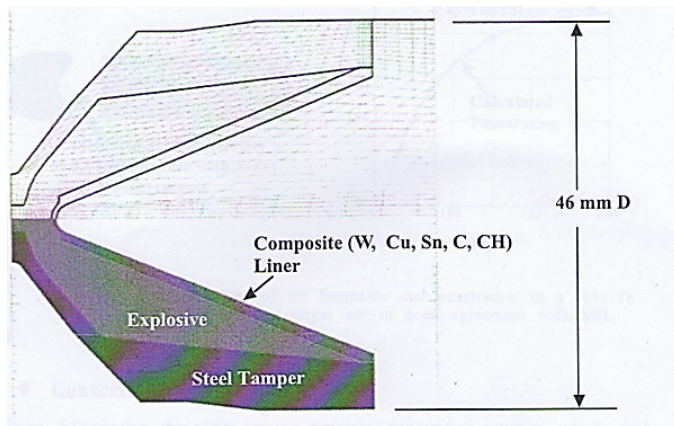


Рис. 1. Вид рассматриваемого заряда кумулятивного перфоратора

Самый простой и дешевый вариант реализации этой идеи — наддув полости перфорационной системы воздухом. Как это интуитивно чувствуется — воздухом высокого давления, но наличие в полости кумулятивного заряда достаточно сильно сжатого воздуха неблагоприятно сказывается на работе этого заряда, что предсказывают и мои расчеты, и расчеты из известных американских работ. Расчеты проводились в пакете программ AUTODYN [1, 2].

В качестве модели воздуха использована модель совершенного идеального газа, модель композитного порошкового материала облицовки — модель пористого материала  $p$ - $\alpha$  [1, 2].

Оценка точности вычислений проводилась по параметру скорости головной части струи на начальной стадии схлопывания облицовки (рис. 2). В оригинальной работе при  $t = 10$  мкс скорость головной части струи достигала 6,4 км/с. Зависимости скорости головной части струи от времени, полученный в результате численного моделирования представлены на рис. 2. Сходство исследуемых величин свидетельствует о достаточной точности вычислений.

Пример влияния окружающего воздуха на кумулятивный процесс показан на рис. 3 (верхняя часть рисунка отображает результаты расчетов в оригинальной работе, нижняя — в данной). Как правило, в расчетах кумуляции влиянием воздуха пренебрегают — в обычных условиях оно мало. Однако в общем случае это совсем не так. Так, при начальном давлении 35 МПа (350 атм) процесс формирования струи просто нарушается за счет возникновения воздушного пузыря, препятствующего схлопыванию облицовки. При этом воздух даже уже при начальном давлении пред-

ставляет собой конденсированную — достаточно плотную — среду с плотностью  $\rho \sim 0,3 \text{ г/см}^2$ . Еще бóльшей плотность воздуха будет в ходе схлопывания. И таким образом идея позитивного радиального обжатия порошковой композитной струи «на воздухе» не может быть реализована.

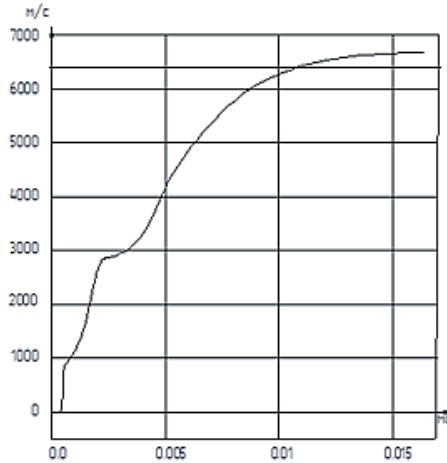


Рис. 2. Зависимость скорости головной части струи от времени

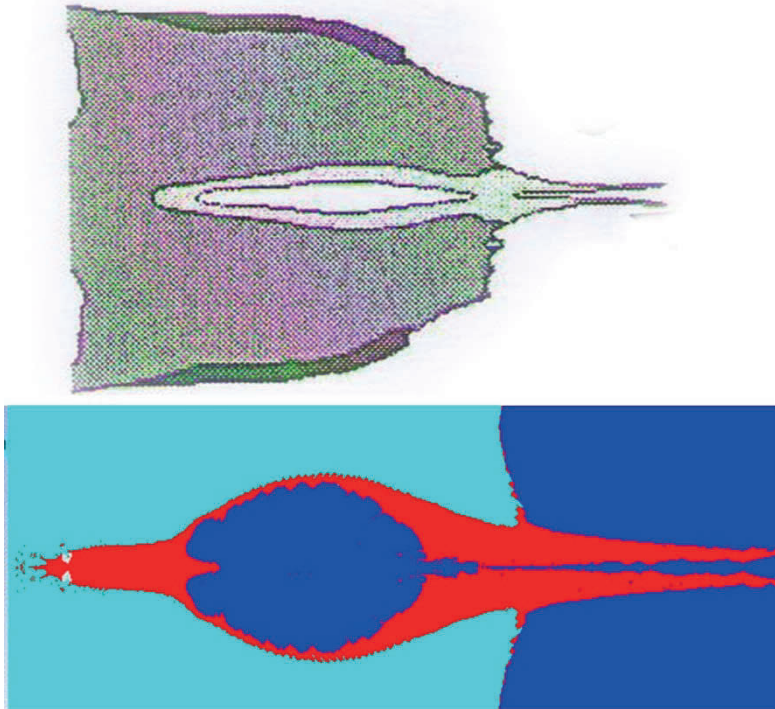


Рис. 3. Влияние воздуха высокого давления на кумулятивную струю

Возможный способ решения этой проблемы — замена окружающего газа на более легкий, чтобы при одинаковом давлении он имел бы меньшую плотность и соответственно, не представлял бы такое серьезное препятствие для схлопывания облицовки. Идеальным вариантом мог бы стать водород, как газ с наименьшей молярной массой, но взрывоопасность водорода не представляет возможным его использование на практике.

Следующим рассматриваемым газом явился гелий, который больше подходит на роль заменителя воздуха как среды, в которой происходит подрыв.

И расчеты американских ученых, и расчеты, проведенные в данной работе, показывают, что когда в качестве поджигающего газа используется гелий, ни при каких условиях не наблюдается образования газового пузыря, и при любых условиях формируется кумулятивная струя. Это подтверждает рис. 4.

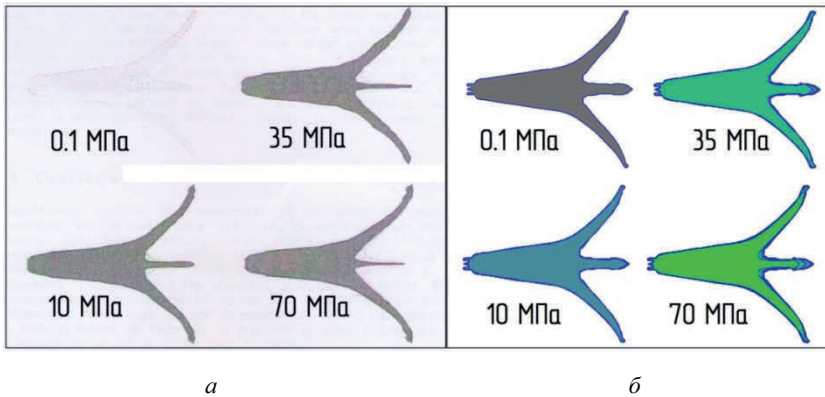


Рис. 4. Сопоставление результатов численного моделирования:  
*а* — «ливерморские» расчеты; *б* — настоящая работа

Причины отсутствия газового пузыря могут быть обусловлены не только меньшей плотностью легкого газа, но и большей скоростью распространения в таком газе звуковых возмущений. Попытка сформироваться газовому пузырю в легком газе, судя по всему, тут же парируется распространением по этому газу волн разрежения и соответствующим движением газа вдоль струи в сторону ее головной части.

Для оценки правомерности такого предположения в работе сопоставлены характеристики динамической сжимаемости воздуха и гелия в рамках моделей как совершенного, так и реального газов. В качестве характеристик динамической сжимаемости рассматривались ударная адиабата газа  $p(\rho)$  и вспомогательная кинематическая величина  $c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}$ , взаимосвязанная со скоростью звука в газе.

Для совершенного газа с его калорическим уравнением состояния  $P = \rho E(k - 1)$  уравнение ударной адиабаты (ударной адиабаты Гюгонио) получается с привлечением уравнения энергии на фронте ударной волны

$$E - E_0 = \frac{P + P_0}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right). \quad (1)$$



Для реального газа с термическим уравнением состояния Ван-дер-Ваальса

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

(где  $R$  — газовая постоянная;  $a$  и  $b$  — константы) удельная внутренняя энергия  $E$  состоит из двух составляющих — тепловой и потенциальной энергии объемной деформации [4]:

$$E = C_v T - \frac{a}{V}.$$

Резльтирующее калорическое уравнение состояния для реального газа имеет вид

$$P(V - b) = E \frac{R}{C_v} + \frac{a}{V} \left( RC_v - 1 + \frac{b}{V} \right).$$

Используя уравнение энергии (1), получаем ударную адиабату реального газа:

$$P = \frac{C_v a \rho \left( RC_v - 1 + b \rho \right) + E_0 + \frac{P_0}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)}{R \left[ \left( \frac{1}{\rho} - b \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \right]}.$$

Результаты сопоставления характеристик динамической сжимаемости для двух газов показаны на рис. 5. Видно, что легкий газ гелий существенно менее сжимаем, чем воздух. Это подтверждают и относительное расположение ударных адиабат и скорости распространения малых возмущений — для легкого газа они гораздо больше, чем для воздуха.

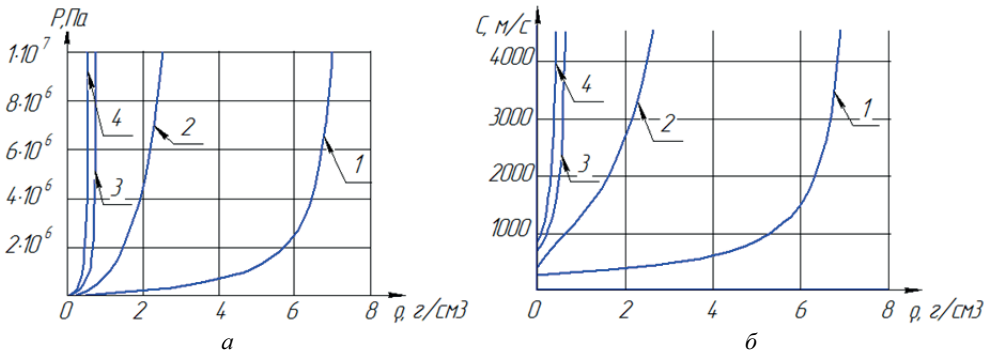


Рис. 5. Ударные адиабаты (а) и скорости звука (б) в разных газах:

1 — модель воздуха, как реального газа; 2 — модель воздуха, как идеального газа; 3 — модель гелия, как идеального газа; 4 — модель воздуха, как реального газа

В проведенном сопоставлении расчетных результатов по гелию (см. рис. 4), известных зарубежных и полученных в настоящей работе, существует проблема. Проведенные в данной работе расчеты предсказывают формирование более толстой, и

несколько менее градиентной струи. Это может быть связано с неточностью модели рассматриваемого газа. Вероятно, использование модели реального газа даст более качественные результаты.

Таким образом, в целом проблема понимания пока еще остается. Например, неясна значимость механизмов воздействия на струю, т. е. влечет наиболее сильное на нее воздействие: радиальный поджим струи сжатым газом, осевое движение сильно сжатого легкого газа вдоль струи или же выполнение гелием функции инертного газа — недопущение кислорода окружающего воздуха к окислению горючих добавок в рецептуру кумулятивной струи. Тем не менее подтвержден механизм разрешения кумулятивной струи в атмосфере с высоким давлением за счет образования газового пузыря.

### Литература

- [1] Glenn L.A. *Pressure Enhanced Penetration with Shaped Charge Perforators*, 1998. URL: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/234318.pdf> (дата обращения 25.05.2014).
- [2] Glenn L.A., Chase J.B., Barker J., Leidel D.J. *Experiments in Support of Pressure Enhanced Penetration with Shaped Charge Perforators*, 1999. URL: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236925.pdf> (дата обращения 25.05.2014).
- [3] Войтенко Ю.И., Гошовский С.В., Драчук А.Г., Бугаец В.П. Механическое действие кумулятивных зарядов с пористыми облицовками. *Физика горения и взрыва*, 2013, т. 49, № 1, с. 125–133.
- [4] Сивухин Д.В. *Общий курс физики: в 5 т., т. 2: Термодинамика и молекулярная физика*. Москва, Наука, 1975, 519 с.

УДК 629.5.063.001.5

## Об эффективности применения вибродемпфирующих покрытий

© Спиридонов Александр Юрьевич, Пшеницын Андрей Анатольевич

Россия, Архангельская обл., г. Северодвинск, ОАО «Производственное объединение  
“Северное машиностроительное предприятие”»

[linkolna@yandex.ru](mailto:linkolna@yandex.ru)

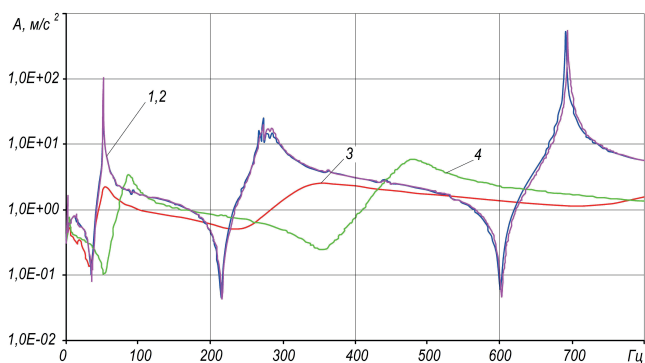
*Рассмотрена эффективность применения вибродемпфирующих покрытий для снижения вибрации конструкций. Приведены экспериментальные характеристики исследуемых покрытий. Предложен алгоритм, позволяющий учесть влияние толщины покрытия, на конечные характеристики композитных стержней. На практике развитый алгоритм позволяет оценить ожидаемые динамические параметры конструкций в зависимости от характеристик вибродемпфирующих материалов, что дает возможность обеспечить эффективную виброзащиту сложных изделий машиностроения и кораблестроения.*

**Ключевые слова:** *вибродиагностика, динамические параметры, судовое оборудование, вибродемпфирование.*

В судостроении для снижения уровней шума и вибрации часто применяются различные вибропоглощающие и виброизолирующие средства [1–3]. Трудности заключаются в том, что технические характеристики вибродемпфирующих покрытий, которые приводятся в технических условиях (ТУ), не позволяют выполнить количественное сравнение их эффективности. Это связано с тем, что в ТУ нормируются коэффициенты потерь стальных пластин, демпфированных соответствующим покрытием; размеры образцов композитных стержней могут различаться, в результате значительно отличаются резонансные частоты, на которых производится измерение коэффициентов механических потерь. Значения коэффициента потерь, измеренные на разных частотах, различны. Для сравнительной оценки показателей эффективности демпфирующих свойств разных покрытий необходимо провести измерения основных характеристик в одинаковых условиях, на равных образцах, определить и сравнить коэффициенты потерь материалов покрытий.

К вибрационным характеристикам покрытий относятся коэффициент механических потерь, динамический модуль упругости и плотность материала. Вибрационные характеристики покрытий в данной работе определялись на стальных пластинах размерами  $(700,0 \pm 1,0) \times (50,0 \pm 0,2) \times (5,0 \pm 0,1)$  мм, покрытых с одной стороны вибропоглощающим слоем толщиной, равной удвоенной толщине пластины.

Рассмотрим, как влияет на амплитудно-частотную характеристику вибрации свободной пластины нанесение покрытий ВИПОКОМ и МАВИП (рис. 1). Возбуждение проводилось в середине пластины нормированной во всем частотном диапазоне силой, равной 1 Н. Амплитудно-частотная характеристика вибрации образцов пластин без покрытий в диапазоне частот до 800 Гц совпадают и имеют три резонансные частоты.



**Рис. 1.** Амплитудно-частотные характеристики пластин без покрытий (1, 2), пластины с покрытием ВИПОКОМ (3) и пластины с покрытием МАВИП (4)

Методика определения модуля упругости вибропоглощающих покрытий основана на вычислении изгибной жесткости составного двухслойного стержня с различными механическими характеристиками слоев.

Известно математическое выражение, связывающее отношение собственных частот стержней с покрытием и без покрытия, с отношением плотностей и модулей упругости материалов покрытия и стального стержня:

$$\left(\frac{\omega_n}{\omega_{1n}}\right)^2 (1 + h_2 \rho_r) = \frac{1 + 2e_2 h_2 (2 + 3h_2 + 2h_2^2) + e_2^2 h_2^4}{1 + e_2 h_2}, \quad (1)$$

где  $\omega_n, \omega_{1n}$  — круговая частота резонансных колебаний композитного стержня и стержня без покрытия;  $n$  — порядок формы колебаний стержня;  $h_2$  — отношение высоты покрытия к высоте стального стержня;  $\rho_r$  — отношение плотности покрытия к плотности стального стержня;  $e_2$  — отношение модуля упругости демпфирующего материала к модулю упругости стального стержня.

Если известны значения  $\omega_n, \omega_{1n}, h_2$  и  $\rho_r$ , то, решая квадратное уравнение (1) относительно  $e_2$  и умножив модуль упругости стального стержня на полученный результат, получим модуль упругости демпфирующего материала:

$$E_{\text{пок}} = E_{\text{ст}} e_2. \quad (2)$$

Результаты вычислений, усредненные по пяти образцам, без учета максимальных и минимальных значений сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Модули упругости вибродемпфирующих материалов**

Исследуемые параметры	ВИПОКОМ			МАВИП		
	Частоты пластин без покрытий, Гц	55	289	712	54	288
Частоты пластин с покрытием, Гц	55	354	936	87	486	1198
Модуль упругости, Н/м <sup>2</sup>	1,3E+09	3,1E+09	4,4E+09	8,8E+09	1,0E+10	1,1E+10
Разброс значений между образцами, %	2	2	1	5	9	10

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что резонансная частота первой формы колебаний для пластины, покрытой материалом ВИПОКОМ практически не изменилась, все остальные резонансные частоты для обоих покрытий увеличились, причем для покрытия "МАВИП" в большей степени.

Методика определения коэффициента потерь материала вибропоглощающего покрытия основана на зависимости между коэффициентом потерь композитного стержня, коэффициентом потерь материала покрытия, относительной толщиной покрытия и отношением модуля упругости покрытия к модулю упругости стального стержня. Из указанной зависимости определим коэффициент потерь материала:

$$\eta_2 = \eta_n \frac{(1 + e_2 h_2)(1 + 4e_2 h_2 + 6e_2 h_2^2 + 4e_2 h_2^3 + e_2^2 h_2^4)}{e_2 h_2 (3 + 6h_2 + 4h_2^2 + 2e_2 h_2^3 + e_2^2 h_2^4)}, \quad (3)$$

где  $\eta_2, \eta_n$  — коэффициенты потерь материала покрытия и композитного стержня соответственно;  $h_2$  — относительная толщина покрытия;  $e_2$  — отношение модуля упругости покрытия к модулю упругости стального стержня.

В табл. 2 приведены окончательные результаты вычислений коэффициентов потерь как средние значения по пяти образцам каждого из покрытий без учета максимальных и минимальных значений.

Коэффициенты потерь вибродемпфирующих материалов

Исследуемые параметры	ВИПОКОМ			МАВИП		
	55	289	712	54	288	713
Частоты пластин без покрытий, Гц	55	289	712	54	288	713
Коэффициент потерь пластин без покрытия	0,0008	0,0006	0,0005	0,0009	0,0007	0,0006
Частоты пластин с покрытием, Гц	55	354	936	87	486	1198
Коэффициент потерь пластин с покрытием	0,26	0,31	0,26	0,13	0,10	0,09
Коэффициент потерь материала покрытия	0,86	0,61	0,47	0,22	0,21	0,16
Разброс значений между образцами, %	4	3	2	3	2	6
Среднее значение коэффициента потерь материала покрытия	0,65 ± 0,23			0,20 ± 0,04		

Из таблицы видно, что коэффициент потерь пластин без покрытий значительно меньше коэффициента потерь пластин с покрытием, собственные потери в пластинах и способ крепления образцов не оказывают влияния на результаты измерений.

В научно-технической литературе [1–3] и в справочных данных на вибропоглощающие покрытия приводится так называемый модуль потерь, равный произведению модуля упругости материала покрытия на коэффициент его потерь. Причем утверждается, что коэффициент потерь демпфируемой пластины тем больше, чем больше модуль потерь.

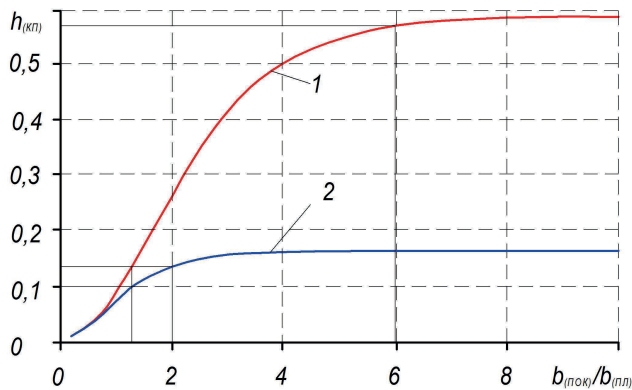
В табл. 3 приведены значения модулей упругости, коэффициентов потерь и модули потерь материалов ВИПОКОМ и МАВИП, измеренные на трех формах изгибных колебаний пластин и их средние значения. Отсюда следует, что модули потерь, примерно равны и для материала МАВИП несколько больше, за исключением отчета по третьей форме колебаний. Согласно приведенному выше утверждению, коэффициент потерь пластин с вибропоглощающим покрытием МАВИП должен быть выше коэффициента потерь пластин с покрытием ВИПОКОМ. Однако по результатам измерений, приведенным в табл. 2, отношение указанных коэффициентов составляет порядка трех в пользу покрытия ВИПОКОМ.

Таблица 3

Модули потерь вибродемпфирующих материалов

Исследуемые параметры	ВИПОКОМ				МАВИП			
	Форма колебаний			Среднее значение	Форма колебаний			Среднее значение
	1	2	3		1	2	3	
Модуль упругости, ГПа	1,3	3,1	4,4	2,9	8,8	10	11	9,9
Коэффициент потерь образца	0,26	0,31	0,26	0,28	0,11	0,10	0,09	0,1
Коэффициент потерь материала покрытия	0,86	0,61	0,47	0,65	0,22	0,21	0,16	0,20
Модуль потерь, ГПа	1,1	1,9	2,1	1,7	1,7	2,2	1,7	1,9

Для выяснения данного обстоятельства на рис. 2 представлены расчетные зависимости коэффициентов потерь композитных пластин с покрытиями ВИПОКОМ и МАВИП  $h_{(кп)}$  от относительной толщины покрытия к толщине стальной пластины  $b_{(пок)}/b_{(пл)}$ . Данные результаты получены с помощью уравнения (3). На рис. 2 видно, что при малых значениях относительной толщины покрытий зависимости для ВИПОКОМ и МАВИП совпадают. При дальнейшем увеличении относительной толщины коэффициент потерь пластины с покрытием МАВИП замедляет рост и при значениях относительной толщины чуть больше 2 практически не изменяется. Это объясняется тем, что при увеличении толщины покрытия не деформируемая плоскость образца смещается в сторону покрытия, при этом снижается деформация покрытия, и как следствие — его эффективность. Таким образом, утверждение по поводу эффективности модуля потерь справедливо при малых значениях относительной толщины покрытий. Для данных материалов эта толщина составляет 0,6 от толщины стальной пластины. При большей толщине покрытий в их эффективности определяющим является коэффициент потерь материала. Чем он больше, тем выше коэффициент потерь демпфируемой конструкции. На рис. 2 видно, что относительная толщина покрытия МАВИП, равная 2, является оптимальной и дальнейшее увеличение не приведет к росту коэффициента потерь пластины с покрытием. Для покрытия ВИПОКОМ, при необходимости достижения максимального коэффициента потерь демпфируемой пластины, оптимальной относительной толщиной покрытия может быть выбрана величина, равная 4. Коэффициент потерь композитной пластины может быть равным  $\sim 0,5$ .



**Рис. 2.** Зависимости коэффициентов потерь пластин с покрытиями ВИПОКОМ (1) и МАВИП (2) от относительной толщины покрытия

По рис. 2 можно определить толщину покрытия ВИПОКОМ, необходимую для получения такого же коэффициента потерь пластины с покрытием, как и у пластины с покрытием МАВИП с относительной толщиной 2. Это значение равно  $\sim 1,2$ . Следовательно, для получения одного и того же коэффициента потерь на демпфируемой пластине необходимо нанести материал МАВИП относительной толщиной, равной 2, а материал ВИПОКОМ — 1,2, что составляет 60 % от толщины МАВИП. Таким образом, материал с меньшим значением модуля потерь оказался эффективней в 2,8 раза при относительной толщине покрытия около 4. Данный результат свидетель-

ствует о том, что при сравнении и выборе типа вибропоглощающего покрытия необходимо учитывать и его относительную толщину. При толщине покрытия значительно превышающей толщину металла, более эффективным может оказаться покрытие с меньшим модулем потерь.

#### Литература

- [1] Боголепов И.И. *Промышленная звукоизоляция*. Ленинград, Судостроение, 1986, 368 с.
- [2] Колесников А.Е. *Шум и вибрация*. Ленинград, Судостроение, 1988, 248 с.
- [3] Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. *Демпфирование колебаний*. Москва, Мир, 1988, 277 с.

УДК 621.822:629.5.03

### **Создание высокоскоростного и высоконагруженного автономного подшипника жидкостного трения с охлаждением и циркуляцией смазки в слое**

© Хабаров Антон Анатольевич, Альпин Александр Яковлевич

Россия, Архангельская обл., г. Северодвинск, ОАО «Производственное объединение “Северное машиностроительное предприятие”»

[anton\\_sevsk@mail.ru](mailto:anton_sevsk@mail.ru)

*Рассмотрена возможность применения подшипников с автономной смазкой вместо подшипников жидкостного трения с циркуляционной смазкой. Проанализирован способ создания внутренней циркуляции смазки в смазочном слое высокоскоростных автономных подшипников. Представлены результаты гидродинамического и теплового расчета таких подшипников. Обоснована необходимость и предложен способ создания насосного эффекта в смазочном слое автономного опорного подшипника.*

**Ключевые слова:** *высокоскоростной подшипник, автономный подшипник, жидкостное трение, внутренняя циркуляция смазки, автономная смазка.*

Основным элементом, определяющим живучесть судна, являются подшипники скольжения валопроводов. Изначально все подшипники скольжения имели циркуляционную систему смазки, в которой масло подводилось под давлением от напорной магистрали. Системы циркуляционной смазки с масляными насосами, системы с фильтрами и маслоохладителями, громоздки, сложны в обслуживании и пожароопасны. Эти недостатки были устранены в подшипниках скольжения с автономной системой смазки, в которых масло заливается в подшипник и подается к трущимся поверхностям за счет внутренней циркуляции без применения насоса, масляных цистерн, трубопроводов. Автономность смазки, отсутствие вспомогательных систем и контактных уплотнений, незначительный объем работ по обслуживанию подшипни-

ков в процессе эксплуатации обеспечивает высокую экономичность. Особая надежность подшипников определяется стабильностью гидродинамической смазки, что исключает износ трущихся частей.

Целью работы является создание подшипника с охлаждением и циркуляцией смазки внутри слоя, с окружной скоростью на шейке вала до 30 м/с. До настоящего времени в мировой практике автономные подшипники с водяным или воздушным охлаждением применялись только до окружных скоростей на шейках валов не более 15 м/с.

В подшипнике скольжения с автономной системой смазки смазочный слой образуется в пространстве стабильной клиновидной формы между неподвижной рабочей поверхностью и сопрягаемой рабочей поверхностью вращающегося вала. Жидкость в качестве смазки затягивается при вращении вала силами вязкостного трения в напорную часть слоя, где образуется повышенное давление жидкости, в сумме равное нагрузке от вала, которое препятствует непосредственному соприкосновению указанных поверхностей, и, таким образом, создает гидродинамический смазочный слой.

Разработанные конструкции новых подшипников имеют циркуляцию смазки внутри вкладыша. Принцип действия заключается в том, что основная масса смазки не сливается в картер, а циркулирует в смазочном слое: после прохождения через зону нагружения масло через боковые канавки снова возвращается в нагруженную часть смазочного слоя.

В ходе создания подшипников разработана методика, позволяющая определять минимальную толщину смазочного слоя, угол, определяющий положение минимальной толщины смазочного слоя, давление в произвольной точке, момент сопротивления вращению, мощность теплообразования подшипников с дугой охвата  $180^\circ$  и центральной вертикальной нагрузкой на вкладыш.

Определим исходные значения: опорная нагрузка подшипника 117 кН, рабочая ширина вкладыша подшипника 365 мм, частота вращения вала 297 об/мин, диаметр шейки вала 399,943 мм, диаметр вкладыша 400,52 мм, плотность масла при  $15^\circ\text{C}$  —  $905\text{ кг/м}^3$ , коэффициент объемного расширения масла  $6,32 \cdot 10^{-4}\text{ град}^{-1}$ , динамическая вязкость масла при температуре  $20^\circ\text{C}$  — 271 мПа·с, при температуре  $80^\circ\text{C}$  — 12 мПа·с.

Установлено, что для средней температуры в смазочном слое  $80^\circ\text{C}$  минимальная толщина смазочного слоя равна 30 мкм; разница средних температур масла на входе и выходе из масляного клина составляет  $3,3^\circ\text{C}$ ; мощность теплообразования равна 1,62 кВт; объем масла, поступающего в клин, — 408 мл/с; объем масла, выходящего из клина через сечение минимальной толщины слоя, — 125 мл/с; объем масла, выходящего из клина циркуляционной канавки, равен 283 мл/с. Данные подтверждают образование в подшипнике эффективной внутренней циркуляции смазки, при которой смазка, попав в смазочный слой, снова туда возвращается, охлаждаясь непосредственно в самом слое.

Один из методов создания автономного подшипника — использовать часть смазочного слоя в функции циркуляционного масляного насоса. Смазочный слой автономного опорного подшипника на протяжении  $360^\circ$  длины имеет различное функциональное назначение: напорный (несущий) слой, слой с внутренней циркуляцией, вакуумный слой и свободный (насосный) слой. Благодаря перепаду давлений в подшипнике-насосе происходит прокачка смазки через маслоохладитель, охлаждаемый воздухом.

Подшипник выполняет функцию циркуляционного насоса, используя насосный эффект в свободной части смазочного слоя. При обычной циркуляционной смазке



нагретая в напорной части слоя смазка, прокачиваемая через выходную границу в вакуумную и далее в свободную часть смазочного слоя, перемешивается со свежей циркуляционной смазкой и повышает ее температуру. В подшипнике-насосе нагретая в напорной части слоя смазка подается в маслоохладитель благодаря чему температура напорной части не повышается.

Подшипники с автономной системой смазки были испытаны на стенде. По результатам испытаний установлено, что они удовлетворяют всем поставленным требованиям. Образец испытываемого подшипника имеет диаметр вала 115 мм, несет радиальную нагрузку 5 кН (500 кг) и осевую 3 кН (300 кг) при частоте вращения вала 3000 об/мин. Параметры подшипника соответствуют подшипнику насоса магистрального насосного агрегата НМ 10000-210 нефтеперекачивающей станции.

Таким образом, создан высокоскоростной и высоконагруженный автономный подшипник жидкостного трения с охлаждением и циркуляцией смазки в слое, который имеет существенное преимущество по сравнению с существующими подшипниками, подтверждаемое расчетами и результатами испытаний.

### **Литература**

- [1] Альпин А.Я., Воронцов Е.Ю., Кокотков Н.И., Хабаров А.А. Внутренняя циркуляция в смазочном слое — самый простой и эффективный способ маслоснабжения автономных подшипников жидкостного трения. *Судостроение*, 2014, № 2, с. 46–48.
- [2] Хабаров А.А., Альпин А.Я., Кокотков Н.И. О возможности исключения громоздких и пожароопасных судовых систем циркуляционной смазки подшипников жидкостного трения. *Судостроение*, 2012, № 5, с. 34–35.
- [3] Хабаров А.А., Кокотков Н.И., Альпин А.Я. О необходимости и способе создания насосного эффекта в смазочном слое автономного опорного подшипника-насоса. *Судостроение*, 2014, № 6, с. 32–34.

УДК 621.762

### Слипаемость наноструктурных материалов

© Битюцких Алена Семеновна, Хордигов Антон Эдуардович,  
Суменков Александр Леонидович

Россия, г. Москва, Новомосковский институт (филиал)  
Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

[asumenkov@dialog.nirhtu.ru](mailto:asumenkov@dialog.nirhtu.ru)

*Изучено влияние дисперсности наноструктурных порошков оксида алюминия на слипаемость. Исследовались порошки оксида алюминия со сферическими частицами и средним размером до 1 мкм. Дисперсный состав определяли на основе электронно-микроскопических фотографий и по методу БЭТ. Слипаемость определялась по методу отрыва пластины со слоем порошка от порошкового тела. Выяснено, что слипаемость наносистем возрастает с уменьшением среднего размера частиц.*

**Ключевые слова:** наноструктурные материалы, механические свойства, слипаемость, дисперсность, средний размер частиц.

Уникальность свойств наноматериалов обуславливает неуклонный рост исследований в области создания новых материалов и разработки новых технологий. Применение особенных свойств наноструктурных материалов и соответствующих технологий в различных отраслях промышленности дали возможность получить исключительные результаты в машиностроении, микроэлектронике, оптике, биологии, медицине и т. д. Новые материалы по сравнению с «обычными» имеют до 8 раз больший предел прочности, до 3 раз больший предел текучести, до 7 раз более высокую твердость; обнаруживают проявления пластичности у керамики, сверхпластичности у металлов и др. [1]. Наноструктурные материалы находят широкое применение в виде наночастиц, наноструктурных покрытий, нанопленок [2]. В машиностроении используют, в основном, объемные наноструктурные материалы, порошковые материалы и комплектующие наноизделия. Одним из таких материалов является оксид алюминия, который широко применяется как сырье для получения элементов деталей оборудования, в том числе в машиностроении, огнеупорных материалов, абразивных и керамических режущих инструментов и т. д. Следует отметить,

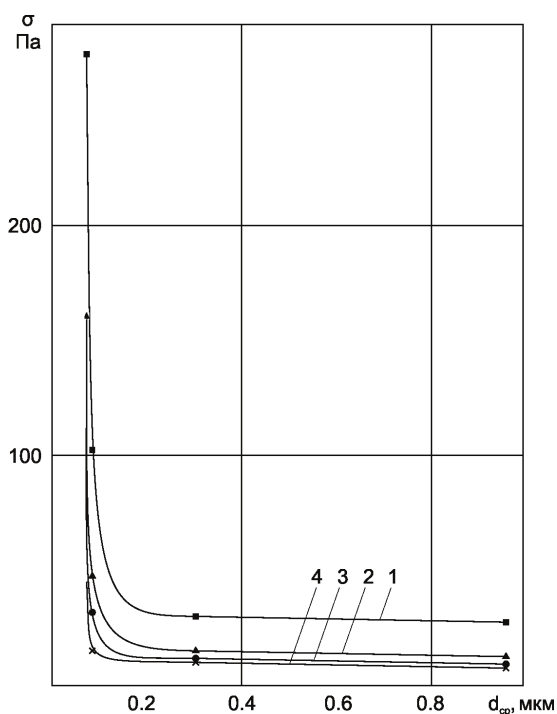
что в научно-технической литературе не обнаружено информации об исследовании дозирования, транспортирования, уплотнения, прессования нанопорошков, а также об их механических свойствах, определяющих качество проведения этих процессов. К основным механическим свойствам порошков относят аутогезию (слипаемость), коэффициенты внутреннего и внешнего трения. При этом необходимо учесть существенную зависимость механических характеристик от размеров и морфологических особенностей частиц, температуры, влажности, давления окружающей среды и многих других факторов. Таким образом, появляется возможность получения наносистем с заранее заданными механическими свойствами, которые обеспечивают необходимые условия синтеза, хранения и дальнейшей их переработки, т. е. реальна возможность разработки технологии управления свойствами новых материалов, повышающей их эксплуатационные характеристики.

В работе изучалось влияние дисперсности наноструктурных порошков  $Al_2O_3$  на слипаемость.

Исследовались порошки оксида алюминия со сферическими частицами и средним размером частиц от 0,03 до 1 мкм. Дисперсный состав определяли на основе электронно-микроскопических фотографий и по методу БЭТ.

Слипаемость (прочность при разрыве) определялась по методу отрыва пластины со слоем порошка от порошкового тела [3].

Было выяснено (рис. 1), что слипаемость наносистем возрастает с уменьшением среднего размера частиц.



**Рис. 1.** Зависимость прочности при разрыве наносистем  $Al_2O_3$  от размера частиц при сжимающих напряжениях –20,8 (1); 10,6 (2); 5,5 (3) и 2,4 кПа (4)

Резкое увеличение прочности при разрыве у порошков со средним размером частиц менее 0,1 мкм, по-видимому, объясняется увеличением доли поверхностной энергии и числа некомпенсированных связей на поверхности. Полученные результаты могут быть использованы при получении и переработке новых материалов.

### Литература

- [1] Быков Ю.А. Конструкционные наноматериалы. *Металлургия машиностроения*, 2011, № 1, с. 9–19.
- [2] Андриевский Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы. *Российский химический журнал*, 2002, т. XLVI, № 5, с. 50–56.
- [3] Андрианов Е.И. *Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов*. Москва, Химия, 1982, 256 с.

УДК 678

## **Особенности промышленного проектирования производственных мощностей для изготовления силовых конструкций из полимерных композиционных материалов для перспективных российских пассажирских самолетов МС-21**

© Богданов Салават Ильдусович, Шапаев Иван Иванович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ЗАО «Казанский Гипронеавиапром»

[salavatbogdanov@gmail.com](mailto:salavatbogdanov@gmail.com)

*Рассмотрены особенности промышленного проектирования производств для изготовления силовых конструкций из полимерных композиционных материалов для пассажирского самолета МС-21 с использованием технологий автоклавного формования и вакуумной инфузии.*

**Ключевые слова:** ЗАО «АэроКомпозит», вакуумная инфузия, «чистые» помещения, уникальное оборудование, полимерные композиционные материалы.

При проектировании летательных аппаратов нового поколения основными целями являются повышение весовой эффективности конструкции и улучшение летно-технических характеристик. Этого можно достичь путем замены классических конструкционных материалов (металлические сплавы) на полимерные композиционные материалы (ПКМ). Данные материалы по сравнению с традиционными авиационными металлическими сплавами имеют более высокую удельную прочность и лучшую химическую и коррозионную стойкость. К другим немаловажным преимуществам композиционных материалов следует отнести возможность создания конструкций с заранее заданными свойствами и высокую усталостную прочность.

Наиболее перспективными из всего многообразия ПКМ на сегодняшний день являются углепластики — ПКМ, получаемые на основе полимерной матрицы и углеродных волокон. Именно углепластики являются сегодня стратегическим композиционным № 1 в мире благодаря экстремально высоким механическим характеристикам, а также химической и коррозионной стойкости. Углекомпозиты по этим важнейшим показателям превосходят традиционные авиационные материалы — алюминий, титан и сталь — в несколько раз.

В процессе проектирования планера новейшего российского пассажирского лайнера МС-21 в целях улучшения летно-технических характеристик доля композиционных материалов доведена до 35...40 %, в том числе благодаря уникальной разработке российских конструкторов и технологов — крылу из углекомпозитов, получившему название «черное крыло».

Основное преимущество крыла из углекомпозитов по сравнению с традиционным металлическим крылом заключается в возможности создания более совершенной аэродинамической формы и большего удлинения крыла (отношения размаха крыла к средней хорде крыла). Типовое удлинение крыла у самолетов прошлого поколения составляет около 8–9, у современных самолетов гражданской авиации это число достигает 10,5, для лайнера МС-21 удлинение крыла достигнет значения 11,5. В результате аэродинамическое качество (основной параметр, характеризующий совершенство конструкции летательного аппарата) на крейсерских скоростях полета у МС-21 окажется выше, чем у современных аналогов, на 5...6 %. Это позволит уменьшить лобовое сопротивление при полете и обеспечить высокую топливную эффективность (6...8 % по сравнению с металлическим вариантом крыла) [2].

ПКМ предусмотрены также и в качестве конструкционных материалов для центроплана, элементов механизации крыла и хвостового оперения лайнера МС-21.

Для организации разработки, испытаний и производства узлов и агрегатов авиационной техники из ПКМ при участии ОАК и компании «Сухой» было создано ЗАО «АэроКомпозит». Производственные мощности ЗАО «АэроКомпозит» располагаются на базе ЗАО «Авиастар-СП» в г. Ульяновске (ЗАО «АэроКомпозит – Ульяновск») и Казанского авиационного завода им. С.П. Горбунова в г. Казани (ЗАО «КАПО-Композит»).

В качестве базовых технологий изготовления изделий из ПКМ для предприятий были выбраны автоклавная (ЗАО «КАПО – Композит») и инфузионная (ЗАО «АэроКомпозит – Ульяновск»).

«Классическая» автоклавная технология является наиболее распространенной в мире для изготовления силовых конструкций из ПКМ авиационного назначения. Данная технология заключается в выкладке предварительно пропитанного связующим армирующего материала (препрега) на оснастку с последующим формованием в автоклаве при повышенных температуре и давлении [3].

Основные преимущества данной технологии:

- возможность изготовления крупногабаритных интегральных конструкций;
- высокое качество поверхности изделий;
- максимально достижимая удельная прочность изделий.

Недостатками автоклавной технологии являются:

- необходимость в дорогостоящем холодильном оборудовании для хранения препрегов, имеющих малый срок живучести при нормальной температуре;
  - применение дорогостоящих и энергозатратных автоклавов;
  - длительный подготовительный процесс.
-

Технология вакуумной инфузии представляет собой пропитку жидким связующим сухого армирующего материала, предварительно выложенного на формообразующей оснастке, с одновременным вакуумированием для улучшения качества и ускорения процесса пропитки и последующей термической обработкой для полимеризации связующего.

Основные преимущества данной технологии:

- отсутствие необходимости применения материалов с малым сроком живучести (препрегов);
- неограниченное время подготовки и сборки вакуумного мешка;
- отсутствие необходимости применения дорогостоящих и энергозатратных автоклавов;
- возможность изготовления крупногабаритных конструкций (длиной до 18 м при ширине в хорде до 3 м и более) с высокой степенью интегральности;
- широкие возможности варьирования структуры армирующего материала;
- более низкие требования к промышленной безопасности производственного объекта (отсутствие сосудов, работающих под избыточным давлением);
- уменьшение эмиссии паров вредных веществ в воздух рабочей зоны при проведении технологического процесса изготовления изделий;
- возможность изготовления конструкций типа «сэндвич» за один технологический цикл.

Недостатками технологии вакуумной инфузии являются:

- относительно низкая скорость пропитки;
- высокая трудоемкость разработки схемы пропитки;
- длительный подготовительный процесс;
- более высокая стоимость формозадающей оснастки.

Проектный институт ЗАО «Казанский Гипрониавиапром», являющийся одним из ведущих предприятий России по проектированию производств для изготовления конструкций летательных аппаратов из ПКМ, выступил в роли генерального проектировщика этих уникальных для России производств, площадь которых составила более 100 000 м<sup>2</sup>.

Специалистам ЗАО «Казанский Гипрониавиапром» в ходе проектирования пришлось столкнуться с рядом особенностей, присущих специфике изготовления изделий из ПКМ: внедрением новых технологий изготовления изделий, необходимостью создания «чистых помещений» и т. д. Также проектирование осложнялось отсутствием в России опыта создания производств на базе новейшей технологии изготовления изделий из ПКМ методом вакуумной инфузии.

Для обеспечения высокого качества изделий и получения стабильных прочностных свойств на обоих предприятиях предусмотрены «чистые помещения» общей площадью более 16 000 м<sup>2</sup>, внутри которых с высокой точностью автоматически поддерживаются параметры микроклимата (температура и влажность) с жесткими ограничениями по содержанию пыли в воздухе помещений [1].

Для организации полного технологического цикла изготовления изделий из ПКМ были организованы участки подготовки оснастки, выкладки, полимеризации крыла, автоклавного формования, сборки, механической обработки, неразрушающего контроля, нанесения покрытий, окраски и др.

При производстве изделий из ПКМ на предприятиях ЗАО «АэроКомпозит» применяется следующее уникальное высокопроизводительное оборудование ведущих мировых компаний Coriolis Composites (Франция), STEVIK SAS (Франция), M. Torres

Group (Испания), НПК «Новатек» (Россия), Tescnatom (Испания), ThyssenKrupp (Германия), Langzauner (Германия), Scholz (Германия):

- лазерное позиционирующее (трехмерные лазерные проекторы дальнего действия с автоматизированной фокусировкой);
- оборудование для роботизированного изготовления заготовок методом выкладки с использованием на базе порталных роботов;
- установки неразрушающего контроля (установки автоматического ультразвукового контроля на базе промышленных роботов);
- автоматизированные сборочные комплексы (стенды для сборки крыла с центропланом, для пространственной ориентации и позиционирования стрингерного набора);
- автоматизированные стыковочные стенды (устройства перемещения преформ из позитивной в негативную оснастку);
- автоматизированное термическое для проведения процесса формования изделий из ПКМ (термоинфузионные автоматизированные установки);
- механообрабатывающее (пятикоординатные обрабатывающие центры с ЧПУ);
- другое прогрессивное технологическое оборудование с программным управлением.

В настоящее время ЗАО «АэроКомпозит – Ульяновск» и ЗАО «КАПО – Композит» успешно осваивают и внедряют новые инновационные технологические процессы изготовления деталей и комплектующих из полимерных композиционных материалов для среднемагистрального пассажирского лайнера МС-21.

### Литература

- [1] Лалетин С.Н., Шапаев И.И., Буздаев В.Ф. Проектирование предприятий для производства перспективных летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов. *Авиа-союз*, 2014, № 3.
- [2] Гайданский А.И. *Взмах черных крыльев*. URL: <http://expert.ru/expert/2013/19/vzmaih-chernyih-kryilev/> (дата обращения 10.06.2015).
- [3] Халиулин В.И., Шапаев И.И. *Технология производства композитных конструкций*. Казань, Изд-во КГТУ-КАИ, 2004, 234 с.

## Исследование вибропоглощающих и звукопоглощающих свойств матричных и наполненных композиционных материалов на основе модифицированной полиуретановой матрицы

© Вахитова Светлана Мударисовна<sup>1</sup>, Шаехова Ирина Фаридовна<sup>2</sup>,  
Ганиев Махмут Максумович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Россия, Республика Татарстан, г. Казань,  
Научно-технический центр ОАО «КАМАЗ»

<sup>2</sup>Россия, Республика Татарстан, г. Набережные Челны,  
Казанский (Поволжский) федеральный университет

[vakhitova.svetlana@yandex.ru](mailto:vakhitova.svetlana@yandex.ru)

*Современным производителям автотранспорта, станков, строительных материалов и конструкций приходится учитывать высокие экологические требования к уровням шума и вибрации. Достаточно часто возникает необходимость одновременно и в погашении вибрации, и в эффективном звукопоглотителе. В этой связи были проведены исследования влияния концентраций матричных компонентов, наполнителей и модификаторов на звукопоглощающие и упругие свойства полиуретановых композиционных материалов. Оценка звукопоглощающих и упругих свойств заключалась в измерении коэффициента звукопоглощения  $K_z$  и динамического модуля упругости  $E_d$  разработанных составов.*

**Ключевые слова:** композиционный материал, полиуретан, наполнитель, коэффициент звукопоглощения, динамический модуль упругости.

Цель данной работы — исследование изменения свойств композиционных материалов на основе полиуретановой матрицы для выявления составов с наибольшими звукопоглощающими и вибропоглощающими свойствами одновременно.

В ходе экспериментальных исследований в качестве компонентов матрицы была использована уретановая композиция, состоящая из компонента А (массовая доля гидроксильных групп — 4,4 %) и компонента Б (массовая доля изоцианатных групп — 21,4 %). Выбор полиуретановой матрицы обусловлен высокой популярностью полиуретанов в современной промышленности благодаря ряду ценных свойств, таких как стойкость к механическим и химическим воздействиям, широкому диапазону физико-механических показателей и др.

В качестве наполнителей и модификаторов использовались следующие материалы.

1. Аэросил — коллоидный диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), очень легкий микронизированный порошок с выраженными адсорбционными свойствами. «Аэросил» — торговое название, введенное в оборот химической компанией Evonik Degussa AG (Германия). Техническое название — пирогенная двуокись кремния.

2. Керамзит — легкий пористый строительный материал, получаемый путем обжига легкоплавкой глины.



3. Гидроксид алюминия — соединение оксида алюминия с водой. Белое студенистое вещество, плохо растворимое в воде, обладает амфотерными свойствами. Получают при взаимодействии солей алюминия с водными растворами щелочи, избегая их избытка. Высушенный гидроксид алюминия представляет собой белое кристаллическое вещество, нерастворимое в кислотах и щелочах. Применяется в качестве антипирена (подавителя горения) в пластиках и других материалах.

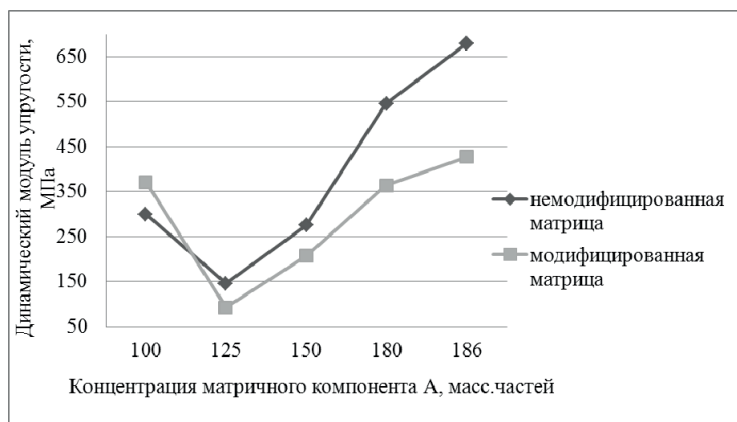
4. Кремнийорганическое соединение, в молекулах которого имеется связь между атомами кремния и углерода. Используется для производства смазок, полимеров, резин, каучуков, кремнийорганических жидкостей и эмульсий.

Направленное регулирование химического строения полимеров является одним из методов их совершенствования. Данный процесс может осуществляться сополимеризацией полимеров с другими мономерами. Их введение способствует увеличению подвижности сегментов макромолекул и приводит к повышению звукопоглощающих свойств.

С целью усиления упругих и звукопоглощающих свойств двухкомпонентная полиуретановая матрица модифицировалась путем введения кремнийорганического соединения (КО).

В результате химической реакции полиэтиленполиамин с полиизоцианатом образуется гель-фракция, которая в дальнейшем выступает в роли дополнительного источника диссипации колебательной энергии.

На рис. 1 показано влияние модифицирующей добавки (10 масс.ч.) на динамический модуль упругости ( $E_d$ ) полиуретанового КМ с различной концентрацией матричных компонентов.



**Рис. 1.** Влияние модифицирующей добавки (10 масс.ч.) на  $E_d$  полиуретановых матричных КМ с различной концентрацией матричных компонентов

Как видно из графика на рисунке 1, динамический модуль упругости модифицированного полиуретанового КМ изменяется экстремально от резкого убывания к возрастанию. Динамический модуль упругости почти всех немодифицированных составов выше, чем у немодифицированных. Это говорит о том, что модификация улучшила упругие свойства полиуретановой матрицы.

**Влияние модификатора (10 масс.ч.) на коэффициент звукопоглощения матричного полиуретанового КМ**

Модификатор	Компонент А	Компонент Б	Коэффициент звукопоглощения $K_3$		
			630 Гц	1000 Гц	1600 Гц
Отсутствует	125	100	0,15	0,30	0,06
КО 10 масс.ч.	125	100	0,19	0,35	0,08

Из табл. 1 видно, что образец с концентрацией матричных компонентов А : Б = = 125:100 и модифицированный кремний с органической добавкой в размере 10 масс.ч. обладает коэффициентом звукопоглощения выше, чем немодифицированный состав.

Усиление звукопоглощающих свойств с введением комплексной реакционно-способной добавки связано со снижением скорости распространения волн в полимере. Кроме того, такое содержание кремнийорганического соединения (10 масс.ч.) помогает снизить горючесть материала, что расширяет сферы его применения.

Известно, что вода является широко распространенным вспенивающим агентом полиуретанов. Количество воды, необходимой для активного газообразования полиуретановой матрицы, составляет 1 %. Пористая структура эффективно поглощает звуковые волны и гасит вибрацию.

В результате взаимодействия определенного соотношения матричных компонентов с модифицирующей добавкой образуется вспененный полиуретан. Вспененность композита объясняется чувствительностью изоцианатного компонента к воздействию влаги, которая изначально присутствует в уретанообразующем полиэфире, а также сорбируется из окружающего пространства.

Анализ данных, полученных в результате исследования, показал целесообразность модифицирования полиуретановой матрицы однокомпонентной модифицирующей добавкой в концентрации 10 масс.ч. и введение 1 % воды для получения КМ с повышенными звукопоглощающими и упругими свойствами по сравнению с матричными полиуретановыми композитами. Все последующие составы наполненных композиционных материалов базируются на полиуретановой композиции модифицированной 10 масс.ч. КО соединения и 1 % воды.

В табл. 2 представлены составы образцов композиционных материалов с различным соотношением наполнителей, а также результаты исследования их коэффициента звукопоглощения и динамического модуля упругости.

При рассмотрении результатов испытаний образцов 1–5 видно, что с увеличением концентрации матричного компонента А происходит рост динамического модуля упругости, что связано с повышением степени сшивания полиуретанового мономера.

В результате исследования ненаполненных модифицированных полиуретановых составов с различным соотношением компонентов А : Б установлено, что наибольшим коэффициентом звукопоглощения  $K_3$  обладает матричный модифицированный состав с соотношением компонентов 125:100. Этот же состав показал наименьший модуль упругости  $E_d$ , а значит, наилучшие вибропоглощающие свойства среди остальных образцов.

Последующее наполнение этого состава аэросилом, керамзитом и гидроксидом алюминия увеличило коэффициент звукопоглощения и уменьшило динамический модуль упругости. Следует отметить, что при увеличении объемного содержания

наполнителя одновременно увеличиваются и звукопоглощающие, и вибропоглощающие свойства образцов. Но рост происходит неравномерно.

Таблица 2

**Составы образцов композиционных материалов с различным соотношением наполнителей и результаты исследования их коэффициента звукопоглощения и динамического модуля упругости**

№ образца	Соотношение компонентов модифицированной матрицы, масс.ч.		Наполнитель и его содержание (масс. ч)	Коэффициент звукопоглощения $K_3$ в частотном диапазоне, Гц			Динамический модуль упругости $E_d$ , МПа
	А(ГСС)	Б(ПФП)		630	1000	1600	
1	186	100	–	0,07	0,07	0,05	426
2	175	100	–	0,04	0,11	0,04	364
3	150	100	–	0,06	0,11	0,01	207
4	125	100	–	0,15	0,3	0,06	93
5	100	100	–	0,08	0,14	0,03	371
6	125	100	Аэросил; 0,1	0,35	0,12	0,08	761
7	125	100	Аэросил; 0,2	0,43	0,37	0,26	165
8	125	100	Аэросил; 0,3	0,48	0,57	0,46	95
9	125	100	Керамзит; 0,1	0,25	0,27	0,017	328
10	125	100	Керамзит; 0,3	0,42	0,28	0,22	110
11	125	100	Керамзит; 0,4	0,36	0,22	0,17	41
12	125	100	Гидроксид алюминия, 0,2	0,25	0,21	0,2	338
13	125	100	Гидроксид алюминия, 0,3	0,33	0,75	0,05	326

Материалом с наилучшими звукопоглощающими свойствами ( $E_d = 41$  МПа), является образец № 11, но его коэффициент звукопоглощения на всем исследуемом звуковом диапазоне не превысил значения 0,36. Это означает, что этот материал является хорошим вибропоглощающим материалом, но недостаточно эффективным звукопоглотителем.

Материалом с наилучшими звукопоглощающими свойствами является образец № 13. Максимум коэффициента звукопоглощения приходится на частоту 1000 Гц и составляет 0,75. Следует отметить, что на других частотах коэффициент звукопоглощения этого образца показывает гораздо меньшие значения. Динамический модуль упругости равен 326 МПа, что говорит о низкой виброгасящей способности.

Наилучшим из исследуемых наполненных композиционных материалов на основе модифицированной полиуретановой матрицы является образец № 8, так как на всем частотном диапазоне 800...1 600 Гц он показал стабильные показатели коэффициента звукопоглощения, увеличивающегося с повышением массы наполнителя до значения 0,57. Модуль упругости образца № 8 равен 95 МПа, что означает хорошую вибропоглощающую способность.

Анализ полученных данных показал целесообразность модифицирования полиуретановой матрицы однокомпонентной модифицирующей добавкой в концентрации 10 масс.ч. ее и последующее наполнение для получения КМ с повышенными звукопоглощающими и упругими свойствами.

## Литература

- [1] Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Фомин Н.Е. *Вибропоглощающие композиционные материалы*. Саранск, Изд-во Мордов. ун-та, 2001, 96 с.
- [2] Черкасов В.Д. *Строительные композиты с повышенными вибро-поглощающими свойствами*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1995, 40 с.
- [3] Жарин Д.Е. *Научные основы получения вибропоглощающих строительных материалов*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2006, 45 с.
- [4] Новиков В.У. *Полимерные материалы для строительства: справочник*. Москва, Высш. шк., 1995, 448 с.
- [5] Барт В.Е., Санина Г.С., Шевчук С.А. *Применение полимербетонов в станкостроении*. Москва, ВНИИТЭМР, 1985, 40 с.
- [6] Баженов Ю.М. *Бетон при динамическом нагружении*. Москва, Стройиздат, 1970, 272 с.

УДК 621.22

## Анализ факторов, влияющих на выбор поверхностного слоя материала сопряженных деталей пар трения

© Гаврилова Вероника Сергеевна, Воронов Сергей Андреевич

Россия, Владимирская обл., г. Ковров,  
АО «Всероссийский научно-исследовательский институт “Сигнал”»

[Nika18081991@mail.ru](mailto:Nika18081991@mail.ru)

*Рассмотрены и проанализированы общие сведения о выборе покрытий и методов поверхностного упрочнения деталей пар трения. На основе общих рекомендаций по выбору поверхностных слоев материалов, учитывающих условия работы пар трения, проведен анализ режимов нагружения и подбор покрытий пары трения аксиально-поршневой гидромашины поршень — отверстия блока цилиндров. Установлено, что для рассматриваемой пары трения можно рекомендовать фторопластовое покрытие.*

**Ключевые слова:** пара трения, фторопластовое покрытие, поверхностный слой, режим нагружения.

В процессе эксплуатации отдельные детали машин и механизмов изнашиваются под воздействием сил трения, нагрузок и условий работы. Основная причина неисправностей механизмов — износ сопрягаемых деталей. Процесс изнашивания сопровождается изменением размеров и формы деталей, возникновением дополнительных динамических нагрузок и вибраций, усталостью рабочих поверхностей и концентрацией напряжений. Поэтому повышение эксплуатационных характеристик машин и механизмов за счет снижения износа применяемых в них пар трения в настоящее время является актуальной задачей.

Один из наиболее эффективных путей решения этой задачи — снижение трения и повышение износостойкости за счет применения антифрикционных покрытий и

поверхностной обработки. Правильно подобранные материалы сопряженных поверхностей способны в разы снизить трение, а следовательно, и износ деталей. Именно поэтому необходим такой выбор сочетаний покрытий и материалов, которые бы обеспечивали не только приемлемые потери на трение, но и стабильную работу покрытий при заданных условиях нагружения пар трения.

Для выбора материалов поверхностей пар трения требуется оценить их режимы нагружения: давление в контакте и гидравлической системе; относительные скорости скольжения поверхностей трения; температуру рабочей жидкости и поверхностей трения в местах контакта.

Применение всех антифрикционных покрытий ограничено их физико-механическими свойствами, которые в свою очередь определяют возможные режимы нагружения пар трения при применении тех или иных покрытий. Так, например, дисульфид молибдена используют при больших перепадах температур ( $-180...+400$  °C) и высоких удельных нагрузках, а цинковые сплавы в паре со сталью склонны к заеданию, что ограничивает их применение при малых нагрузках [1].

При высоких температурах возможно применение газотермического напыления, при сухом трении до  $500$  °C — сочетание твердых материалов с мягкой связкой (карбид вольфрама — кобальт или никель), при повышенных температурах (до  $900$  °C) — карбид хрома — нихром.

Важным этапом правильного выбора покрытий и методов поверхностной обработки является определение преобладающего вида износа, которому подвержены детали пар трения. Наиболее распространенный вид износа — абразивное изнашивание, сущность которого заключается в разрушении металла твердыми зёрнами абразива при пластическом деформировании и микрорезании трущихся поверхностей.

При интенсивном абразивном износе применяют покрытия с высокой твердостью. К ним можно отнести наплавочные материалы — хромоникелевые сплавы, содержащие бориды, карбиды, имеющие способность самофлюсоваться [2], а также композиционные электролитические покрытия [3]. Также абразивному изнашиванию значительно препятствуют материалы, способные к поглощению твердых частиц. Таким свойством обладают полимерные покрытия, в частности, фторопласт 4 легко поглощает твердые частицы абразива за счет очень низкого модуля упругости [4].

Еще одним видом износа является усталостное изнашивание — выкрашивание или отслаивание частиц материала с образованием ямок на поверхности из-за длительного нагружения переменными по величине и направлению усилиями. Сопротивление усталости антифрикционного слоя на стали повышается с уменьшением его толщины. Это объясняется упрочняющим влиянием стального основания, ограничивающего пластическую деформацию покрытия. Поэтому целесообразно доводить толщину антифрикционного слоя до оптимальной по соотношениям улучшения сопротивления износу [5].

При значительном усталостном изнашивании применение, например, хромовых покрытий ограничено их повышенной хрупкостью и низкой усталостной прочностью [6].

Для снижения усталостного износа применяют поверхностное упрочнение деталей пар трения, которое создает на поверхности сжимающее напряжение, что снижает вероятность возникновения трещин. К таким методам можно отнести обкатку поверхностей. Такая обработка снижает усталостный износ коррозионно-стойкой стали в 1,3 раза по сравнению с необработанной поверхностью [7]. Повышение усталостной прочности происходит также при лазерной термообработке. Для чугунов можно

достичь повышения прочности в 1,5 раза по сравнению с необработанной поверхностью [8].

Высокая стойкость к усталостному износу характерна поверхностям, упрочненным методами химико-термической обработки. Поверхностную твердость конструкционных сталей, обработанных таким методом, можно повысить до значений 7...17 ГПа [9].

Детали механизмов, работающих в экстремальных условиях, зачастую подвержены интенсивному как абразивному, так и усталостному износу, поэтому в некоторых случаях целесообразно сочетать поверхностное упрочнение и нанесение антифрикционных покрытий.

Наиболее часто выходу из строя пар трения способствует адгезионный износ или износ при заедании («схватывании»). Он заключается в том, что при локальном разогреве и пластической деформации контактирующих выступов разрушается защитная пленка и материалы трущихся поверхностей свариваются в области контакта микровыступов. «Схватывание» особо опасно для контакта двух твердых материалов. Для сталей и чугунов в условиях трения скольжения лучшим материалом сопряженной детали служат цветные металлы и сплавы, имеющие в структуре мягкую составляющую, которой могут служить включения олова, меди или свинца. Эти металлы «схватываются» со сталью, но адгезионные связи разрушаются по менее прочным цветным металлам [10].

Следующим шагом к выбору материалов поверхностного слоя деталей пар трения является определение условий смазки контактирующих поверхностей. В зависимости от наличия на трущихся поверхностях смазывающей жидкости различают жидкостное, полужидкостное, граничное и сухое виды трения. В условиях жидкостной смазки, когда поверхности деталей разделены несущим гидродинамическим слоем, коэффициент трения минимален, а износ практически отсутствует.

Когда поверхности трения разделены слоем смазки малой толщины (менее 0,1 мкм), не превышающем высоты микронеровностей поверхности, возникает граничное трение. В условиях граничного трения для удержания смазки на поверхности контакта пар трения возможно применение поверхностно-активных веществ. К ним относят соединения, содержащие карбоксильные группы, спирты, различные эфиры, смолы, сернистые соединения.

Если граничный слой разрушается, а нагрузка превышает силы сцепления смазочного материала с рабочей поверхностью детали, то в месте контакта возникают сухое трение и, как следствие, задиры, заклинивания.

Полужидкостное трение наблюдается в тех случаях, когда одновременно с жидкостным трением имеет место граничное, или сухое, трение. Такое трение характерно при пуске механизмов. Часто при пуске в условиях полужидкостного трения детали изнашиваются гораздо больше, чем после нескольких часов устоявшегося режима работы. В таких условиях применяют покрытия на основе графита, дисульфид молибдена, а также металлические покрытия с фторопластовым наполнителем.

На основании изложенного выше была разработана блок-схема с методикой выбора материалов поверхностного слоя деталей пар трения.

Для наглядного примера можно рассмотреть пару трения поршень — стенки отверстий блока цилиндров аксиально-поршневой гидромашин. В серийно выпускаемых гидромашинных поршни изготавливаются из стали 50ХФА, а в отверстия стального блока цилиндров запрессованы втулки из латуни ЛМцСКА-58-2-2-1-1. Схема сил, действующих на поршень и стенки отверстий блока цилиндров, представлена на рис. 1.

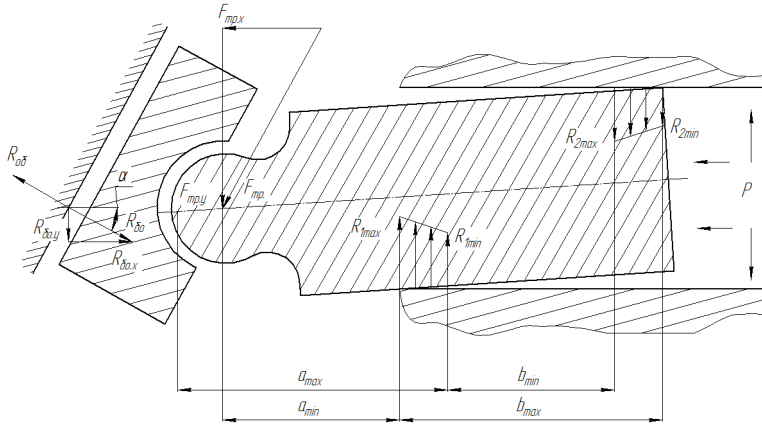


Рис. 1. Схема сил в паре трения поршень — стенки отверстий блока цилиндров

На выбранную пару трения оказывают воздействия силы, возникающие от взаимодействия поршня с башмаком и башмака с наклонным диском. Во время работы насоса между башмаком и поршнем возникает сила трения  $F_{тр}$ , с противоположной стороны на поршень действует сила давления рабочей жидкости  $P$  и, как следствие, возникает сила реакции опоры между башмаком и диском  $R_{об}$  и между поршнем и стенками отверстий блока цилиндров ( $R_1$  и  $R_2$ ). Максимальное контактное давление составляет 131,6 МПа, относительная скорость скольжения — 2,38 м/с, температура работы  $-70...+130$  °С.

В процессе трения происходит пластическая деформация поршня и стенок отверстий блока цилиндра до снижения давления до значения предела текучести трущихся поверхностей за счет увеличения длины контакта. При достижении значения давления, равного пределу текучести трущихся поверхностей, деформации становятся упругими. Так как предел текучести фторопластового покрытия ниже по сравнению с другими материалами (см. ниже), то приработка и наступление устоявшегося износа такого покрытия наступит гораздо быстрее, следовательно, и износ будет значительно меньше.

**Предел текучести материалов**

Материал .....	Фторопласт 4	ЛМцСКА	БрОФ7-0,2	М1М
$\sigma_T$ , МПа .....	10	245	140	70

В предложенной паре преобладает абразивный износ. Поршень после длительной работы изображен на рис. 2.

Поршень работает в условиях граничного трения, однако при пуске гидромашины наблюдается полужидкостное трение, что неблагоприятно сказывается на износостойкости деталей и способствует возможности возникновения адгезионного износа.



Рис. 2. Гидроабразивный износ поршня [11]

Проанализировав выше изложенные данные, можно предположить, что усовершенствование конструкции можно добиться путем замены латунных втулок на фторопластовое покрытие. Оно в значительной степени предохранит сопряженные детали от преобладающего абразивного износа, улучшит неблагоприятные условия смазки и позволит выдерживать режимы нагружения данной пары трения.

Для данных сопряженных деталей была разработана уточненная блок-схема методики выбора материалов поверхностного слоя деталей пар трения.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- снижение трения и повышение износостойкости деталей пар трения можно достичь за счет применения антифрикционных покрытий и поверхностной обработки;
- при правильном подборе покрытий и материалов можно обеспечить значительное снижение потерь на трение и стабильную работу механизмов при заданных режимах работы;
- выбор покрытий необходимо осуществлять исходя из анализа условий работы пар трения, к основным характеристикам которых можно отнести: вид износа, условия смазки и режимы нагружения;
- в частном случае для пары трения поршень — стенки отверстий блока цилиндров аксиально-поршневой гидромашины можно рекомендовать покрытие фторопласт 4.

## Литература

- [1] Лужков Л.П. *Материалы в машиностроении. Т. 1: Цветные металлы и сплавы*. Москва, Машиностроение; 1997, 304 с.
- [2] Сидоров А.В. *Восстановление деталей машин напылением и наплавкой*. Москва, Машиностроение; 1987, 192 с.
- [3] Беленький М.А., Иванов А.Ф. *Электроосаждение металлических покрытий*. Москва, Металлургия; 1985, 288 с.
- [4] Гарбар М.И. Пластмассы в машиностроении. Сб. ст. Москва, Машиностроение, 1964, 344 с.
- [5] Зильберг Ю.А., Бигиджанова А.П., Хрущов М.М. *Ускоренные испытания на усталость биметаллических образцов с антифрикционными сплавами. Сб. Усталость металлов*. Москва, Изд-во АН СССР, 1960, 213 с.
- [6] Шлугер М.А. *Гальванические покрытия в машиностроении*. Москва, Машиностроение; 1988, т. 1, 278 с.
- [7] Сатель Э.А. *Проблемы развития технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 1968, 592 с.
- [8] Макаров А.В., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л. Влияние лазерной обработки на структуру, износостойкость и усталостные свойства высокопрочного чугуна. *Физика и химия обработки материалов*. 2006, № 4, с. 46–55.
- [9] Петрова Л.Г., Александров В.А., Демин П.Е., Дробков В.П. Формирование композиционных наноструктурных покрытий на стальных деталях методами химико-термической обработки. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 2010, вып. 51.
- [10] Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. *Материаловедение*. Москва, Машиностроение; 1972, 528 с.
- [11] *Инновационный проект: Участок ремонта аксиально-поршневых гидронасосов*. ГОСНИТИ. URL: <http://www.gosniti.ru>. 26.06.15 (дата обращения 12.03.2015)



УДК 678

## Разработка технологии получения нанокompозита и исследование его свойств

© Карлова Полина Вадимовна, Скидченко Виктория Юрьевна,  
Нелюб Владимир Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[pkarlova@mail.ru](mailto:pkarlova@mail.ru), [skid4enko.viktoria@yandex.ru](mailto:skid4enko.viktoria@yandex.ru)

*Исследована технология получения нового полимерного нанокompозита на основе силоксанового каучука и многостенных углеродных нанотрубок (УНТ). Экспериментально определена термическая стабильность нового композиционного материала. Отработана технология получения нанокompозита, по результатам которой выбрана дисперсионная среда для диспергирования УНТ. Температура начала термической деструкции полученного полимерного нанокompозита по сравнению с исходным силоксановым каучуком была увеличена с 145,1 до 187,5 °С, потеря массы уменьшилась с 3,74 до 2,22 %.*

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, композиционные материалы, силоксановый каучук, термостойкость.

Полимерные композиционные материалы постепенно вытесняют традиционные металлы и сплавы и все шире используются в качестве конструкционного материала в самых различных отраслях промышленности и в строительстве [1–3]. Для повышения термической, радиационной стабильности полимерных матриц в их состав вводят углеродные наноматериалы (фуллерены, углеродные нанотрубки (УНТ), углеродные волокна) [4–6].

Для увеличения термической стабильности (диапазона рабочих температур и при этом наименьшей потери массы) силоксанового каучука был создан композиционный материал, в котором данный каучук выступает в качестве матрицы, а наполнителем служат многослойные УНТ.

Целью настоящей работы был выбор растворителя для диспергирования углеродных нанотрубок. Необходимо было добиться введения максимально возможного количества УНТ. Следует отметить, что введение углеродных наноматериалов (УНТ, фуллерены) в концентрации близкой к порогу перколяции (~1 %), сопряжено со значительными технологическими затруднениями, так как УНТ образуют плотные кластеры и агрегаты благодаря силам Ван-дер-Ваальса и своей геометрической форме. Для диспергирования УНТ применяются специальные экспериментальные технологии, в частности воздействие ультразвуком большой мощности.

Введение УНТ в силоксановую матрицу напрямую невозможно вследствие неравномерного распределения наполнителя по объему матрицы. Для проведения диспергирования УНТ, чтобы подготовить их к введению в матрицу, использовались различные вещества, называемые дисперсионной средой.

Для проведения экспериментальных исследований был использован метод введения многостенных УНТ марки Baytubes® C 150 P (Bayer) (до 1 %) в матрицу силиконового каучука марки П-9628-2 с помощью механической мешалки IKA RW20 digital.

Для решения поставленной задачи были изготовлены несколько образцов, в которых варьировалась дисперсионная среда (этанол, хлороформ, толуол, хлорбензол, дихлорэтан). УНТ смешивались с дисперсионной средой, и с помощью ультразвука создавалась устойчивая коллоидная система. Далее эта система смешивалась с помощью механической мешалки с матрицей. Затем исследовалась вязкость полученных образцов на вискозиметре CAP 2000+. В дальнейшем, эти образцы были исследованы методом термогравиметрического анализа (ТГА) на приборе Netzsch TG 209 F1 Perseus, оснащенный газовой кюветой с ИК-детектором BrukerAlpha, в алюминиевых тиглях Netzsch NGB810419.

Результаты экспериментальных исследований вязкости и температуры деструкции для различных типов растворителей приведены в таблице.

Свойства растворов УНТ

№ образца	Растворитель	Изменение массы, %	Температура деструкции, °С	Вязкость
0	—	3,74	145,1	—
1	Этанол	2,72	129,5	3,9
2	Этанол	3,93	109,5	5,2
3	Хлороформ	3,02	110,6	5,7
4	Толуол	2,37	140,1	4,8
5	Хлорбензол	78,13	199,8	11
6	Дихлорэтан	2,22	187,5	6,2

По результатам экспериментальных исследований наиболее подходящим веществом для использования в качестве дисперсионной среды определен дихлорэтан. Температура начала термической деструкции полученного полимерного нанокompозита, по сравнению с исходным силиконовым каучуком была увеличена с 145,1 до 187,5 °С, потеря массы уменьшилась с 3,74 до 2,22 %.

### Литература

- [1] Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3 (15), с. 25.
- [2] Малышева Г.В., Ахметова Э.Ш., Шимица Ю.Ю. Оценка температур фазовых переходов полимерных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2014, № 6, с. 29–33.
- [3] Беляков Е.В., Тарасов В.А., Боярская Р.В. Выбор режимов формования композитных конструкций ракетно-космической техники. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 2012, № 5, с. 37–43.
- [4] Малышева Г.В., Ахметова Э.Ш., Марычева А.Н. Оценка температуры стеклования эпоксидных связующих, модифицированных полисульфоном. *Физика и химия стекла*, 2014, т. 40, № 5, с. 718–724.
- [5] Комков М.А., Тарасов В.А., Зарубина О.В. Определение толщины композитного слоя сферической оболочки с учетом ширины наматываемой ленты. *Изв. вузов. Сер. Машиностроение*, 2013, № 10, с. 20–29.

- [6] Лурье С.А., Миронов Ю.М., Нелюб В.А., Бородулин А.С., Чудной И.В., Буянов И.А., Соляев Ю.О. Моделирование зависимостей физико-механических характеристик от параметров микро- и наноструктуры полимерных композиционных материалов. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2012, № 6, с. 38.

УДК 541.64:539.3

## Межслоевая трещиностойкость полимерных композиционных материалов

© Крылов Владимир Дмитриевич<sup>1</sup>, Курганова Юлия Анатольевна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Государственного научного центра Российской Федерации

<sup>2</sup> Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[krylov.vladimir@gmail.com](mailto:krylov.vladimir@gmail.com)

*Для конструкционных ПКМ на основе углеродных жгутов HTS45, T800 и тканей Porsher apt. 4510, 3692, 14535, 7781 с высокодеформативной эпоксидной матрицей ВСЭ-1212 с повышенной вязкостью разрушения и триазиновой (изоциануратной) матрицей ВСТ-1208 определены значения межслоевых трещиностойкостей  $G_{IC}$  и  $G_{IIC}$ , проведен фрактографический анализ изломов.*

**Ключевые слова:** слоистый полимерный композиционный материал, трещиностойкость, межслоевая вязкость разрушения, отрыв, продольный сдвиг, мода I, мода II.

Одной из важных характеристик ПКМ, оцениваемой при паспортизации и специальной квалификации, является межслоевая вязкость разрушения [1]. При определении данной характеристики, исходя из условий приложения нагрузки на образец, где наряду с характеристиками сдвига в плоскости листа [2] и удара падающим грузом [3] нагружаются наиболее слабые места — матрица и межфазная зона.

Проведены испытания углепластиков ВКУ-25, ВКУ-28, ВКУ-29, ВКУ-39, ВКУ-27 л и стеклопластиков ВПС-47/7781 и ВПС-48/7781 по методам DCB (рис. 1) и ENF на универсальной электродинамической испытательной машине Instron ElectroPuls E10000. По методу DCB определены критические значения межслоевой вязкости разрушения (удельной работы расслоения)  $G_{IC}$  при испытании в условиях разрушения по моде I (нагружение отрывом) образца в виде двухконсольной балки. В данном методе трещина расслоения распространяется за счет действия только нормальных напряжений. Усилие раскрытия прикладывается к образцу через петли, блоки нагружения или вилки, приклеиваемые к противоположным поверхностям на одном конце образца.

Межслоевую вязкость разрушения по моде II определяли по методу ENF.

В результате проведенных исследований определены экспериментальные значения характеристик трещиностойкости  $G_{IC}$  и  $G_{IIC}$ , а также коэффициенты вариации  $v$ . В большинстве случаев коэффициенты вариации для характеристик  $G_{IC}$  и  $G_{IIC}$  превышают 5 %, а для некоторых случаев, например, углепластиков ВКУ-25 и ВКУ-39,

коэффициент вариации превышает 10 %, что свидетельствует о высокой нестабильности процессов страгивания и роста межслоевой трещины в ПКМ как на основе тканого, так и жгутового наполнителя. Причиной этого могут являться повышенная дефектность полимерной матрицы, возникшая в процессе производства ПКМ, низкие деформативно-прочностные характеристики межфазной зоны, а также стеснение полимерной матрицы волокном. Установлено, что углепластики ВКУ-39 и ВКУ-29 обладают наибольшими значениями характеристик трещиностойкости. Так, углепластик ВКУ-39 на основе равнопрочной ткани обладает максимальной работой расслоения при отрыве (мода I), углепластик ВКУ-29 на основе однонаправленной ткани — максимальной работой расслоения при продольном сдвиге (мода II).

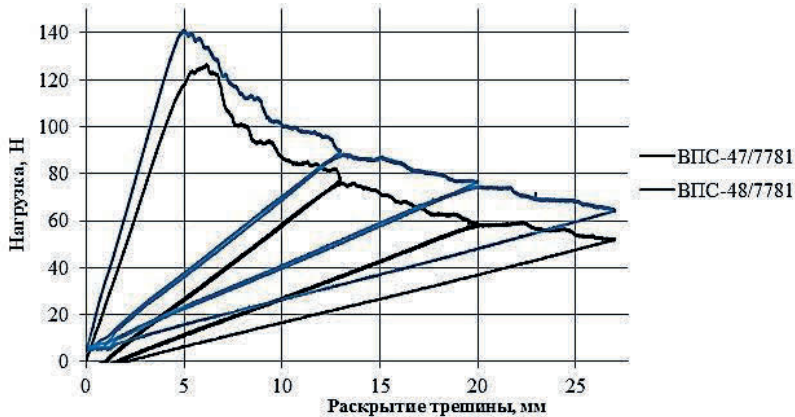


Рис. 1. Диаграммы «нагрузка — раскрытие трещины» для образцов стеклопластика ВПС-47/7781 и ВПС-48/7781

Фрактографический анализ изломов стеклопластиков после испытаний на статическую трещиностойкость (рис. 2) показал, что рельеф поверхностей изломов более выражен при разрушении по моде II. Характерными особенностями поверхностей разрушения стеклопластиков при испытании на  $G_{II}$  являются так называемые «гребни» (в иностранной литературе *cusp* или *hackle*). Формирование подобных структур связано с действием на участке перед вершиной магистральной трещины растягивающих напряжений, под углом  $45^\circ$  к плоскости распространения трещины. В результате перед вершиной трещины образуются вытянутые полости, расположенные под углом  $45^\circ$  к плоскости армирования, которые затем объединяются с образованием гребней.

Повышение пластичности матрицы приводит к увеличению размеров гребней и уменьшению их количества. Соответственно для участков с высокой плотностью упаковки волокон характерно формирование множества гребней относительно небольшого размера, для участков с низкой плотностью упаковки волокон — формирование небольшого количества крупных гребней.

Показано, что существующие методы расчета трещиностойкостей  $G_{IC}$  и  $G_{IIC}$  с учетом коэффициентов вариации дают сравнимые результаты для современных конструкционных ПКМ. В то же время значение коэффициента вариации в ряде случаев превышает значение 10 %, что может свидетельствовать о сильной нестабильности процессов межслоевого разрушения, а именно о зарождении трещины и ее роста в полимерной матрице и межфазной зоне.

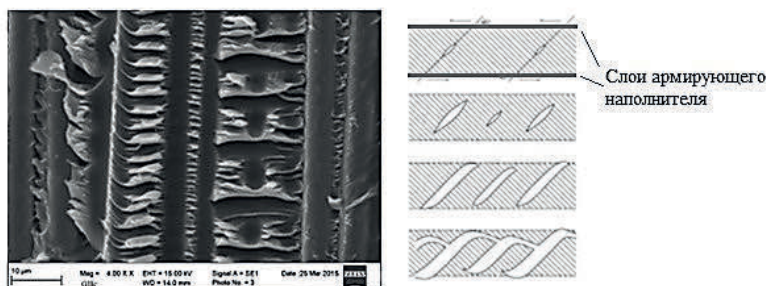


Рис. 2. Микроструктура образцов стеклопластика ВПС-47/7781

Полученные значения характеристик статической трещиностойкости показали, что для современных конструктивных ПКМ с армирующим наполнителем в виде равнопрочной ткани отношение  $G_{IIc}/G_{Ic}$  находится в диапазоне от 1,4 до 1,7, а для ПКМ с наполнителем в виде углеродного жгута и однонаправленной ткани (преимущественное распределение волокон в направлении основы) отношение находится в диапазоне от 2,2 до 3,7 (табл. 1).

Таблица 1

Отношения трещиностойкостей ПКМ

Материал	Тип армирующего наполнителя	$G_{IIc}/G_{Ic}$	
		Минимальное значение	Максимальное значение
ВПС-47/7781	Равнопрочная ткань	1,4	1,5
ВКУ-39		1,6	1,7
ВКУ-25	Углеродный жгут	2,2	2,4
ВКУ-27л	Однонаправленная ткань	2,9	3,1
ВКУ-28	Углеродный жгут	3,0	3,1
ВКУ-29	Однонаправленная ткань	3,4	3,7

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.595.21.0002 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор № RFMEFI59514X0002, с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания ФГУП ВИАМ».*

### Литература

- [1] Крылов В.Д., Яковлев Н.О., Курганова Ю.А., Лашов О.А. Межслоевая трещиностойкость конструктивных полимерных композиционных материалов. *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 4.
- [2] Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Крылов В.Д., Попов Ю.А. Методы определения сдвиговых характеристик полимерных композиционных материалов. *Авиационная промышленность*, 2014, № 1, с. 20–23.
- [3] Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В., Гончаров А.А. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом. *Авиационные материалы и технологии*, 2013, № 3, с. 60–64.

## Особенности процесса пропитывания при изготовлении деталей двойной кривизны из полимерных композиционных материалов

© Пье Пху Маунг, Марычева Антонина Николаевна,  
Малышева Галина Владленовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[tonyamarycheva@yandex.ru](mailto:tonyamarycheva@yandex.ru)

*Показано, что на продолжительность процесса пропитывания большое влияние оказывают технология подачи связующего и угол, под которым связующее проходит по ткани. Установлено, что при фронтальной подаче связующего и уменьшении сетевого угла имеет место увеличение продолжительности процесса пропитывания, а при подаче связующего под углом  $45^\circ$  имеет место противоположная зависимость, при уменьшении сетевого угла время процесса пропитывания также уменьшается.*

**Ключевые слова:** углепластики, стеклопластики, пропитка, сетевой угол, моделирование, метод конечных элементов.

Прямые методы формования, такие как пропитка под давлением (Resin Transfer Molding, RTM), пропитка под вакуумом (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, VARTM) и др., получают все большее применение, что связано с их экономичностью и высоким качеством изготавливаемых изделий [1–3]. По сравнению с препреговыми технологиями, такие методы не позволяют оценить качество процесса пропитывания до момента получения готового изделия. При разработке технологических режимов с использованием прямых методов формования чаще всего используется метод «проб и ошибок», что существенно удлинняет продолжительность процесса разработки технологических режимов и приводит к перерасходу материалов [4, 5].

Цель настоящей работы состоит в моделировании скорости пропитывания связующим тканых наполнителей при изготовлении деталей двойной кривизны из стекло- и углепластиков.

В настоящей работе использовалось программное обеспечение PAM-RTM. Для проведения моделирования в стандартных пакетах 3D-графики, например, в пакете Solid Works, строится геометрическая модель изделия. Далее она транслируется в пакет конечно-элементного анализа Ansys, где стандартным образом разбивается на конечные элементы. Следующим шагом является перенос созданной модели в программу PAM-RTM, где задаются свойства исходных материалов.

В работе проведено моделирование кинетики процесса пропитывания в зависимости от двух факторов: сетевого угла и угла, под которым подается связующее.

В результате проведенных расчетов установлено, что на продолжительность процесса пропитывания большое влияние оказывает угол, под которым связующее проходит по ткани. При фронтальной подаче связующего и уменьшении сетевого угла имеет место увеличение продолжительности процесса пропитывания.

При подаче связующего под углом  $45^\circ$  имеет место противоположная зависимость и при уменьшении сетевого угла время процесса пропитывания также уменьшается. Для образца из стеклянной ткани, наименьшее время (при фронтальной пропитке) составляет 141 с, а при изменении угла подачи связующего с  $90$  до  $45^\circ$  продолжительность уменьшилась до 96 с. Время пропитывания углеродной ткани меньше, чем стеклянной, и при фронтальной пропитке его наименьшее значение составляет 64 с. Изменение угла подачи связующего приводит к уменьшению времени процесса пропитывания до  $45$  с.

Особенностью изделий двойной кривизны является различие в значениях сетевых углов в различных точках изделия, что приводит к изменению линейной плотности и неравномерности процесса пропитывания (рис. 1). В зависимости от используемой технологии формования (RTM или VARTM) имеет место изменение кинетики процесса пропитывания. Наименьшее время пропитывания для одного и того же изделия получено при использовании технологии RTM, которое на 25 % меньше, чем при использовании технологии VARTM.

В работе исследовано влияние на кинетику процесса пропитывания типа используемого тканого наполнителя и установлено, что при пропитывании стеклянных тканей требуются большие временные затраты, чем при пропитывании углеродных тканей (для одного и того же типа переплетения).

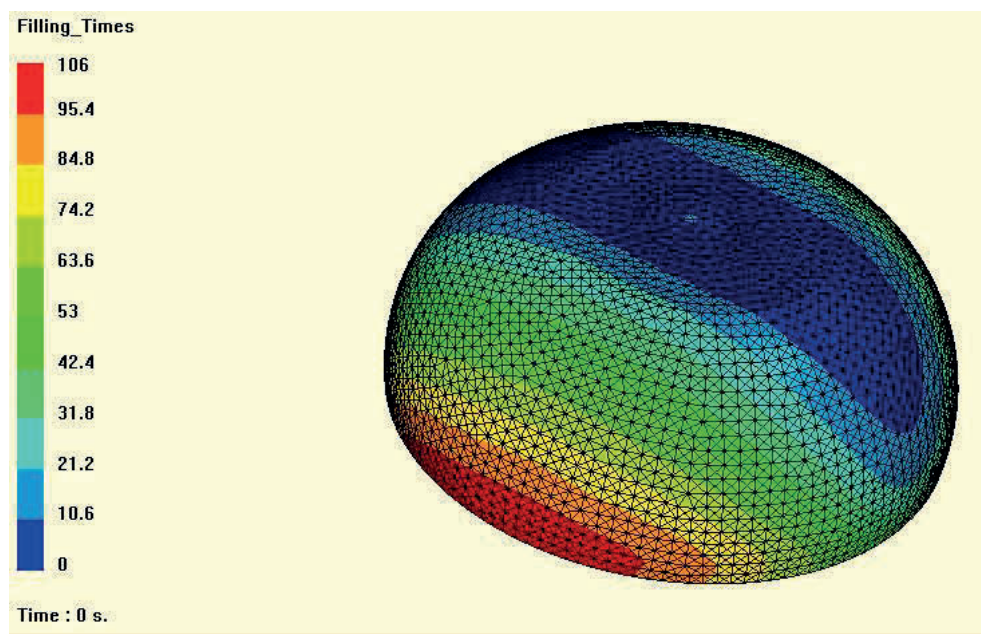


Рис. 1. Результаты моделирования времени процесса пропитывания

В результате проведенных расчетов установлено, что на продолжительность процесса пропитывания большое влияние оказывает технология подачи связующего и угол, под которым связующее проходит по ткани. При фронтальной подаче связующего, при уменьшении сетевого угла имеет место увеличение продолжительности процесса пропитывания.

## Литература

- [1] Бородулин А.С., Малышева Г.В., Романова И.К. Оптимизация реологических свойств связующих, используемых при формовании изделий из стеклопластиков методом вакуумной инфузии. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2015, № 3, с. 40–44.
- [2] Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3 (15), с. 25.
- [3] Михайловский К.В., Резник С.В., Юрченко С.О. Прогнозирование зарождения и эволюции дефектов в материалах композитных конструкций многоразовых космических аппаратов на основе многомасштабного математического моделирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 5, с. 30–43.
- [4] Миронов Ю.М., Храповицкая Ю.В., Макеев М.О., Нелюб В.А., Бородулин А.С., Чуднов И.В., Буянов И.А. Оценка структурных дефектов углеродных волокон и полимерных композиционных материалов на их основе. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, № 11, с. 57.
- [5] Малышева Г.В., Ахметова Э.Ш., Шимица Ю.Ю. Оценка температур фазовых переходов полимерных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2014, № 6, с. 29–33.

УДК 629.7.083.02

## Экспериментальные исследования лопастей ЛБВ 1 на стойкость к повреждениям при низких температурах

© Рогов Николай Викторович, Сафин Альберт Мирсалимович

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

[nik\\_rogov\\_78@mail.ru](mailto:nik_rogov_78@mail.ru)

*В статье рассмотрены исследования долговечности лопастей из композиционных материалов воздушных винтов турбовинтовых двигателей с повреждениями от посторонних предметов. Излагается методика проведения экспериментальных исследований ударной стойкости лопастей ЛБВ 1 к повреждению твердыми частицами при низких температурах. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для совершенствования конструкции лопасти с точки зрения повышения ударной стойкости.*

**Ключевые слова:** воздушный винт, композиционный материал, ударная вязкость, низкая температура, посторонние предметы

В настоящее время широко используются лопасти из композиционных материалов. Они имеют следующие преимущества:

- возможность создавать и точно выдерживать при изготовлении оптимальную форму профиля лопасти;
- значительно больший ресурс и надежность вследствие большей удельной прочности материала и нечувствительности к концентраторам напряжений;



- медленное и ограниченное распространение усталостных трещин;
- высокую эрозионную и коррозионную стойкость;
- внутреннее демпфирование, полезное для поглощения энергии колебаний;
- высокую технологичность и меньшую трудоемкость изготовления.

Но при этом для силовых установок с воздушным винтом (ВВ) существует проблема повреждения твердыми частицами лопастей из композиционного материала (КМ). Рассматриваемая категория двигателей преимущественно устанавливается на воздушные суда военно-транспортной авиации. Для воздушных судов военной авиации, которые применяются, в том числе и в районе боевых действий, существует вероятность повреждения элементов силовой установки пулями и осколками снарядов. Это обстоятельство позволяет считать боевую живучесть военно-транспортного воздушного судна одним из основных его свойств, а характеристики средств поражения и условия их воздействия включать в исходные данные при модернизации и проектировании самолета [1].

При проведении испытаний делается серия опытов при постепенно понижающейся температуре до перехода материала в хрупкое состояние. Чем ниже эта температура — «критическая температура хрупкости», — тем выше сопротивление материала хрупкому разрушению. Охлаждающими смесями могут быть: сухая углекислота, дающая температуру до  $-70$  °С; жидкий воздух  $-183$  °С; жидкий азот позволяет получить температуру  $-195$  °С; жидкий водород  $-252$  °С. Проведение эксперимента исследований ударной стойкости лопастей ВВ проводилось в два этапа. Первый этап — нанесение повреждений лопасти ВВ высокоскоростными твердыми частицами (осколок). Второй этап — определение повреждений. Экспериментальные исследования проводились, на лабораторной базе ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» с помощью пневматического метательного устройства для метания тел, имитирующих посторонние предметы (ПП), и дефектоскопов.

Для удобства метания ствол в установке выполнен легкоъемным, и его диаметр равен 33 мм. Максимальный размер метаемого тела составляет до 90 % внутреннего диаметра ствола, что позволяет метать практически весь спектр ПП, находящихся на взлетно-посадочной полосе, а также авиационные средства поражения. Максимальная скорость метания при использовании в качестве рабочего тела воздуха составляет 300 м/с и 1350 м/с при использовании гелия.

Во время испытания температура изменялась в широком диапазоне  $-70...+20$  °С. Охлаждение ВВ до  $-70$  °С достигалось в специальном холодильнике с помощью сухой углекислоты.

При выборе контроля предпочтение отдают эхо-методу — как наиболее точному. Продольный и поперечный вид акустических волн применяют для объектов, толщина которых значительно превосходит длину волны. Продольные волны используют при вводе волн в ВВ по нормали или близким к ней углам; поперечные — когда потребный угол ввода более  $35^\circ$  к нормали. При контроле одних и тех же участков целесообразно последовательно использовать несколько углов ввода для получения достоверных результатов [2].

Настройка чувствительности обычно сводится к тому, что, перемещая преобразователь по образцу, добиваются максимальной амплитуды эхо-сигнала от искусственного дефекта (в крайнем случае, при отсутствии образца, — максимальной амплитуды данного сигнала). После этого органами управления индикатором добиваются того, чтобы соответствующий импульс занимал по вертикали  $2/3...1/2$

экрана. Развертку дефектоскопа настраивают так, чтобы на экране по горизонтали наблюдать только ту область, в которой предполагаются дефекты. Поиск дефектов ведут путем прямолинейного возвратно-поступательного перемещения (сканирования) преобразователя по заданному участку поверхности ВВ. Скорость сканирования обычно составляет 0,05...0,2 м/с [3].

Определение местоположения дефекта сводится к поиску положения преобразователя, соответствующего максимальной амплитуде эхо-сигнала. При этом используют два основных способа:

1) ставится задача найти искусственный дефект, залегающий на той же глубине, что и естественный, и дающий эхо-сигнал такой же амплитуды;

2) ставится задача найти некоторые положения преобразователя, связанные с положением крайних точек искусственного дефекта. При этом размеры искусственного дефекта аналогичны естественному дефекту.

Ударная вязкость уменьшается с уменьшением температуры. С другой стороны, ВВ после 5 дней воздействия низких температур показывают, что поглощение энергии удара несколько ниже, чем образцы с одним выходным днем, воздействующие на температуру. Путем дефектоскопического осмотра было обнаружено, что механизм разрушения изменяется от матрицы растрескивания при комнатной температуре к расслаиванию, и при низких температурах происходит обрыв волокна. Результаты данного исследования показали, что механические свойства композитов различны при статических и динамических нагрузках при низких температурах. Это происходит потому, что материал становится более хрупким при понижении температуры и в меньшей степени способен притупить трещины и, следовательно, композитный материал поглощает меньше энергии во время испытания на удар. Результаты экспериментальных исследований по определению стойкости лопастей воздушных винтов к повреждениям твердыми частицами могут быть использованы в дальнейшем для совершенствования конструкции лопасти с точки зрения повышения ударной стойкости.

### Литература

- [1] Пахомов С.В., Сафарбаков А.М. *Методы и средства защиты газотурбинных двигателей воздушных судов от попадания посторонних предметов*. Ч. 2. Иркутск, ИрГУПС, 2011, 156 с.
- [2] Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики. *Контроль. Диагностика*, 2012, № 6, с. 15–16.
- [3] Чижев И.А., Крылов А.А., Карпенко О.Н., Заец Н.П. Неразрушающий контроль многослойных элементов планера воздушного судна. *Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств технического обслуживания летательных аппаратов: Матер. Всерос. науч.-практ. конф.* Воронеж, ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014, с. 269–273.

УДК: 677.017.8: 629.786

## Исследование формообразующих свойств углеродных и стеклянных тканей

© Пье Пху Маунг, Тумасова Мария Сергеевна,  
Малышева Галина Владленовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[pyaephyvo@mail.ru](mailto:pyaephyvo@mail.ru)

*В работе представлены результаты исследования одного из показателей формообразующей способности ткани — драпируемости и ее анизотропии для трех типов технических тканей на основе углеродного, стеклянного и органического волокна. Экспериментально определены численные значения характеристик драпируемости. На основе экспериментальных данных установлена зависимость между характеристиками драпируемости и типом ткани, схемой ее переплетения и плотности, а также влияние выбранного направления оценки драпируемости на значения ее характеристик.*

**Ключевые слова:** *формообразующие свойства, драпируемость, анизотропия драпируемости, коэффициент драпируемости, тип плетения.*

В настоящее время проводятся многочисленные исследования по разработке конструкций, материалов и технологий производства разворачиваемых космических модулей [1] из полимерных композиционных материалов. По своим конструкциям такие модули напоминают сложенный зонтик и в зависимости от формообразующих характеристик используемых тканей при сложении таких зонтичных конструкций они образуют многочисленные складки, что может значительно увеличить габаритные размеры модуля в сложенном виде. Одним из показателей тканей, характеризующих ее формообразующую способность, являются характеристики драпируемости, значения которых для технических тканей (стеклянных, углеродных, органических) не известны.

Целью работы является экспериментальная оценка характеристик драпируемости стеклянных и углеродных тканей.

В качестве объектов исследований выбраны три типа тканей на основе углеродного (ИС 350, СТ12016), стеклянного (марок ЕЕ380, ЕЕ106, ORTEX 360, АРМАТОНТХ-700) и органического (СВМ) волокон, которые нашли широчайшее применение при изготовлении изделий самого различного назначения из полимерных композиционных материалов [2-5].

Для оценки характеристик драпируемости из выбранных тканей вырезали образцы в форме круга диаметром  $200 \pm 1$  мм и вычерчивали на них несколько окружностей меньшего диаметра, на которых далее проводили разметку под различными углами с шагом от  $10^\circ$  ( $\alpha$ ), до  $350^\circ$  в направлении нитей основы. Значение угла  $0^\circ$  соответствует направлению нитей основы; значение угла, равное  $90^\circ$ , соответствует направлению нитей утка. На пересечении прямых с окружностями нанесли кон-

трольные точки, позволяющие наглядно определить характер драпируемости. Подготовленные образцы тканей закреплялись на вертикальном штоке и без дополнительных внешних нагрузок, только под действием собственной массы, и тогда на тканях образовывались складки. Такой способ позволяет не только определить количество складок и их глубину, но и оценить драпируемость одновременно в разных направлениях и ее анизотропию. Продолжительность закрепления образца каждого типа ткани составляла 15 мин. По истечении этого времени с помощью камеры фотографировался вид образцов сверху. Сделанные фотографии использовались для построения диаграмм анизотропии драпируемости. Количество исследуемых образцов каждого типа ткани составляло 3 шт. Каждая точка диаграмм драпируемости определялась как среднее значение, полученное в результате из трех опытов. Полученные значения коэффициентов драпируемости приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Значения коэффициентов драпируемости для стеклянных, углеродных и органических тканей**

Марка ткани	Коэффициенты драпируемости, % в направлении		
	0°	45°	90°
<i>Стеклянные ткани</i>			
ЕЕ380	20	38	20
ORTEX 300	63	26	8
ЕЕ 106	37	67	51
АРМАТОН ТХ-700	12	61	67
<i>Углеродная ткань</i>			
СТ 12016	18	33	18
<i>Органическая ткань</i>			
СВМ	40	70	36

Как следует из полученных данных, значения коэффициентов драпируемости существенным образом зависят от типа ткани, схемы ее плетения и угла, при котором оценивалась драпируемость. Для всех исследованных типов тканей, за исключением триаксиальной ткани марки АРМАТОН ТХ-700, наименьшие значения коэффициентов драпируемости получены при углах 0 и 90°, а наибольшие при угле, равном 45°.

Для тканей саржевого переплетения наибольшая драпируемость наблюдается под углом 45° к нитям основы, однако, в зависимости от толщины ткани и линейной плотности, глубина складки меняется. С ростом этих характеристик драпируемость ухудшается. Наилучшим образом драпируется триаксиальная стеклоткань: меньшая глубина складок наблюдается в направлении 0°, однако с увеличением диаметра образца рост массы волокон в направлении 0° положительно влияет на драпируемость.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что ткани, состоящие из волокон различной химической природы, хорошо драпируются в одних и тех же направлениях при одинаковом типе переплетения. По полученным характеристикам драпируемости разработаны рекомендации по складыванию тканей в зонтичных конструкциях.

## Литература

- [1] Волков Е.О., Разина А.С., Нехороших Г.Е. Разработка модели каркаса развертываемого объемного модуля на основе упругих элементов из полимерного композиционного материала. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2012, № 8, с. 31–33.
- [2] Михайловский К.В., Резник С.В., Юрченко С.О. Прогнозирование зарождения и эволюции дефектов в материалах композитных конструкций многоразовых космических аппаратов на основе многомасштабного математического моделирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 5, с. 30–43.
- [3] Миронов Ю.М., Храповицкая Ю.В., Макеев М.О., Нелюб В.А., Бородулин А.С., Чуднов И.В., Буянов И.А. Оценка структурных дефектов углеродных волокон и полимерных композиционных материалов на их основе. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, № 11, с. 57.
- [4] Бородулин А.С., Малышева Г.В., Романова И.К. Оптимизация реологических свойств связующих, используемых при формовании изделий из стеклопластиков методом вакуумной инфузии. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2015, № 3, с. 40–44.
- [5] Александров И.А., Муранов А.Н., Малышева Г.В. Изучение влияния деформационных свойств связующих на процессы разрушения углепластиков. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2012, № 7, с. 40–45.

УДК 621.396.67

## Прецизионный оболочечный рефлектор

© Чичурин Виталий Евгеньевич, Болгов Владимир Владимирович,  
Тайгин Виталий Борисович, Патраев Евгений Валерьевич,  
Данилов Василий Евгеньевич, Михнев Михаил Михайлович

Россия, г. Железногорск, АО «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М.Ф. Решетнева»

[chichyrin@iss-reshetnev.ru](mailto:chichyrin@iss-reshetnev.ru)

*На современные космические аппараты (КА) устанавливаются антенны различных диапазонов частот, особый интерес представляют антенны миллиметровых диапазонов длин волн (X-, Ku-, Ka, Q-диапазонов) с частотами до 40 ГГц. В качестве приемо-передающих антенн на КА разработки АО «ИСС» наибольшее распространение получили зеркальные антенны: офсетные и двухзеркальные по схемам Кассегрена и Грегори. Это связано с простотой конструкции, малой шумовой температурой и возможностью формирования требуемых диаграмм направленности с шириной до единиц угловых минут. Одним из основных элементов зеркальных антенн является рефлектор.*

**Ключевые слова:** *рефлектор, силовой каркас, зеркальная антенна, композиционный материал, прецизионный.*

Наибольшую техническую сложность представляет изготовление элементов антенн для диапазонов выше 20 ГГц, так как отклонение номинальных размеров на де-

сытки микрометров существенно влияет на параметры антенны. Большую сложность представляет изготовление прецизионных размеростабильных рефлекторов.

К точности изготовления профиля рефлектора предъявляются очень высокие требования. При частоте в 20 ГГц требуемая точность изготовления профиля рефлектора составит 0,15 мм.

При проектировании антенн следует иметь в виду, что отклонение профиля от теоретического включает две составляющие: технологическую (неточность изготовления) и эксплуатационную (под действием внешних воздействующих факторов космического пространства) [1].

Одной из самых важных причин деформации профиля бортовых антенн КА является их тепловое расширение. Локальное затенение солнечного излучения приводит к неравномерному нагреву (появлению температурных полей на антенне) и, следовательно, к неодинаковым механическим деформациям конструкции антенны, что влияет на искажение диаграммы направленности и снижение мощности сигнала, направляемого в сторону земной поверхности. Основным средством борьбы с неравномерными тепловыми деформациями является максимальное снижение градиентов линейных расширений за счет выравнивания поля температур, действующего на рефлектор, которое достигается применением материалов с небольшим коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР) [2].

Для изготовления прецизионных антенн КА недостаточно было использовать известные силовые схемы и материалы, необходимо было разработать новые конструктивно-технологические решения.

Рефлектор для бортовой антенны обычно представляет собой сэндвич-панель, состоящую из обшивок, выполненных из углепластика, и сотового наполнителя из алюминидневых сот [3].

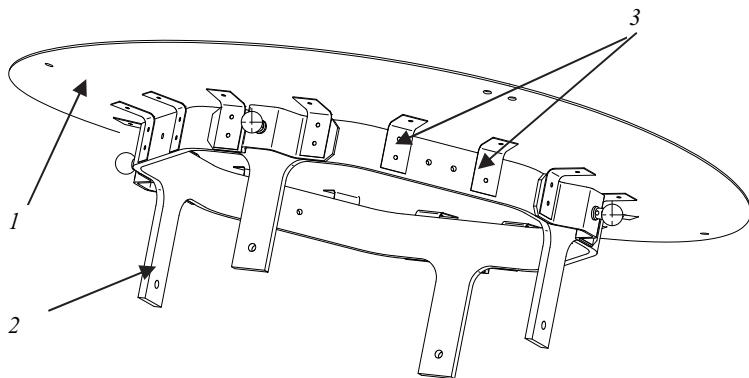
Для обеспечения необходимого коэффициента отражения рабочая поверхность рефлектора покрыта алюминием. При таком конструктивном исполнении отражающая поверхность рефлектора является частью его силовой схемы. Для установки рефлектора в антенну или на КА для антенн со сложным интерфейсом необходимо предусмотреть в конструкции рефлектора закладные элементы с отверстиями. Для рефлекторов больших габаритов необходимо также предусмотреть элементы для зачековки. Жесткость таких рефлекторов определяется используемым материалом обшивки, схемой армирования препрега углепластика, режимами формования и большим множеством других различных факторов. Конструкция рефлекторов, представляющих собой сэндвич-панель, а также технологии их производства имеют широкую квалификацию в составе КА производства АО «ИСС».

При малых габаритах рефлекторов зеркальных антенн (до 600 мм) имеет место отличная от вышеописанной конструкция рефлекторов. Данная конструкция была впервые реализована в антенне КА связи АО «ИСС».

Рефлектор состоит из двух частей — отражателя и силового каркаса (рис. 1). Отражатель представляет собой несимметричную вырезку из параболоида вращения, типа оболочки (диаметр рефлектора — 280 мм). Тонкостенная оболочка отражателя обладает несколькими преимуществами по сравнению с рефлекторами из сэндвич-панелей, в том числе тепловые деформации рефлекторов могут возникать под влиянием температурного градиента между их рабочей и тыльной поверхностями. Для снижения этих деформаций необходимо: уменьшение толщины панелей, выравнивание в них температуры по толщине за счет хорошей теплопроводности и применения для рабочей и тыльной поверхностей материала с малым КЛТР, в лучшем случае —

на основе углепластика [2]. Толщина оболочки отражателя составляет порядка 1 мм, в отличие от сэндвич-панели — 20 мм, тем самым оболочка обладает лучшей теплопроводностью. В качестве материала для изготовления отражателя необходимо выбирать углепластик с высоким модулем. Схема армирования слоев углепластика выбирается из условий наименьшего влияния на профиль отражающей поверхности, по результатам испытаний образцов, оптимальным вариантом для изготовления оболочек был выбран вариант —  $0^\circ/60^\circ/-60^\circ$ , при этом схема армирования должна быть зеркальной относительно срединного слоя оболочки. Отражатель после формования не снимается с оснастки до приклейки к нему силового каркаса.

Силовой каркас в данном случае представляет собой шестигранник из углепластика, изготовленный вакуумным формованием. Форма силового каркаса выбирается исходя из требований по жесткостным и прочностным характеристикам, а также варианта установки рефлектора в конструкцию антенны. Для установки рефлектора на опору антенны предусмотрены на силовом каркасе выступы, для контроля положения рефлектора при настройке и после испытаний на основание устанавливаются элементы оптического контроля. При необходимости возможно изготовление силового каркаса отличной формы, например, многогранники различной конфигурации.



**Рис. 1.** Оболочечный рефлектор:  
1 — оболочка; 2 — силовой каркаса; 3 — уголки

Силовой каркас устанавливается на отражатель с помощью тонких уголков, изготовленных из углепластика на высокопрочный клей. Для выставки силового основания относительно оболочки рефлектора используется лазерная проекция основания на отражатель. После полимеризации клея допускается демонтировать отражатель с оснастки для формования. Исключить операцию приклеивания основания можно, если заменить ее приформованием силового каркаса к отформованному отражателю путем дополнительной выкладки препрега.

Рефлектор с отражателем-оболочкой обладает меньшей массой по сравнению с рефлекторами из сэндвич-панелей примерно на 40 %.

По результатам изготовления и проведения испытаний рефлектора прецизионной тонко оболочечной конструкции с силовым основанием подтверждена его размеростабильность после температурного и механического воздействия. Конструкции такого типа могут быть рекомендованы для использования в конструкциях зеркальных антенн перспективных КА.

**Литература**

- [1] Крахин О.И., Левитан Б.А. *Проектирование конструкций стационарных антенн*. Москва, Изд-во МАИ, 2013, 236 с.
- [2] Бахрах Л.Д., Воскресенский Д.И. *Проблемы антенной техники*. Москва, Радио и связь, 1989, 368 с.
- [3] Буланов И.М., Воробей В.В. *Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 516 с.

УДК 678

**Исследование микроструктуры и свойств  
гетерогенной матрицы на основе полисульфона  
и эпоксидного олигомера**

© Шими́на Ю́лия Ю́рьевна, Ма́лышева Га́лина Вла́дленовна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[julia.shimina@gmail.com](mailto:julia.shimina@gmail.com)

*Приведены результаты экспериментальных исследований свойств полимерного материала на основе эпоксидного олигомера и полисульфона, используемого в качестве связующего при изготовлении изделий из стекло- и углепластиков. Рассмотрено влияние количества вводимого в эпоксидный олигомер полисульфона на величину ударной вязкости, прочности при изгибе и на температуру стеклования. Исследована микроструктура эпокси-полисульфоновых матриц и показано, что в зависимости от содержания термoplastа изменяется структура дисперсионной среды и дисперсионной фазы. Установлен оптимальный состав связующего.*

**Ключевые слова:** *композиционные материалы, физико-механические свойства, эпоксидный олигомер, полисульфон, микроструктура.*

Современные конструкции из армированных пластиков обладают целым рядом преимуществ по сравнению с традиционными материалами, и области их применения в различных отраслях народного хозяйства постоянно расширяются [1–3]. В качестве связующего при изготовлении изделий из полимеров, армированных волокнами, наибольшее распространение получили эпоксидные материалы. Однако более широкое применение эпоксидных связующих сдерживается из-за их низкой трещиностойкости и стойкости к ударным воздействиям. Эти недостатки могут быть устранены путем использования модификаторов. Один из наиболее эффективных способов модифицирования эпоксидных связующих — это введение в них теплоустойчивых термопластичных полимеров, например, эпоксиполисульфона [4].

Целью настоящей работы является оценка свойств эпоксидных связующих в зависимости от содержания в них полисульфона.



В качестве связующего выбрана эпоксидная смола ЭД-20, которую отверждали триэтаноламинотитанатом при температуре 160 °С в течение 8 ч. Полисульфон ПСК-1 использовали как термопластичный модификатор. Эпоксиполисульфоновые смеси готовили при непрерывном перемешивании ПСК-1 в эпоксидной смоле при температуре 100 °С в течение 1...5 ч. Продолжительность перемешивания зависела от количества полисульфона. В приготовленные смеси вводили отвердитель. Из полученных связующих изготавливали образцы для испытаний на изгиб  $\sigma_{изг}$  (ГОСТ 9626—90) и ударную вязкость (ГОСТ 14235—69).

Для измерения температуры стеклования использовали динамический механический анализатор DMA 24 Artemis. Скорость нагрева составляла 1 К/мин. За температуру стеклования принимали пики тангенса угла механических потерь [5].

Для исследований сколов эпоксиполисульфоновых матриц использовались образцы после их испытаний на изгиб. Морфологию поверхности разрушения оценивали с помощью электронного микроскопа Phenom.

В результате микроструктурного анализа установлено, что при увеличении содержания полисульфона изменяется фазовая структура матрицы. При отверждении эпоксидного связующего, содержащего полисульфон (5 мас. %) происходит образование дисперсной фазы, обогащенной ПСК-1, размер которой составляет 0,5...0,6 мкм. Отвержденная эпоксидная матрица представляет собой дисперсионную среду. При увеличении содержания полисульфона до 15 мас. %, в матрице происходит инверсия фаз, т. е. эпоксидная фаза представляет собой дисперсию, а фаза полисульфона становится непрерывной. Похожие микроструктуры получены при 20 мас. % полисульфона.

При увеличении содержания ПСК-1 изменяется характер разрушения смесового полимера. При малом содержании полисульфона (5 мас. %) наблюдается типичное разрушение стеклообразного полимера с образованием параболических микротрещин, оси симметрии которых ориентированы в направлении движения магистральной трещины. Характерный элемент микроструктуры такой матрицы — сферические микропоры размерами 0,5...0,7 мкм, сопоставимые с размером фазы полисульфона. При введении 15 мас. % полисульфона матрица разрушается как поликристалл. Размер элементарной ячейки в среднем пятизвенного полиэдра составляет 10 мкм, его поперечный размер — 15 мкм. Смена характера разрушения смесового полимера наблюдается между 10 мас. % и 15 мас. % ПСК-1. Аналогичная микроструктура получена при 20 %-ном содержании полисульфона. Полиэдрический характер разрушения матрицы сохраняется, при этом размер элементарного полиэдра уменьшается до 5 мкм; его грани приобретают неправильную форму.

В результате проведенных исследований установлено, что введение в состав эпоксидной матрицы ПСК-1 позволяет увеличить ударную вязкость и прочность при изгибе на 22 % без снижения температуры стеклования (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства эпоксиполисульфоновых матриц

Содержание полисульфона в эпоксидном олигомере, мас. %	$\sigma_{изг}$ , МПа	$A$ , кДж/м <sup>2</sup>	$T_g^{ЭД-20}$ , °С	$T_g^{ПСК-1}$ , °С
0	164 ± 5	32 ± 4	115	—
5	147 ± 6	23 ± 1	110	178
10	146 ± 5	24 ± 3	127	172
15	171 ± 3	29 ± 5	125	172

С использованием критериев оптимизации Парето установлено, что оптимальное содержание полисульфона в эпоксидной матрице составляет 20 мас. %.

### Литература

- [1] Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3 (15), с. 25.
- [2] Малышева Г.В., Ахметова Э.Ш., Шими́на Ю.Ю. Оценка температур фазовых переходов полимерных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2014, № 6, с. 29–33.
- [3] Беляков Е.В., Тарасов В.А., Боярская Р.В. Выбор режимов формования композитных конструкций ракетно-космической техники. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 2012, № 5, с. 37–43.
- [4] Комков М.А., Тарасов В.А., Зарубина О.В. Определение толщины композитного слоя сферической оболочки с учетом ширины наматываемой ленты. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 2013, № 10, с. 20–29.
- [5] Малышева Г.В., Ахметова Э.Ш., Марычева А.Н. Оценка температуры стеклования эпоксидных связующих, модифицированных полисульфоном. *Физика и химия стекла*, 2014, т. 40, № 5, с. 718–724.

УДК 621

## Технология проектирования механообрабатывающих цехов и применение систем 3D-моделирования в современных условиях развития рынка

© Бадмаев Артур Валерьевич, Буздаев Федор Васильевич

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, АО «Казанский Гипронефтепром»

[badmaev.art1986@mail.ru](mailto:badmaev.art1986@mail.ru)

*Проанализированы преимущества 3D-моделирования при проектировании промышленных предприятий. Изложены принципиальные моменты и инновационные подходы к проектированию механообрабатывающих цехов промышленных предприятий по выпуску и испытаниям автоматизированных систем технического обслуживания и контроля с применением систем 3D-моделирования.*

**Ключевые слова:** реконструкция, техническое перевооружение, 3D-моделирование, проектная документация, инновационные методы, компьютерное моделирование.

В настоящее время значительно возросли объемы работ, связанные с реконструкцией и техническим перевооружением предприятий машиностроения. Важный этап данных работ — промышленное проектирование. Все возрастающие сложности строительных конструкций, появление новых материалов и технологий с одной стороны, и необходимость сокращения сроков проектирования, на которых настаивает Заказчик с другой стороны, требуют применения при проектировании инновационных методов проектирования и специальных программных продуктов. Одним из прогрессивных методов проектирования является трехмерное проектирование, заключающееся в создании компьютерной модели проектируемого здания, которая содержит все сведения о будущем объекте.

Трехмерное проектирование на сегодняшний день — это совершенно новый подход к возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации цеха предприятия, включая его экономическую составляющую. Моделирование позволяет исключить ошибки, возникающие на стадии проектирования и максимально понятно донести до заказчика на стадии согласования основную компоновку участков и размещение тех-

нологического оборудования на различных участках корпуса. При работе в 3D-модели предприятия создается алгоритм проектирования, задаются геометрические взаимосвязи между технологическим оборудованием и инженерными сетями проекта. При переносе модели на двухмерный вид документация выглядит нагляднее и лаконичнее. Изменения, вносимые в проектную документацию в трехмерном пространстве, касающиеся того или иного объекта, автоматически отображаются на чертежах. При этом также автоматически изменяются геометрические размеры, нанесенные на документацию.

Трехмерное моделирование в проектировании промышленных предприятий успешно применяется в АО «Казанский Гипронеавиапром». При этом одним из основных программных продуктов при 3D-моделировании является Autodesk Revit.

В качестве примера можно привести проект по реконструкции испытательного цеха по выпуску автоматизированных систем технического обслуживания и контроля, включающих средства технического обслуживания и комплекты наземного оборудования для ОАО «Рязанское конструкторское бюро «Глобус». В состав средств технического обслуживания и комплектов наземного оборудования входят: транспортно-технологические тележки с оборудованием, обеспечивающим размещение на них различных видов проверяемых изделий, такелаж, расчалки, хомуты, траверсы со съемными захватами, столы, устройства горизонтирования, домкраты, подставки, кантователи, опоры. Изготовление составных частей автоматизированных средств технического обслуживания и контроля осуществляется по следующей технологической схеме:

- резка, гибка и штамповка заготовок на штамповочном участке;
- лазерная резка деталей на участке лазерной резки;
- фрезерование и электроэрозионная обработка деталей на каркасном участке;
- сборка, монтаж и испытания составных частей автоматизированных систем технического обслуживания и контроля на сборочном участке.

Обработанные на реконструируемых участках заготовки и детали поступают на склад готовых деталей, расположенный на 2-м этаже производственного корпуса, оттуда, согласно технологии изготовления, передаются на последующую обработку или сборку.

Для каждого участка в трехмерном пространстве показано размещение технологического оборудования, необходимого для производственного цикла, начиная от верстака и заканчивая установкой лазерной резки, а также представлены административно-бытовые и вспомогательные помещения, без которых невозможен полный жизненный цикл предприятия.

На 3D-модели цеха показана компоновка участков, помещений, транспортных коридоров, расположение оборудования, инженерных сетей и строительных конструкций, как по отдельности, так и относительно друг друга (рис. 1). Наглядность изображения дает более полную картину реконструируемого цеха, что в свою очередь позволяет снизить возможные ошибки при проектировании.

Акционерное общество «Казанский Гипронеавиапром» в условиях возрастания объемов строительства новых и реконструкции существующих предприятий авиационной, ракетно-космической и автомобильной промышленности, сокращения сроков проектирования, повышения требований к качеству проектной документации широко применяет процесс 3D-моделирования.

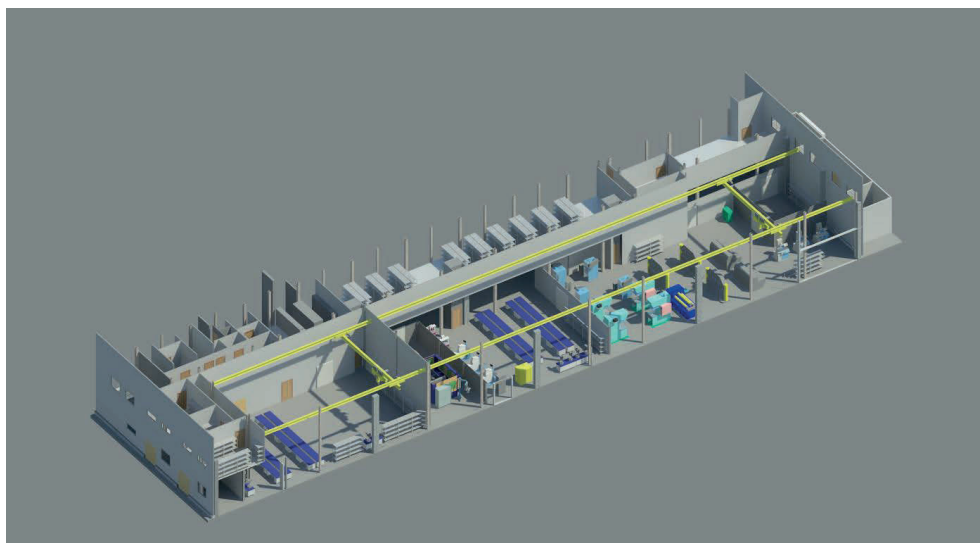


Рис. 1. Цех по выпуску автоматизированных систем технического обслуживания и контроля

### Литература

- [1] Афонин А.М., Царегородцев Ю.Н., Петрова А.М., Ефремова Ю.Е. *Теоретические основы разработки и моделирования систем автоматизации*. Москва, Форум, 2011, 192 с.
- [2] Елизаров И.А., Мартемьянов Ю.Ф. *Моделирование систем*. Ст. Оскол, ТНТ, 2013, 136 с.
- [3] Королев А.Л. *Компьютерное моделирование*. Москва, Бином. ЛЗ, 2013, 230 с.

УДК 621.865:004.896

## Решение задачи управления системой «рука — кисть — объект» с учетом структуры и свойств матриц захвата

© Лесков Алексей Григорьевич, Бажинова Ксения Владимировна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[agleskov@rambler.ru](mailto:agleskov@rambler.ru), [bazhinova@bk.ru](mailto:bazhinova@bk.ru)

*Рассмотрены вопросы математического описания захвата объектов манипуляционными роботами с использованием анализа структуры и свойств матрицы захвата. Предложен метод планирования автоматического захвата объектов манипуляционными системами с разветвленной кинематической цепью, обеспечивающий одновременное решение задачи планирования траекторий движения и пальцев хватного устройства, а также руки манипуляционного робота, что позволяет*

уменьшить временные затраты на выполнение операции планирования захвата. Представлены алгоритмы функционирования программного обеспечения для моделирования и обработки роботизированных операций захвата объектов.

**Ключевые слова:** манипуляционные роботы, автоматический захват, планирование захвата, разветвленная кинематика, объекты манипулирования.

Захват объекта манипулятором — одна из основных задач, рассматриваемых в теории манипуляционных систем. Решение этой задачи предполагает рассмотрение манипуляционного робота (МР) как системы, включающей в себя захватное устройство (ЗУ) МР с учетом его кинематики, динамики и алгоритмов функционирования.

В общем случае ЗУ можно представить в виде нескольких механически связанных между собой МР. Исполнительный механизм манипуляционной системы (МС), построенной по такому принципу, представляет собой разветвленную структуру.

В литературе рассматриваются три типа управления рабочим органом манипулятора:

- а) кинематическое управление,
- б) динамическое управление,
- в) супервизорное управление.

Целью кинематического управления является решение прямой и обратной задач кинематики МР и получение глобальной матрицы преобразования, связывающей координаты шарниров его манипулятора и его координаты в глобальной системе координат. Динамическое управление заключается в определении во времени закона управления, позволяющего поддерживать необходимое положение либо скорости звеньям манипулятора и схвата, преодолевая сопротивление со стороны окружающей среды. При супервизорном управлении робот исполняет указания человека-оператора.

Управление движением МР с ЗУ может осуществляться как с разбивкой на фазы планирования и реализации для подсистем «рука — основание» и «руки — пальцы», так и с использованием согласованного управления движением руки и пальцев ЗУ.

Размещение на ЗУ систем осязания (техническое зрение, силомоментные и тактильные датчики) позволяет рассматривать вопросы управления МР с учетом физических свойств объектов манипулирования (ОМ), таких как деформируемость и его инерционные свойства.

Для описания захвата принято рассматривать соотношения, связывающие между собой:

- векторы  $g$  сил и моментов, действующих на объект, и векторы  $\lambda = [\lambda_1^T \dots \lambda_m^T]^T$  сил и моментов, действующих в точках контакта кисти и объекта ( $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  — число точек контакта (пальцев кисти));
- векторы  $v$  угловых и линейных скоростей объекта и векторы  $v_c$  угловых и линейных скоростей точек контакта;
- векторы  $\mu$  сил и моментов, развиваемых приводами сочленений и векторы  $\lambda$ ;
- векторы  $\dot{q}$  скоростей движения в сочленениях и векторы  $v_c$  скоростей в точках захвата.

Эти соотношения имеют вид [1]:

$$\begin{aligned} -G\lambda &= g, & G^T v &= v_c, \\ J^T \lambda &= \mu, & J\dot{q} &= v_c. \end{aligned}$$

Необходимые для управления МС координаты шарниров вычисляются в результате построения объединенной матрицы Якоби системы «рука — кисть — объект» (РКО), связывающей между собой скорости всех шарниров руки и кисти и скорости точек на поверхности пальцев ЗУ, которые должны образовать механический контакт схвата и объекта.

Матрицу  $J$  в системе РКО можно представить в следующем виде:

$$J_{\text{РКО}} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & \dots & 0 & J_{1h} \\ 0 & J_2 & \dots & 0 & J_{2h} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & J_m & J_{mh} \end{bmatrix},$$

где  $J_i$  — матрица Якоби  $i$ -го пальца ЗУ;  $J_{ih}$  — матрица Якоби основания  $i$ -го пальца на запястье ЗУ.

Число строк матрицы  $J_{\text{РКО}}$  зависит от количества пальцев и вида контактов. Число столбцов определяется числом пальцев и сочленений в каждом из них, а также количеством сочленений в руке.

Для системы «кисть — объект» (КО) матрица  $J$  имеет вид

$$J_{\text{КО}} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & J_m \end{bmatrix}$$

и является составной частью матрицы  $J_{\text{РКО}}$ .

Проведя анализ матриц  $J_{\text{КО}}$ ,  $J_{\text{КО}}^T$ ,  $J_{\text{РКО}}$  и  $J_{\text{РКО}}^T$  с использованием свойств связи размерностей ранговых пространств и нуль-пространств, можно получить соотношение, позволяющее послужить основой для выбора конфигурации МР системы РКО при известном либо рассчитанном ранее захвате ОМ системой КО.

Существующие системы планирования захвата, такие как пакет OpenRAVE (Open Robotics Automation Virtual Environment) — виртуальная среда автоматизации робототехнических систем с открытым кодом [2], позволяют рассчитывать и записывать в базы данных несколько вариантов захвата объекта манипуляторами различного типа. В работе [3] представлен аппаратно-программный комплекс, использующий инструменты пакета OpenRAVE и включающий программное обеспечение распознавания объектов манипулирования системой технического зрения, планирования точек захвата объектов, планирования траекторий перемещения исполнительных механизмов. В совокупности с описанным способом выбора конфигурации МР при выполнении операции захвата подобный комплекс позволит решать новые задачи в области захвата объектов и манипулирования ими. При этом предложенный способ управления МС позволяет обеспечить желаемые свойства захвата на этапе его планирования и уменьшить временные затраты на оценку его качества.

Таким образом, описанный алгоритм может быть использован для моделирования захвата ОМ системой РКО и выбора из базы данных способа захвата, наиболее соответствующего решаемой задаче.

## Литература

- [1] Prattichizzo D., Trinkle J. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2008, ch. Grasping, pp. 671–700.
- [2] Diankov R., Kuffner J. *Openrave: A planning architecture for autonomous robotics*. Pittsburgh, PA, Robotics Institute, Tech. Rep. CMU-RI-TR-08-34, July 2008, 15 p.
- [3] Лесков А.Г., Илларионов В.В., Калеватых И.А., Морошкин С.Д., Бажинова К.В., Феоктистова Е.В. Аппаратно-программный комплекс для решения задач автоматического захвата объекта манипуляторами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/1361.html> (дата обращения 20.05.2015).

УДК 681.142

## Информационно-навигационная система HOMEGIS

© Дубовик Николай Николаевич, Ногин Олег Александрович,  
Туманов Владислав Михайлович, Власов Андрей Игоревич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[dubovik\\_nick@mail.ru](mailto:dubovik_nick@mail.ru)

*Исследована проблема навигации внутри современных зданий со сложной структурой. проанализированы технические средства решения данной проблемы — существующие системы навигации, рассмотрены их основные достоинства и недостатки. Приведены выводы и пример разработанной системы, которая обладает всеми необходимыми качествами для упрощения ориентации внутри зданий.*

**Ключевые слова:** навигация, 3D-планировка зданий, определение местоположения, локализация в пространстве

**Введение.** В настоящее время обозначилась проблема навигации внутри помещений различных зданий, а также предоставления посетителям услуг, основанных на их местоположении (LBS — Location-based service) и предпочтениях. Здания становятся все более объемными со сложной структурой. В сооружениях подобного типа уверенно могут ориентироваться лишь те, кто в них побывал много раз, однако и они чаще всего ориентируются лишь частично, в пределах необходимости. Первоначальное освоение в здании может быть довольно затруднительным, и существует немало людей, у которых вообще нет нужды посещения определенных мест более чем несколько раз. Очевидно, что, например, тратить час времени на поиск кабинета врача нецелесообразно и грозит опозданием на прием, не говоря уже об опозданиях на рабочее или учебное место. Поэтому необходим инструмент, который поможет пользователю максимально быстро и без лишних усилий добраться до нужного ему пункта назначения.

Решения, применяемые в indoor-навигации (навигации внутри помещений), помогают и в ориентировании вне зданий, на улице — там, где в условиях плотной за-



стройки использование систем спутниковой навигации затруднено (нет спутников в прямой видимости, присутствует только отраженный/ослабленный/зашумленный сигнал GPS/Глонасс и т.д.). Особенно эта проблема актуальна для Японии с высокой плотностью городской застройки.

В связи с ростом указанных объема и сложности структуры зданий некоторые методы уже не так эффективны, как раньше. Например, настенные планы теряют наглядность, если этаж здания имеет большую площадь и содержит много помещений. Трудно охватить глазом все изображение и соотнести его с действительностью. Ситуация также может быть усугублена тем, что этажи могут иметь различную структуру. Тогда для каждого из них требуется свой план, и объем информации, которой необходимо оперировать мысленно, возрастает до неприемлемых величин. Существует и другой подход к ориентации внутри зданий: настенные указатели. Однако они зачастую не могут указать путь к конкретному пункту назначения, чаще их используют для указания местоположения типовых пунктов: справочная, магазин, пункт оказания первой помощи и пр. При попытке создать универсальную систему настенных указателей, возникнет проблема, аналогичная проблеме настенных планов, т. е. пользователю предоставляется не минимум необходимой информации, а полная информация о здании, которую нужно самостоятельно анализировать.

Таким образом, решением проблемы должна стать автоматическая система, которая будет:

- единой системой и состоять из мобильного и веб-приложения;
- использовать 3D-карты;
- прокладывать наиболее простые и понятные маршруты;
- ускорять и упрощать взаимодействие клиентов (посетителей) и зданий;
- предоставлять актуальную информацию, такую как график работы, ответственные за помещения и т. п.

**Системы геолокации и их параметры.** Современный рынок навигационных систем предоставляет пользователю множество средств для навигации. Однако большая часть из них предназначена для определения местоположения и прокладки маршрута к необходимому пункту назначения лишь по открытой местности. К таким средствам можно отнести:

- GPS (Global Positioning System);
- Galileo (Галилео);
- глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС);
- NAVIMIND.

Благодаря indoor-навигации появляются новые инструменты для маркетинга — проходя мимо магазина, человек может моментально узнать о проводимых в нем акциях / мероприятиях / предоставляемых услугах, товарам, благодаря всплывающему сообщению на экране своего телефона (так называемом Geo-fencing, причем будут учитывать его интересы — поскольку могут учитывать информацию о его прошлых покупках), либо получать уведомление при приближении к определенному месту (второе направление indoor-навигации, называемое Geo-aware), получать статистическую информацию («тепловые карты» посетителей — своеобразный и очень мощный offline-аналог Google Analytics, основанные на перемещениях клиентов внутри ваших торговых залов, на основе которой определяется, какие отделы и товары пользуются повышенным интересом). Рынок подобной геоконтекстной рекламы (LBA — location-based advertising) уже измеряется миллиардами долларов, и с развитием систем indoor-навигации ожидается его стремительный рост.

Благодаря большим коммерческим перспективам, направление indoor-навигации становится все более востребованным и уже привлекло внимание таких крупных игроков на рынке, как Google, Apple, Qualcomm, Broadcom, Sony и т. д., и в это, без сомнения перспективное направление, уже инвестируются сотни миллионов долларов.

В системах навигации, специализированных для работы в зданиях, применяются обычные двумерные карты. Однако здания, для которых требуются автоматические системы навигации, представляют собой сложные трехмерные структуры. Учитывая этот факт, можно прийти к выводу о большей пригодности для этих систем динамических трехмерных моделей здания, главным свойством которых является наглядность представления, поскольку пользователю будет облегчена задача собственного позиционирования: бегло просмотрев модель здания, он сможет узнать место, в котором находится. Конечно, в удобстве данный подход уступает другим методам позиционирования, но требует минимального аппаратного обеспечения (точки доступа Wi-Fi, шагомеры, инерциальные и прочие сенсоры не требуются). Указать путь возможно несколькими способами, из которых пользователь сможет выбрать наиболее удобный для себя. Плоские карты указывают путь единственным способом: в виде траектории, которой приходится следовать буквально. Запомнить путь в таком виде и воспроизвести его мысленно весьма затруднительно.

Таким образом, необходима разработка навигационной системы внутри зданий на основе трехмерной модели с возможностью прокладки маршрута между двумя произвольными пунктами. Следовательно, необходимо выбрать средства визуализации трехмерных моделей и методов построения оптимального маршрута.

**Система ИНС — информационно-навигационная система.** Проанализируем преимущества ИНС, из чего она состоит и благодаря чему позволяет за минимальное время найти интересующий вас объект.

В настоящее время авторы данной статьи заканчивают внедрение ИНС в МГТУ им Н.Э. Баумана, поэтому рассмотрим всю систему на примере здания МГТУ им. Н.Э. Баумана. В основе ИНС лежат классические алгоритмы компоновки и трассировки, применяемые при проектировании электронной аппаратуры [1–4].

Что представляет собой ИНС? Во-первых, это единая система, состоящая из нескольких подсистем, позволяющая пользоваться всем арсеналом функций на максимальном количестве устройств: терминал, планшет, смартфон, web и т. п. (рис. 1). Это достигается благодаря выбранным технологиям, которые позволяют получить не только красивый и удобный интерфейс взаимодействия с пользователем, но и эффективную систему, обеспечивающую навигацию по выбранному объекту, в данном случае по МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Во-вторых, в системе используются 3D-карты [5], так как только они могут удовлетворить требованию качественной и понятной прокладки маршрута. Зачастую в зданиях со сложной архитектурой 2D-карты не помогают, а наоборот вносят путаницу. Рассмотрим эту проблему на примере аудитории 501ю. Ее расположение на 2D-карте показано на рис. 2.

Проход к этой аудитории напрямую через центральную часть здания невозможен, так как все переходы закрыты. Попасть в аудиторию 501ю можно, только поднявшись снизу и только по одной-единственной лестнице. Таким образом, студенты сталкиваются с другой проблемой: как найти эту самую лестницу? Попасть на нее также довольно сложно: гарантированный проход есть только на 3-м этаже. В итоге студенты вынуждены терять свое время, несколько раз бегать по разным лестницам только лишь для того, чтобы найти нужную аудиторию. А 3D-карты с легкостью

наглядно показывают весь путь до необходимой аудитории. Для решения проблем внутренней 3D-навигации эффективным оказывается применение традиционных алгоритмов пространственной компоновки и трассировки соединений в электронной аппаратуре в условиях 3D-ограничений [3, 4].



Рис. 1. Работа единой системы на разных устройствах

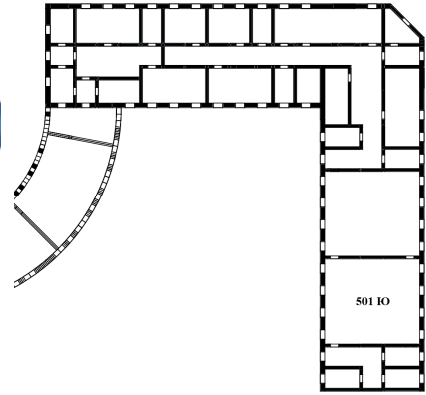


Рис. 2. 2D-карта 5-го этажа южного крыла — аудитория 501 Ю

**Заключение.** Созданная информационно-навигационная система решает сразу несколько важных задач навигации в зданиях со сложной архитектурой, получения информации о внутренних распорядках объекта, а также объединения наиболее существенных возможностей (функций) в одной системе. Благодаря использованию кроссплатформенного программного обеспечения, взаимодействовать с ней возможно практически с любого устройства.

## Литература

- [1] Григорьев В.П., Камышная Э.Н., Нестеров Ю.И., Никитин С.А. *Применение методов искусственного интеллекта в САПР технологических процессов производства электронной аппаратуры*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 48 с.
- [2] Андреев К.А., Власов А.И., Камышная Э.Н., Тиняков Ю.Н., Лавров А.В. Автоматизированная пространственная оптимизация компоновки блока управления датчика давления по тепловому критерию. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 6 (18). URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/814.html> (дата обращения 12.03.2015).
- [3] Камышная Э.Н., Маркелов В.В., Соловьев В.В. *Формальное представление электрических принципиальных схем для решения задач автоматизированного проектирования электронной аппаратуры*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 48 с.
- [4] Алексеев В.Г., Камышная Э.Н., Усачев В.П. *Автоматизированная компоновка схем ЭВА и РЭА по конструктивным модулям первого уровня*. Москва, Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988, 40 с.
- [5] Власов А.И., Лыткин С.Л., Яковлев В.Л. *Краткое практическое руководство разработчика по языку PL/SQL*. Москва, Машиностроение, 2000. (Библиотека журнала «Информационные технологии». Т. 2).

УДК 621.865:004.021

## **Алгоритм определения пересечения произвольных полигональных моделей для нахождения коллектора контакта, нормалей и глубины проникновения при планировании и моделировании захвата деформируемого объекта**

© Феоктистова Елена Владимировна, Лесков Алексей Григорьевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[agleskov@rambler.ru](mailto:agleskov@rambler.ru), [feoktistovaev@mail.ru](mailto:feoktistovaev@mail.ru)

*Рассмотрен алгоритм определения пересечений полигональных моделей, методы фаз которого выбраны на основании анализа и сравнения существующих алгоритмов определения пересечений. Методом широкой фазы является модифицированный алгоритм ограничивающих параллелепипедов типа ОБВ. Алгоритм узкой фазы, решающий задачу анализа взаимоположения множества вершин полигональной модели одного тела, множества проекций этих вершин на поверхность другого тела вдоль вектора мгновенной скорости первого тела относительно второго и направления вектора мгновенной скорости, сводится к задаче поиска ближайших соседей между вершинами полигональных сеток взаимодействующих объектов.*

**Ключевые слова:** алгоритм определения пересечения полигональных моделей, пересечение многогранников, ограничивающий параллелепипед типа ОБВ.

При планировании и моделировании захвата деформируемых объектов возникает необходимость разрешения задачи обнаружения пересечений, что по сути является вычислительной проблемой обнаружения геометрического пересечения между собой звеньев захватного устройства (ЗУ) и объекта манипулирования (ОМ). Причем необходимо не просто указать сам факт пересечения, но и определить конкретные точки, множество которых называется коллектором контакта, нормали контактов, а также глубину проникновения для вычисления качественных параметров захвата.

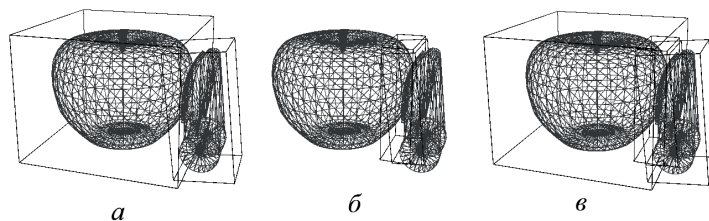
Сложность в детектировании пересечений объектов заключается в необходимости постоянного расчета расстояния между поверхностями объектов на каждом шаге моделирования. С увеличением точности расчетов повышаются и требования к вычислительной мощности.

В связи с характером моделируемого процесса — захвата объекта — считают, что в начальный момент времени контакт между ЗУ и ОМ отсутствует. В процессе смыкания пальцев захватного устройства расстояние между элементами схвата и объектом уменьшается, а затем происходит пересечение поверхностей ЗУ и ОМ — непосредственно захват объекта. Исходя из этого, компромисс между приемлемой сложностью вычислений и достаточной точностью заключается в следующем подходе: на начальных шагах моделирования использовать менее точные методы обнаружения пересечения, а при уменьшении расстояния между фалангами ЗУ и ОМ до значения ошибки неточного метода, умноженного на некоторый коэффициент запаса,

использовать более точные методы до детектирования пересечения и получения искомых характеристик контакта, таких как коллектор контакта, нормали и глубина проникновения. Описанные этапы получили названия широкой (быстрая и грубая оценка) и узкой (более медленная и точная) фаз обнаружения пересечений [1].

Наиболее часто используемыми алгоритмами широкой фазы обнаружения пересечений являются метод разделяющей плоскости [2] и методы ограничивающих объемов (методы ограничивающих сферы, параллелепипеда типа AABV и параллелепипеда типа OBB) [3]. Метод разделяющей плоскости имеет ряд недостатков, что ограничивает его применение. Ограничивающая сфера — самый простой и быстрый способ определения наличия или отсутствия пересечения между объектами, но он не применим из-за грубости оценки. Обычно параллелепипед точнее, чем сфера, повторяет форму объектов. Решение о выборе между параллелепипедами типов AABV и OBB зависит от условий конкретной задачи: если проверка на каждом шаге моделирования осуществляется между одними и теми же объектами, то выбирают более точный метод — параллелепипеды типа OBB, а если между разными объектами — то более экономичный — параллелепипеды типа AABV.

Исходя из этого, в качестве алгоритма широкой фазы обнаружения пересечений выбран метод ограничивающего параллелепипеда типа OBB с выделением областей потенциального пересечения и определения вершин полигональной модели, которые попадают в эту область и будут использоваться в узкой фазе определения пересечения (рис. 1), что приводит к уменьшению времени моделирования.



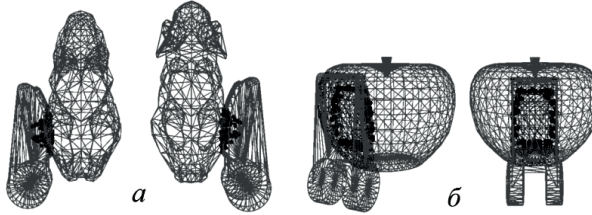
**Рис. 1.** Результат широкой фазы определения пересечения полигональных моделей:

*a* — определение пересечения OBB; *б* — выделение областей потенциального пересечения; *в* — соотношение OBB и областей потенциального пересечения

В качестве алгоритмов узкой фазы обнаружения пересечения полигональных моделей чаще всего используются базирующиеся на методе Gilbert-Johnson-Keerthi (GJK) алгоритмы [4], которые определяют пересечение выпуклых тел путем анализа их разницы Минковского, и алгоритмы, опирающиеся на взаимное положение областей Вороного фрагментов полигональных моделей — алгоритм Lin-Canny [5] и алгоритм V-Clip [6] — улучшенный в некоторых аспектах алгоритм Лин-Кенни.

В [6] приведено сравнение быстродействий алгоритмов GJK, Lin-Canny и V-Clip, согласно которому вычислительная скорость определения пересечения между объектами последнего значительно выше скорости вычислений других алгоритмов. Алгоритм V-Clip используется во многих физических движках — компьютерных программах, производящих моделирование физических законов реального мира в виртуальной среде с той или иной степенью аппроксимации, в частности в Bullet Physics Library и в Open Dynamics Engine, которые занимают лидирующие по популярности позиции среди свободных физических движков. Но, несмотря на явные до-

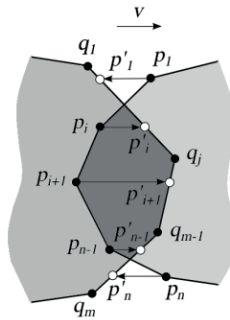
стоинства, этот метод сложен в реализации, требует предварительного расчета областей Вороного, и результат его работы требует дополнительной проверки и фильтрации (рис. 2). Кроме того, существенным недостатком рассматриваемых алгоритмов является их применимость только к выпуклым телам.



**Рис. 2.** Моделирование пересечения полигональных моделей звена ЗУ и ОМ с использованием Bullet Physics Library:

*a* — определение ложной области контакта вне поверхности модели; *б* — определение неполного коллектора контакта

Исходя из этого, задачу узкой фазы определения пересечения предлагается формулировать не в ее классической интерпретации как задачу определения взаимопenetрации многоугольников, а как задачу анализа взаимоположения множества вершин полигональной модели  $P = p_1, \dots, p_n$  тела  $A$ , множества проекций этих вершин  $P' = p'_1, \dots, p'_n$  на поверхность другого тела  $B$  вдоль вектора мгновенной скорости  $v$  первого тела относительно второго и направления вектора  $v$  (рис. 3). При этом, если вектор  $p_i p'_i$  сонаправлен с вектором  $v$ , то вершина  $p_i$  тела  $A$  находится в контакте с телом  $B$ , глубина проникновения для нее равна длине вектора  $p_i p'_i$ , а нормаль контакта противоположно направлена по отношению к нормали полигона, которому принадлежит проекция  $p'_i$ .

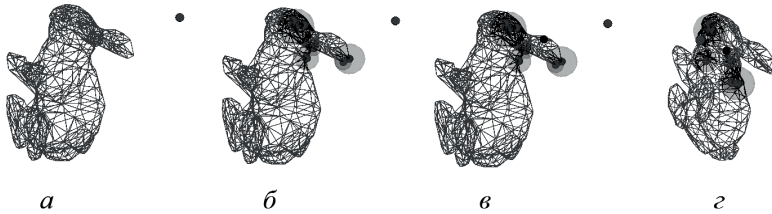


**Рис. 3.** Отыскание проекций вершин  $P' = p'_1, \dots, p'_n$  полигональной модели тела  $A$  на поверхность полигональной модели тела  $B$  вдоль вектора мгновенной скорости  $v$  первого тела относительно второго

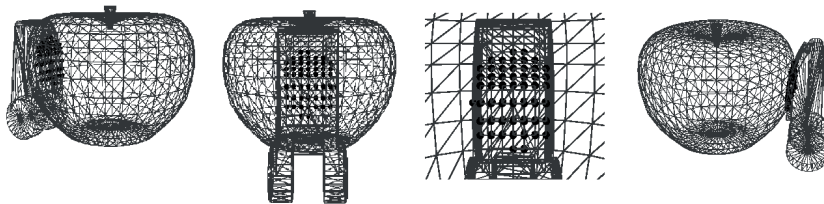
Полигон, на котором будет располагаться проекция  $p'_i$ , в качестве одной из своей вершин будет иметь вершину  $q_j$ , которая будет являться самой близкой среди множества вершин полигональной модели  $Q = q_1, \dots, q_m$  тела  $B$  к вершине  $p_i$  тела  $A$ . То есть, найдя пару ближайших вершин  $p_i$  и  $q_j$ , можно избежать перебора всех полигонов тела  $B$  в поисках проекции  $p'_i$ , что сократит время моделирования, и осуществлять поиск только среди полигонов, в которых  $q_j$  является одной из вершин. Таким образом, необходимо решить задачу «поиска ближайшего соседа», которая заключается в отыскании среди множества элементов, расположенных в метрическом пространстве, элементов близких к заданному. Полигональная модель в этом случае может рассматриваться как замкнутое метрическое пространство.

В качестве алгоритмов «поиска ближайших соседей» были рассмотрены линейный поиск [7], метод редких точек [8] и алгоритмы разбиения пространства — диаграмма Вороного [7], поиск в kD-деревьях [9], поиск в BSP-деревьях [10], поиск в VP-деревьях [11]. Учитывая их скорости, достоинства и недостатки, был выбран последний. Поиск при этом осуществляется среди вершин полигональной модели, попавших в область потенциального взаимодействия.

Определение «ближайшего соседа» с помощью поиска по VP-дереву в узкой фазе рассматриваемого алгоритма иллюстрирует рис. 4. Результат работы описанного алгоритма представлен на рис. 5.



**Рис. 4.** Результат поиска «ближайшего соседа» для заданной точки среди вершин невыпуклой замкнутой полигональной метки:  
*a* — задание начальных данных; *b* — построение бинарного VP-дерева; *v, z* — определение «ближайшего соседа»



**Рис. 5.** Результат работы алгоритма: полностью определенный коллектор контакта, точки которого располагаются на поверхности модели

Таким образом, описанный алгоритм определяет с более высокой точностью по сравнению с существующими методами коллектор контакта и параметры, характеризующие его отдельные точки. Эти данные могут быть использованы для определения качества захвата и моделирования деформации ОМ в процессе захвата.

Литература

- [1] Christer E. *Real-time Collision Detection*. Elsevier, 2005, 633 p.
- [2] *Game Developer's Links Collection. Collision Detection FAQ*. URL: <http://gdlinks.hut.ru/cdfaq/> (дата обращения 18.12.2014).
- [3] Плеханов Н.С. *И вот они столкнулись*. URL: <http://www.vr-online.ru/content//i-vot-oni-stolknulis%E2%80%A6634> (дата обращения 24.12.2014).
- [4] *Реализация алгоритма Гилберта — Джонса — Керти*. URL: <http://100byte.ru/100btwrks/gjk/gjk.html> (дата обращения 20.12.2014).
- [5] Lin M.C. *Efficient Collision Detection for Animation and Robotics*. University of California, 1993. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=920962> (дата обращения 19.12.2014).
- [6] Mirtich B. *V-Clip: Fast and Robust Polyhedral Collision Detection*. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.67.3275> (дата обращения 18.12.2014).
- [7] Препарата Ф. *Вычислительная геометрия: Введение*. Москва, Мир, 1989, 478 с.
- [8] Tao Y., Sheng C. Fast Nearest Neighbor Search with Keywords. URL: <http://www.cse.cuhk.edu.hk/~taoyf/paper/tkde13-spakey.pdf> (дата обращения 23.09.2013).
- [9] Panigrahy R. *An Improved Algorithm Finding Nearest Neighbor Using Kd-trees*. Microsoft Research, Mountain View CA, USA, 2008. URL: <http://theory.stanford.edu/~rinap/papers/kdtreelatin.pdf> (дата обращения 23.09.2013).
- [10] Maneewongvatana S., Mount D.M. *An Empirical Study of a New Approach to Nearest Neighbor Searching*. Department of Computer Science, University of Maryland, Maryland. URL: <http://www.cs.umd.edu/~mount/Papers/alnex01-empir.pdf> (дата обращения 23.09.2013).
- [11] Yianilos P.N. *Data Structures and Algorithms for Nearest Neighbor Search in General Metric Spaces*. URL: <http://www.cs.iastate.edu/~honaavar/nndatastructures.pdf> (дата обращения 23.09.2013).



УДК 629.7.021

## **Выбор силовой схемы и расчет на прочность балки пилона самолета**

© **Гудков Максим Андреевич, Попов Евгений Владимирович**

Россия, г. Воронеж, Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» в г. Воронеже

[Maxim.Gudkov@vfki.irkut.com](mailto:Maxim.Gudkov@vfki.irkut.com)

*Выполнена оптимизация конструкции силовой балки пилона среднемагистрального самолета для снижения собственного веса конструкции, а также повышения эффективности работы силовой балки. Проектирование нового исполнения силовой балки проведено на основании прочностных расчетов методом конечных элементов в среде MSC.Software PATRAN/NASTRAN. Для оценки степени соответствия новой конструкции поставленным требованиям проведены расчеты жесткости и собственных частот балки.*

**Ключевые слова:** силовая балка пилона, конечные элементы, прочность, жесткость.

Силовая балка пилона является одним из наиболее высоконагруженных и высокоответственных элементов самолета. Зона работы пилона — это зона повышенных температур и высоких значений усилий, приходящихся от двигателя, что определяет высокие требования к прочности и жесткости, предъявляемые к силовой балке, а также к окружающим ее конструктивным элементам. Закрепление пилона непосредственно на крыле летательного аппарата накладывает ограничения на частотные характеристики силовой балки в виде узких коридоров частот, в которых должен работать пилон, с целью исключения возникновения нежелательных автоколебаний (как пример — флаттера) на крыле.

При расчете на прочность исходной конструкции силовой балки пилона (рис. 1) были выявлены ее недостатки: для всех расчетных случаев наблюдаются низкие уровни напряжений по задней части балки, что говорит о недостаточно эффективной работе конструкции (большая часть которой изготавливается из высокопрочных материалов). Основной задачей проекта является разработка конструкции силовой балки пилона, которая при аналогичных прочностных характеристиках обладала бы меньшей массой.

Разработка новой конструкции силовой балки пилона выполняется в соответствии с ограничениями, накладываемыми со стороны крыла и двигателя.

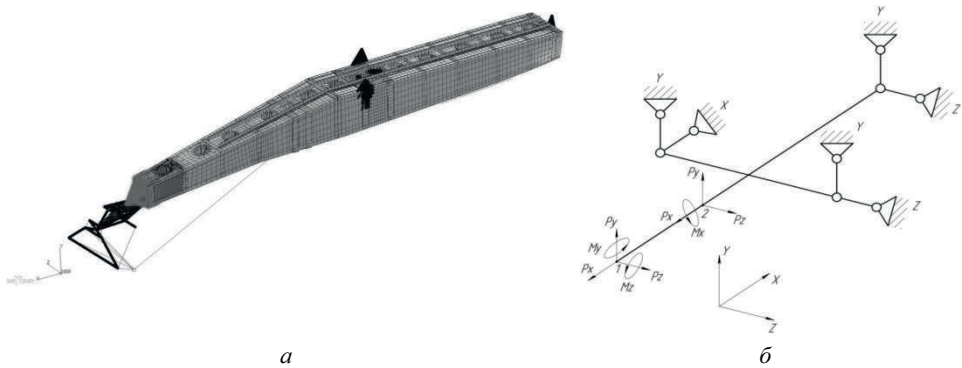


Рис. 1. Исходная конструкция силовой балки (а) и расчетная схема (б)

Для решения поставленной проблемы проанализированы особенности нескольких типовых конструктивно-силовых схем балок пилона, представленных на рис. 2 и 3, условия работы каждой из них.

Из этих схем выбрана наиболее полно отвечающая поставленным требованиям. Основные отличия исходной и предлагаемой конструкции заключаются в увеличенной строительной высоте передней части балки (до первого лонжерона), задняя часть выполняется в виде двутавровой фрезерованной составной балки, изменяется схема навески пилона на крыло. Подобные изменения позволили перейти на высокопрочный алюминиевый сплав (1933Т3) для панелей, для шпангоутов. Замыкающий шпангоут и задняя балка выполняются из титанового сплава ВТ23. Соответствие прочностных характеристик требованиям прочности подтверждено расчетом на прочность, расчетом и сравнением жесткостей предлагаемой и исходной схемы, а также сравнением частотных характеристик конструкции силовой балки.

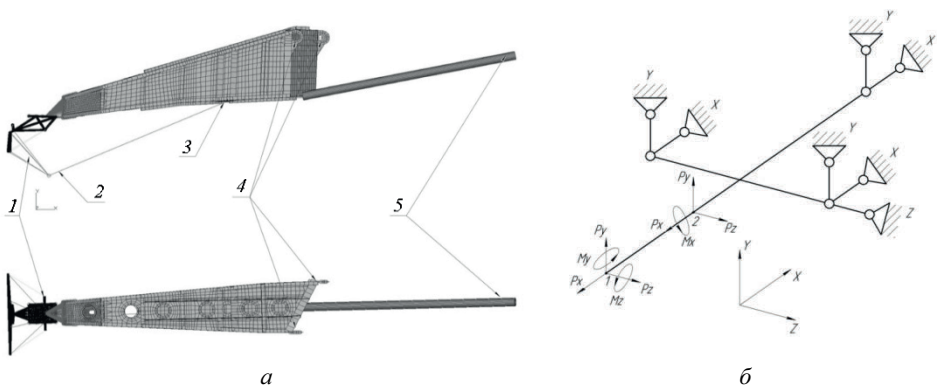
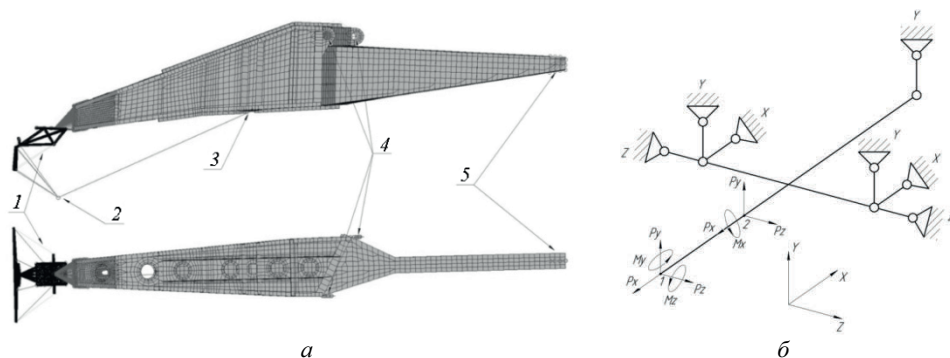


Рис. 2. Подкосная схема силовой балки пилона (а) и расчетная схема (б):

1 — передний узел навески двигателя; 2 — центр масс двигателя; 3 — задний узел навески двигателя; 4 — проушины навески пилона к переднему лонжерону; 5 — задний узел навески пилона к крылу



**Рис. 3.** Подкосное исполнение силовой балки пилона (а) и расчетная схема (б):  
1–5 — см. рис. 2; б — центральные тяги

Все изменения, представленные в работе, позволяют предварительно оценить снижение массы силовой балки пилона с 472 до 350 кг, т. е. на 122 кг, при полном соответствии требованиям прочности, жесткости и частотным характеристикам.

### Литература

- [1] Шимкович Д. Г. *Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows*. Москва, ДМК Пресс, 2003, 448 с.
- [2] Астахов. М.Ф., Караваев А.В., Макаров С.Я., Суздальцев Я.Я. *Справочная книга по расчету самолета на прочность*. Москва, изд-во оборонной промышленности, 1954, 708 с.
- [3] Биргер И.А., Пановко Я.Г. *Прочность. Устойчивость. Колебания. Т. 1*. Москва, Машиностроение, 1968, 832 с.

УДК 621.396

## Схема защиты усилительного прибора передатчика

© Метелкин Владимир Николаевич

Россия, г. Рязань, АО «Государственный Рязанский приборный завод»

[Chudik85@mail.ru](mailto:Chudik85@mail.ru)

*Представлена схема защиты усилительного прибора передатчика бортовой радиолокационной станции. В качестве дополнительной меры защиты лампы автором разработана защита от превышения длительности модулирующего импульса, уменьшения скважности импульсов менее 4 и от перехода импульсной последовательности в непрерывный режим уровнем логической единицы. Проведено моделирование предложенной схемы в программе MicroCap, что подтвердило ее работоспособность.*

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, передатчик, микросхема, моделирование, импульс.

Усилительным прибором в передатчике бортовой радиолокационной станции служит комплект ламп бегущей волны (ЛБВ) [1]. Поскольку эти лампы работают при высоких напряжениях и сильно разогреваются в процессе работы, к параметрам передатчика предъявляются серьезные требования. Для того чтобы лампа не перегревалась и не выходила из строя, длительность отпирающего импульса не должна превышать 512 мкс, а скважность должна быть не менее 4. По статистике наиболее часто отказывающим элементом передатчика является комплект ЛБВ [2].

В качестве дополнительной меры защиты ламп автором предлагаемой статьи была разработана защита от превышения длительности модулирующего импульса, уменьшения скважности импульсов менее 4 и от перехода импульсной последовательности в непрерывный режим уровнем логической единицы. Разработать такую схему защиты с помощью времязадающих элементов и цепочек не представляется возможным, так как длительность модулирующего импульса меняется в широких пределах — 0,4...120 мкс. Поэтому разработана схема защиты, функционирующая по принципу цифрового частотомера (рис. 1). Задающие генераторы на микросхеме 530ГГ1 формируют непрерывную последовательность импульсов с частотой 20 и 22 МГц.

Импульсы от задающих генераторов поступают на счетчики, которые изначально заблокированы. Счетчики разблокируются фронтом модулирующего импульса. Схема счета на микросхемах 1533ИЕ7 (DD7, DD9, DD11) формирует двоичный код, который соответствует длительности модулирующего импульса, после окончания импульса данный код поступает на входы двоичных цифровых компараторов (микросхемы 1533СП1). Этот код также поступает на логику для блокирования схемы прохождения модулирующего импульса при длительности более 120 мкс (триггер 1533ТР2 DD3.1). После окончания модулирующего импульса схема прохождения этих импульсов блокируется триггером DD3.3. Схема счета на микросхемах DD8, DD10, DD12, DD13 продолжает формировать двоичный код после окончания модулирующего импульса. Этот код также поступает на входы цифровых компараторов.

Так как разряды двоичных кодов на входах компараторов сдвинуты относительно друг друга на два разряда, то схема длительности импульсов формирует на компараторах двоичный код, равный 4-кратной длительности модулирующего импульса. При равенстве двоичных кодов со схем счета длительности и периода импульсов сигнал с выхода компаратора сбрасывает счетчики и блокирует схему счета, а также разблокирует схему прохождения модулирующих импульсов. При переходе импульсов в непрерывный режим схема прохождения данных импульсов блокируется через 120 мкс и не разблокируется по сигналу с компаратора до появления спада модулирующего импульса.

Моделирование в программе MicroCap подтвердило работоспособность предлагаемой схемы (рис. 2). На данном этапе изготовлен и проверен макет, подтвердивший заданный алгоритм работы. Такая схема позволит полностью исключить отказы ламп бегущей волны по причине работы блока с модулирующими импульсами, не соответствующими требованиям на комплект ЛБВ, и создающими для нее аварийный режим работы.

## Литература

- [1] Бакулев П.А. *Радиолокационные системы*. Москва, Радиотехника, 2004, 320 с.
- [2] Силин Р.А. *Периодические системы*. Москва, Высшая школа, 2003.

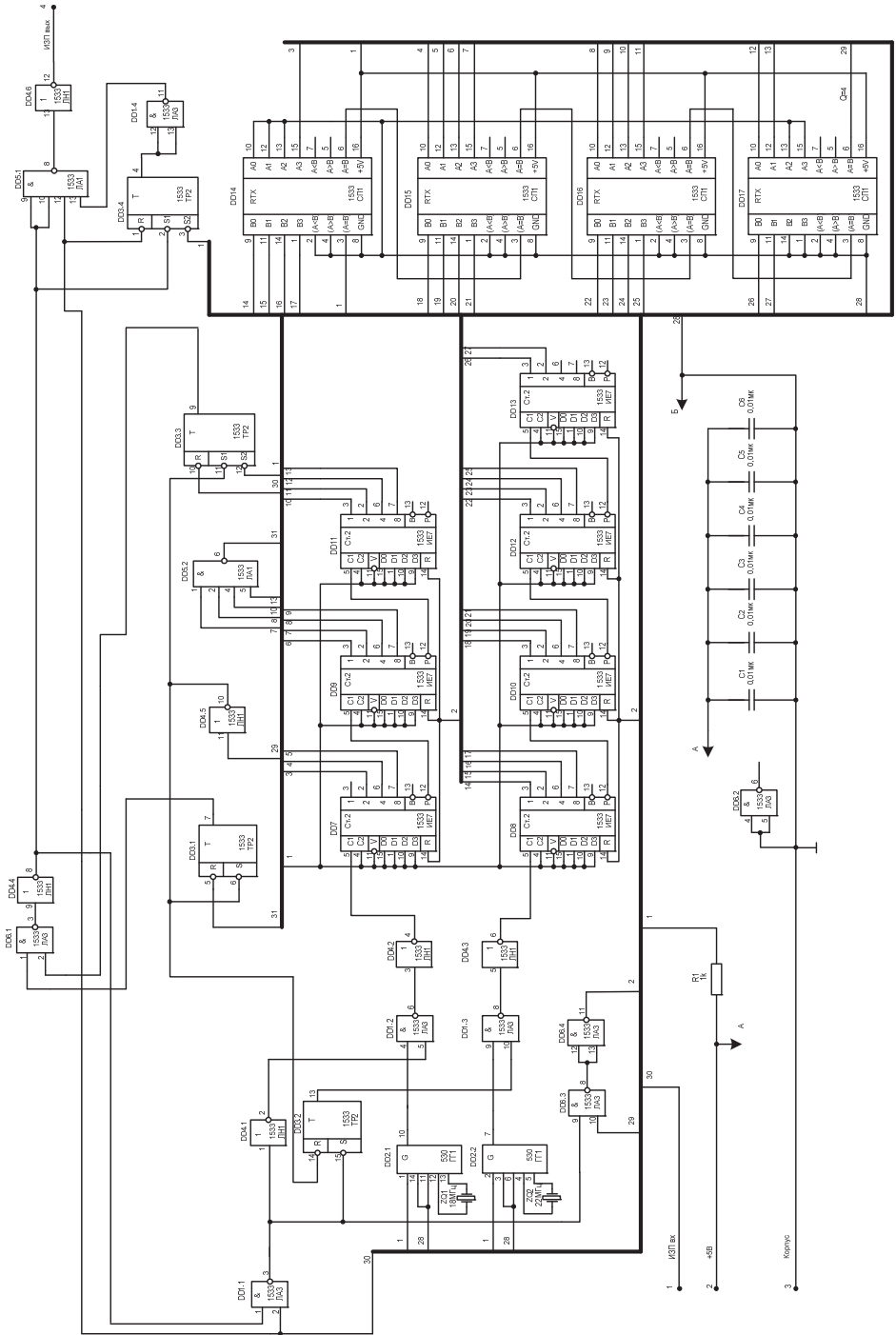


Рис. 1. Схема защиты усилительного прибора передатчика

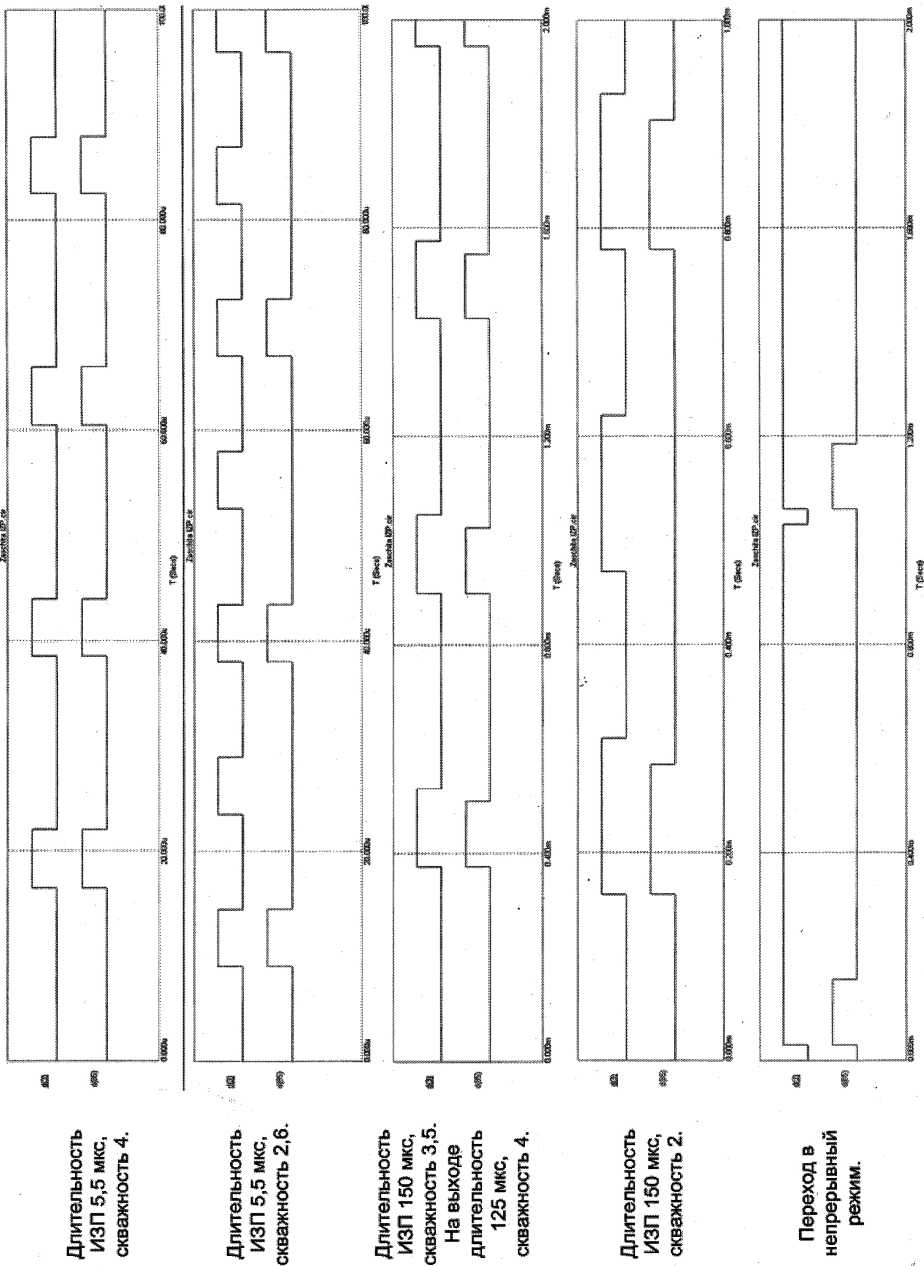


Рис. 2. Результат моделирования схемы в программе MicroCap

УДК 629.114

## Влияние гидравлического оборудования на потребительские свойства автомобилей-самосвалов

© Нигметзянов Азат Амирович, Савинков Андрей Сергеевич,  
Поляков Денис Викторович, Хабибуллин Рифат Габдулхакович

Россия, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, Научно-технический центр  
ОАО «КАМАЗ»

[Andrey.Savinkov@kamaz.ru](mailto:Andrey.Savinkov@kamaz.ru), [Denis.Polykov@kamaz.ru](mailto:Denis.Polykov@kamaz.ru),  
[Azat.Nigmatzyanov@kamaz.ru](mailto:Azat.Nigmatzyanov@kamaz.ru)

*Рассмотрены основные проблемы современных автомобилей-самосвалов КАМАЗ, варианты повышения их грузоподъемности. Выделены перспективные направления развития гидрооборудования самосвальной техники для увеличения металлоемкости конструкции самосвальной установки и повышения удобства использования самосвала.*

**Ключевые слова:** гидравлическое оборудование, гидроцилиндры, грузоподъемность, автомобили-самосвалы, дополнительные опции самосвальной установки.

Автомобили-самосвалы — один из самых распространенных типов специализированных грузовых автомобилей. Технический уровень автомобиля, соответствие его конструкции требованиям эксплуатации непосредственно влияют на производительность транспорта [1]. Важнейшими из потребительских свойств самосвалов в грузоперевозках являются грузоподъемность и время разгрузки.

Автомобили-самосвалы ОАО «КАМАЗ» имеют грузоподъемность 6...33 т. И, если время разгрузки самосвала регулируется производительностью насоса, то для сохранения устойчивости автомобиля при разгрузке из-за возросшей грузоподъемности приходится повышать жесткость конструкции на кручение, усиливая самосвальный надрамник крестообразной поперечиной и стабилизаторами поперечной устойчивости. Поэтому основной проблемой современных автомобилей-самосвалов КАМАЗ является большая металлоемкость конструкции самосвальной установки, что негативно сказывается на общей грузоподъемности автомобиля.

Проведем анализ, каким образом можно за счет оптимизации гидравлического оборудования повысить грузоподъемность автомобиля-самосвала. Поскольку грузоподъемность самосвала, в основном, определяется длиной платформы и высотой бортов (до определенных значений, регламентированных законодательством РФ), то изменяя эти два параметра, приходится менять и параметры элементов гидрооборудования:

1) насос и гидроцилиндр. Так как для подъема более длинной платформы необходим гидроцилиндр с большим ходом штока, а время разгрузки самосвала остается прежним (особо важный экономический показатель для перевозок на короткие расстояния), то следует выбирать насос более высокой производительности и более высокого давления;

2) гидробак. Изменение параметров насоса требует:

а) увеличения объема гидробака (ввиду повышения объема гидроцилиндра и наличия дополнительного объема для поддержания оптимальной температуры гидравлической жидкости и компенсации повышенного давления в гидросистеме),

б) применения высококачественных гидравлических жидкостей, обеспечивающих стабильную работу гидроаппаратов в широком диапазоне температур —  $-40...+50^{\circ}\text{C}$ ,

в) применения высококачественных фильтров, обеспечивающих стабильную и высокопроизводительную работу гидронасосов.

Таким образом, увеличение производительности насоса, объема гидроцилиндра и гидробака позволяет повысить грузоподъемность самосвала, но не решает проблему увеличения металлоемкости конструкции самосвальной установки. Поэтому для решения этой проблемы, а также повышения удобства использования самосвала, можно выделить следующие перспективные направления развития гидрооборудования самосвальной техники:

1) применение парных гидроцилиндров (рис. 1). Такое решение позволяет отказаться от использования стабилизатора поперечной устойчивости в конструкции самосвального надрамника, поскольку парные гидроцилиндры выполняют его функцию. Благодаря применению парных гидроцилиндров уменьшается вес конструкции самосвальной установки, увеличивается грузоподъемность самосвала, а за счет уменьшения высоты центра тяжести обеспечивается хорошая устойчивость при разгрузке. Сравнение характеристик гидроцилиндров приведено в табл. 1;



Рис. 1. Автомобиль-самосвал КАМАЗ-65205 с парными гидроцилиндрами

Таблица 1

Гидроподъемник	Вес, кг	Объем масла, л	Общий вес, кг
Парный RT 59	184	23,2	205
Одиночный подкузовной	187	32,1	216
Фронтального типа	292	53,4	340

2) применение гидроцилиндров высокого давления. За счет увеличения давления в гидросистеме возможно уменьшение объема гидробака и более компактное расположение гидравлического оборудования на шасси автомобиля, а также повышение скорости подъема самосвальной платформы (уменьшение времени разгрузки);



3) использование фронтальных гидроцилиндров повышенной поперечной устойчивости. За счет крепления на цапфах гидроцилиндры такого типа позволяют удерживать самосвал от опрокидывания на площадках с поперечным уклоном до  $6^\circ$  (с обычными гидроцилиндрами обеспечивается устойчивость до  $3^\circ$ );

4) установка гидрораспределителя на гидробаке/гидроцилиндре. Такое решение уменьшает количество рукавов высокого давления, повышая компактность расположения гидравлики, соответственно повышая удобство ремонта и обслуживания;

5) применение напорных и сливных фильтров с тонкостью фильтрации 25 мкм (при давлении менее 20 МПа) и 10 мкм (при давлении больше 20 МПа) повышает ресурс насоса;

6) использование технологии хонингования в производстве гидроцилиндров, применение антифрикционных покрытий [2] и высококачественных уплотнений позволяет уменьшить потери в гидросистеме и утечки из гидроцилиндра;

7) переход от использования КЭМ (клапанов электромагнитных) к пневмоуправлению самосвальным оборудованием с помощью пневматического джойстика. Данное решение позволяет отказаться от ненадежных с точки зрения эксплуатации электрических разъемов, подверженных влиянию окружающей среды, а также упростить схему монтажа за счет перехода от резьбовых к быстроразъемным соединениям;



КАМАЗ-65205



КАМАЗ-6580



КАМАЗ-65801



КАМАЗ-65802

**Рис. 2.** Модельный ряд автомобилей-самосвалов КАМАЗ

8) применение бортовых систем управления безопасностью, а также обеспечивающих получение информации о параметрах работы узлов и систем самосвала [3]. В данном случае возможно использование системы управления самосвала с функцией взвешивания KIPTRONIC, в различных исполнениях включающую в себя: систему взвешивания; управление включением КОМ, подъемом/опусканием платформы и приводом бортов; ручное управление при помощи пульта в кабине; датчики груза; датчики давления;

9) использование дополнительных опций самосвальной установки — гидравлического подъемного заднего борта, гидравлическое открывание бортов при боковой разгрузке, автоматическая фиксация оси опрокидывания на самосвалах с 3-сторонней разгрузкой.

Проведенный анализ показал, что проблему повышенной металлоемкости конструкции самосвальной установки возможно решить с одновременным увеличением грузоподъемности самосвала. Таким образом, постоянное повышение требований к потребительским свойствам самосвалов со стороны рынка обуславливает новые конструкторские решения с использованием гидравлического оборудования с передовыми характеристиками, что позволяет ОАО «КАМАЗ» предложить потребителям автомобили — самосвалы нового модельного ряда: КАМАЗ-65205, КАМАЗ-6580, КАМАЗ-65801, КАМАЗ-65802 (рис. 2).

#### Литература

- [1] Белокуров В.Н., Гладков О.В., Захаров А.А., Мелик-Саркисянц А.С. *Автомобили-самосвалы*. Москва, Машиностроение, 1987, 216 с.
- [2] Стукач А.В. Применение антифрикционных покрытий в объемном гидроприводе. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 2011, № 5, с. 6–8.
- [3] Бахтурин Ю.А. Современные тенденции развития карьерного транспорта. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Москва, МГГУ-МГИ, 2009, с. 403–414.

УДК 62-133

## Синтез и исследование приводного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства

© Приходько Александр Александрович, Смелягин Анатолий Игоревич

Россия, г. Краснодар, Кубанский государственный технологический университет

[sannic92@gmail.com](mailto:sannic92@gmail.com)

*Перемешивающие устройства — один из наиболее распространенных видов оборудования, используемого для проведения различных физических и химических процессов. Их применяют в различных отраслях промышленности для интенсификации тепло- и массообмена. В настоящее время наиболее перспективными являются пе-*

ремешивающие устройства с возвратно-вращательным движением рабочих органов: в них отсутствуют вертикальные вибрации, применяются стандартные уплотнения, а рабочие органы таких устройств обеспечивают высокий градиент скоростей перемешиваемой среды. В статье проведен структурный синтез приводного механизма перемешивающего устройства, а также проводится его кинематический анализ.

**Ключевые слова:** перемешивающее устройство, возвратно-вращательное движение, структурный синтез, структурная математическая модель, кинематический анализ.

Перемешивающие устройства используются для проведения большинства химических, нефтехимических и пищевых процессов. В настоящее время наиболее широкое применение находят классические вращательные перемешивающие устройства. В ряде работ исследованы более перспективные виброперемешивающие устройства (ВПУ) [1–3].

Применение ВПУ обеспечивает улучшение качества получаемых продуктов по сравнению с классическими перемешивающими устройствами [2, 3]. К недостаткам таких устройств можно отнести значительные вертикальные вибрации, которые передаются в окружающую среду и усложняют работу оператора, а также наличие поступательно движущегося штока, который сложно уплотнить, в результате чего такие ВПУ ненадежны и их нельзя использовать в реакторах, работающих под давлением.

По принципу воздействия на обрабатываемую среду возвратно-вращательные перемешивающие устройства (ВВПУ) аналогичны ВПЦ, но, в отличие от ВПУ, в таких ВВПУ отсутствуют вертикальные вибрации, а также использованы хорошо отработанные уплотнительные устройства. ВВПУ могут иметь один (центральный), два и более рабочих органа [4, 5]. Наличие лишь одного рабочего органа затрудняет использование ВВПУ в больших объемах промышленных реакторов.

Проведем синтез приводного механизма ВВПУ, используя структурную математическую модель, описанную в [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \frac{1}{2} \left( \sum_{t=T-j}^2 m_t + s \right); \\ n = \sum_{t=T-j}^T n_t; \\ W = \sum_{i=1}^{\Pi-1} i p_i - k \Pi; \\ k = p - n; \\ p = \sum_{i=1}^{\Pi-1} p_i; \\ T \leq k + 1, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $p$  — общее число кинематических пар;  $T$  — число вершин базового звена;  $t$  — число вершин звеньев;  $n$  — общее число подвижных звеньев;  $n_t$  — число подвижных

звеньев с  $t$  вершинами;  $p$  — общее число кинематических пар;  $p_i$  — число кинематических пар  $i$ -й подвижности;  $k$  — число независимых замкнутых контуров;  $\Pi$  — подвижность пространства, в котором синтезируется механизм;  $s$  — число присоединений к стойкам;  $i$  — целочисленный индекс;  $j$  — целочисленный индекс.

Поскольку желательно, чтобы приводной механизм ВВПУ был относительно несложным, то пусть он будет одноподвижным ( $W = 1$ ), существовать в трехподвижном пространстве ( $\Pi = 3$ ), иметь два независимых замкнутых контура ( $k = 2$ ) и 3-вершинное базовое звено ( $T = 3$ ). Структурная математическая модель (1) после подстановки в нее исходных данных примет следующий вид:

$$\begin{cases} p = \frac{1}{2}(3n_3 + 2n_2 + s); \\ n = n_3 + n_2; \\ 1 = 2p_2 + p_1 - 6; \\ 2 = p - n; \\ p = p_2 + p_1; \\ 3 \leq 2 + 1. \end{cases} \quad (2)$$

Понятно, что в синтезируемом механизме число звеньев, кинематических пар и присоединений к стойке должно быть целым и положительным. Следовательно, решения модели (2) должно удовлетворять этим условиям.

Исследования модели (2) показали, что она имеет восемь вариантов решения, которые удовлетворяют начальным условиям синтеза:

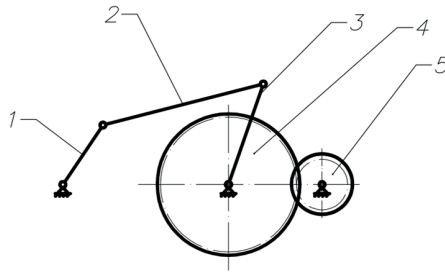
$$\begin{aligned} n_3 = 1; p_2 = 1; s = 3; p = 6; n = 4; p_1 = 5; n_2 = 3; \\ n_3 = 2; p_2 = 1; s = 2; p = 6; n = 4; p_1 = 5; n_2 = 2; \\ n_3 = 3; p_2 = 1; s = 1; p = 6; n = 4; p_1 = 5; n_2 = 1; \\ n_3 = 1; p_2 = 2; s = 3; p = 5; n = 3; p_1 = 3; n_2 = 2; \\ n_3 = 2; p_2 = 2; s = 2; p = 5; n = 3; p_1 = 3; n_2 = 1; \\ n_3 = 3; p_2 = 2; s = 1; p = 5; n = 3; p_1 = 3; n_2 = 0; \\ n_3 = 1; p_2 = 3; s = 3; p = 4; n = 2; p_1 = 1; n_2 = 1; \\ n_3 = 2; p_2 = 3; s = 2; p = 4; n = 2; p_1 = 1; n_2 = 0. \end{aligned}$$

Проведенный анализ полученных решений показал, что конструктивно наиболее просто обеспечивает необходимый режим работы ВВПУ с исполнительным механизмом, соответствующим первому решению. Согласно этому решению, механизм должен иметь одно 3-вершинное звено ( $n_3 = 1$ ), три 2-вершинных звена ( $n_2 = 3$ ), одну 2-подвижную кинематическую пару ( $p_2 = 1$ ), пять одноподвижных кинематических пар ( $p_1 = 5$ ), четыре подвижных звена ( $n = 4$ ), три присоединения к стойке ( $s = 3$ ).

Найденному решению и условиям синтеза соответствует только одна структурная схема, приведенная на рис. 1.

Полученный приводной механизм образован в результате последовательного объединения шарнирного 4-звенника и пары зубчатых колес. Следовательно, чтобы исследовать кинематику этого механизма, необходимо проанализировать кинематику механизмов, его образовавших.

Кинематический анализ шарнирного 4-звенника детально описан в работах [1, 7], в которых получены зависимости угла поворота коромысла от угла поворота кривошипа, аналоги скоростей и ускорений  $\varphi_3(\varphi_1)$ ,  $\varphi_3'(\varphi_1)$ ,  $\varphi_3''(\varphi_1)$ .

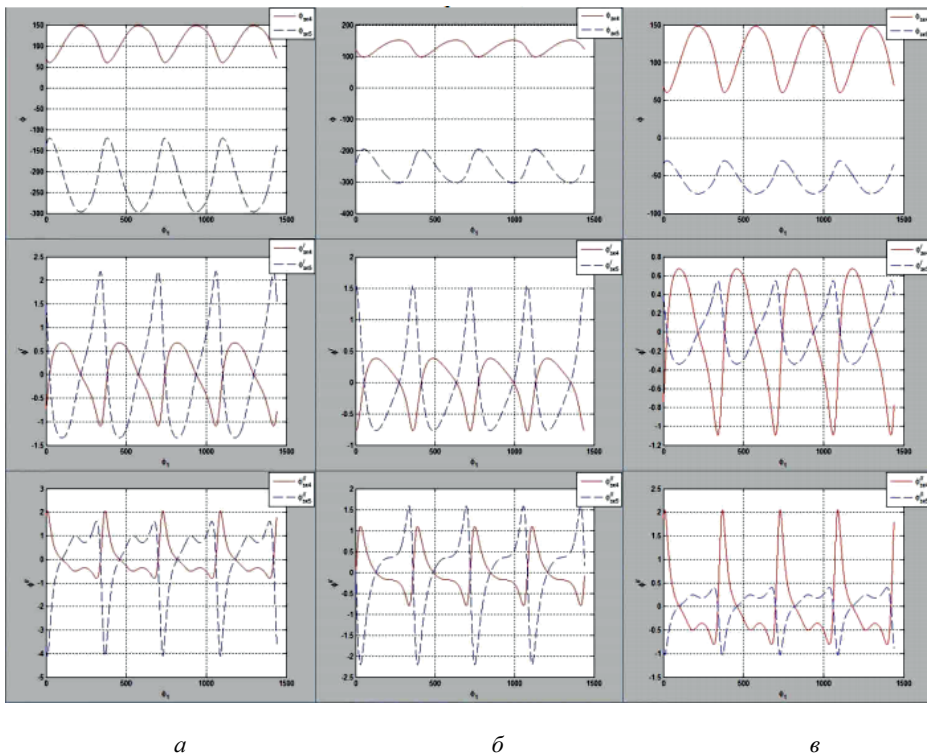


**Рис. 1.** Приводной механизм ВВПУ:  
 1 — кривошип; 2 — шатун; 3 — коромысло; 4 — центральное зубчатое колесо; 5 — периферийное зубчатое колесо

Так как зубчатое колесо 4 закреплено на валу коромысла 3, то

$$\begin{aligned} \varphi_{з.к4} &= \varphi_3; \\ \varphi'_{з.к4} &= \varphi'_3; \\ \varphi''_{з.к4} &= \varphi''_3, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varphi_{з.к4}$ ,  $\varphi'_{з.к4}$  и  $\varphi''_{з.к4}$  — соответственно угол поворота, аналоги скоростей и ускорений зубчатого колеса 4.



**Рис. 2.** Кинематическая модель ВВПУ

Параметры движения зубчатого колеса 5 определяются передаточным отношением  $i$ :

$$\begin{aligned}\varphi_{3,к5} &= \varphi_{3,к4}i; \\ \varphi'_{3,к5} &= \varphi'_{3,к4}i; \\ \varphi''_{3,к5} &= \varphi''_{3,к4}i,\end{aligned}\tag{4}$$

где  $\varphi_{3,к5}$ ,  $\varphi'_{3,к5}$  и  $\varphi''_{3,к5}$  — соответственно угол поворота, аналоги скоростей и ускорений зубчатого колеса 5.

Используя формулы (3) и (4), а также кинематическую модель шарнирного 4-звенника [1, 7], построим кинематические модели исполнительных механизмов ВВПУ с различными размерами звеньев:

- 1)  $l_1 = 0,37$  м,  $l_2 = 0,85$  м,  $l_3 = 0,55$  м,  $l_4 = 0,85$  м,  $i = 2$  (рис. 2, а);
- 2)  $l_1 = 0,37$  м,  $l_2 = 0,85$  м,  $l_3 = 1$  м,  $l_4 = 0,85$  м,  $i = 2$  (рис. 2, б);
- 3)  $l_1 = 0,37$  м,  $l_2 = 0,85$  м,  $l_3 = 0,55$  м,  $l_4 = 0,85$  м,  $i = 0,5$  (рис. 2, в).

Анализ полученных кривых показывает, что синтезированный приводной механизм ВВПУ обеспечивает высокий перепад скоростей перемешиваемой среды, создавая рациональный тепломассообмен в реакторе, а изменение длины коромысла и передаточного отношения зубчатой передачи позволяет регулировать амплитуду колебаний рабочих органов в широких пределах.

## Литература

- [1] Смелягин А.И., Юхневич И.В. Структурный синтез и кинематический анализ простых исполнительных механизмов виброперемешивающих устройств. *Омский научный вестник*, 2012, № 3–113, с. 72–75.
- [2] Ткаченко Р.Н., Христюк В.Т., Смелягин А.И. Использование вибрационного воздействия в технологии красных вин. *Известия вузов. Сер. Пищевая технология*, 2010, № 1, с. 61–64.
- [3] Ткаченко Р.Н., Христюк В.Т., Смелягин А.И. Влияние вибрационной обработки мезги винограда на химический состав виноматериалов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 2011, № 10, с. 52–55.
- [4] Приходько А.А., Смелягин А.И. *Перемешивающее устройство*. Пат. 152110 РФ, МПК<sup>7</sup> В01F 7/16. № 2015103695/05; заявл. 04.02.2015; опубл. 10.05.2015, бюл. № 13, 5 с.
- [5] Смелягин А.И., Приходько А.А. Структурный синтез сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства. *Известия вузов. Сер. Пищевая технология*, 2014, № 5–6, с. 85–88.
- [6] Смелягин А.И. *Теория механизмов и машин*. Москва, Инфра-М; Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2008, 263 с.
- [7] Смелягин А.И., Приходько А.А. Кинематический анализ сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства. *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*, 2014, № 4, с. 79–86.

УДК 621.316.8

## Прецизионные потенциометры. Возможности создания и перспективы

© Цыганков Алексей Игоревич, Недорезов Валерий Григорьевич

[cygankv-aleksejj@rambler.ru](mailto:cygankv-aleksejj@rambler.ru)

*Основной проблемой изготовления однооборотного потенциометра является обеспечение качества намотки резистивного элемента. Рассмотрен принцип построения намоточного станка, обеспечивающего требуемую точность раскладки. Приведена методика контроля процесса раскладки резистивной проволоки по каркасу с использованием электронной растровой микроскопии. Дан пример контроля резистивной проволоки на соответствие химическому составу с использованием электронной растровой микроскопии. Описана автоматическая система контроля функции преобразования.*

**Ключевые слова:** *потенциометр, функциональная характеристика, резистивный элемент, методика контроля, растровая электронная микроскопия.*

Потенциометр — первичный измерительный преобразователь датчика угла поворота, широко используемого в различных отраслях промышленности для автоматизации и управления технологическими процессами. Потенциометр представляет собой регулируемый делитель электрического напряжения, состоящий из резистора с подвижным отводным контактом — движком. При этом коэффициент деления потенциометра является функцией угла поворота движка относительно резистивного элемента [1]. До настоящего времени считалось, что потенциометры могут быть вытеснены с рынка цифровыми датчиками угла поворота. Однако успехи в технологии их изготовления и применение новых методик контроля существенно улучшили характеристики потенциометров, что позволило успешно их использовать и в настоящее время.

Свойства потенциометров в значительной степени определяются технологией изготовления резистивного элемента. При невысоких требованиях к преобразованию угла поворота в основном применяются потенциометры с углеродистым или металлокерамическим резистивным элементом. Для особо ответственных и прецизионных приложений, как правило, используются проволочные потенциометры, которым характерна высокая линейность функции преобразования угла поворота в напряжение, малый температурный коэффициент сопротивления, низкий уровень собственных шумов и высокая износоустойчивость. В зависимости от назначения различают многооборотные и однооборотные проволочные резисторы. Рабочий угол поворота подвижной системы многооборотных потенциометров определяется числом оборотов  $N$  и может достигать до  $360N$  град. Из-за большого диапазона углов, а следовательно, и выходного сопротивления влияние неточности раскладки резистивной проволоки по каркасу резистивного элемента у многооборотных потенциометров не столь критично, как у однооборотных потенциометров.

Резистивный элемент проволочного однооборотного потенциометра изготавливается методом намотки резистивной проволоки на диэлектрическое основание —

цилиндрический каркас. Основная проблема изготовления однооборотного потенциометра — обеспечение качества намотки резистивного элемента [2]. Сложность заключается в том, что точность раскладки резистивного провода по каркасу не должна превышать нескольких микрон. Выпускаемое в настоящее время намоточное оборудование (как зарубежное, так и отечественное) предназначено для намотки тороидальных и кольцевых трансформаторов, где не требуется точная раскладка провода по каркасу. В связи с этим на предприятии ОАО «НИИЭМП» был разработан и изготовлен свой собственный станок для намотки потенциометров. Отличительной особенностью данного станка является жесткая механическая обратная связь между челноком и подающими каркас роликами, что позволяет обеспечивать требуемую точность раскладки резистивной проволоки на каркас.

Авторами данной статьи предлагается методика контроля раскладки резистивной проволоки по каркасу с использованием методов электронной растровой микроскопии [3]. Методика контроля заключается в следующем:

- 1) полученная при помощи растрового электронного микроскопа фотография резистивного элемента потенциометра помещается в программу Компас-3D;
- 2) находится центр каркаса путем построения окружности по трем точкам, которая затем разбивается на 40 секторов по  $8^{\circ}15'$  согласно методике измерения;
- 3) подсчитывается количество витков в каждой секции;
- 4) для потенциметрической схемы подключения рассчитывается отклонение функциональной характеристики;
- 5) строится графическая зависимость отклонения функциональной характеристики от теоретической по 40 секторам.

Качество потенциометра определяется также свойствами применяемой проволоки. Резистивная проволока для точных потенциометров должна иметь по всей длине постоянное удельное сопротивление, низкий температурный коэффициент сопротивления, высокую стойкость к коррозии, стойкость к истиранию и механическому износу, а также большую прочность на разрыв. Данным требованиям удовлетворяют проволоки из сплавов благородных металлов, например, проволоки из палладий-вольфрамового сплава ПдВ-20. Вся поступающая на предприятие проволока, которая используется для изготовления потенциометров, проходит входной контроль, осуществляемый с помощью системы энергодисперсионного микроанализа.

Высокие требования к точности и надежности проволоочных потенциометров накладывают жесткие требования на контроль эксплуатационных характеристик. Каждый изготовленный потенциометр проходит приработку, т. е. выдерживается до 100 часов при рабочей температуре  $85^{\circ}\text{C}$  и проходит испытание на износ (вращение до 300 циклов). Затем потенциометр разбирается, визуально под электронным растровым микроскопом оценивается состояние его резистивного элемента, анализируются продукты износа и состояние контактного узла [4]. Потенциометры, у которых в процессе приработки произошло нарушение намотки, повреждение резистивного элемента или контактного узла, отбраковываются. Годные потенциометры собираются и проверяются на электрическую прочность, пропадание контактирования и погрешность линейности функции преобразования.

Контроль функции преобразования потенциометра вручную с помощью оптической делительной головки приводит к большим временным затратам и позволяет точно определить погрешности только в установленных точках. С целью автоматизации на предприятии была разработана автоматическая система контроля функции преобразования, в которой оси оптической головки и поверяемого потенциометра



соединены между собой и вращаются одновременно. Встроенный измеритель определяет отклонение функции преобразования по всему диапазону, результат измерения выводится на жидкокристаллический индикатор измерителя. Весь процесс контроля занимает всего несколько минут, в то время как контроль вручную может достигать нескольких часов.

Таким образом, использование современного оборудования и методик контроля позволило создать отечественные однооборотные потенциометры типа ПТП с точностью воспроизведения функции преобразования угла поворота до  $\pm 0,25\%$ , по своим характеристикам, не уступающие зарубежным аналогам. Ранее подобные потенциометры создавались только в Украине и в России не производились.

### **Литература**

- [1] Белевцев А.Т. *Потенциометры*. Москва, Машиностроение, 1968, 328 с.
- [2] Недорезов В.Г., Цыганков А.И., Доросинский А.Ю. Ограничения в создании однооборотных прецизионных проволочных потенциометров. *Электронные компоненты*, 2015, № 2, с. 88–95.
- [3] Недорезов В.Г., Цыганков А.И. Особенности контроля микроструктур методами электронной микроскопии. *Тр. междунар. симп. «Надежность и качество»*, 2014, т. 2, с. 42–44.
- [4] Недорезов В.Г., Цыганков А.И. Влияние продуктов износа контактной пары потенциометра на надежность его работы. *Тр. междунар. симп. «Надежность и качество»*, 2015, т. 2, с. 152–153.

УДК 621.376.6

## **Способ автоматического определения несущей частоты амплитудно-манипулированного колебания, демодуляции, декодирования и восстановления исходных данных**

© Валеев Булат Марсович, Евдокимов Юрий Кириллович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[sielf@mail.ru](mailto:sielf@mail.ru)

*Представлен новый способ поиска и обнаружения сигнала, при многих неизвестных параметрах. Зачастую если сигнал промодулирован на высокой частоте и частота точно не известна довольно сложно выделить несущее колебание, определить вид модуляции и произвести демодулирование в автоматическом режиме. Применение частотного расширения метода оценки сигналов позволяет сделать это в автоматическом режиме.*

**Ключевые слова:** прием и обработка сигналов, демодуляция, микропроцессоры, спектральный анализ сигналов.

В настоящее время цифровая обработка сигналов находит все более широкое применение в аналоговой технике, где всегда царили аналоговые схемы, например схемы синфазной квадратурной модуляции. При этом значительной проблемой является граница однозначного восстановления оцифрованного сигнала описанная в теореме Котельникова. Граница в  $1/2$  частоты дискретизации осложняет разработку устройства и требует высокочастотной схемы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). При этом для работы необходим алгоритм, производящий значительный объем вычислений. Однако можно разработать методики, позволяющие минимизировать вычисления и правильно подобрать частоту дискретизации АЦП.

Сущность предложенного метода расширения оценки сигналов заключается в том, что при использовании нескольких АЦП, настроенных на некрatные друг другу тактовые частоты, для оцифровки одного и того же сигнала. При этом, если на входе преобразователей присутствует сигнал на частоте выше частоты Котельникова, на

входе преобразователя будет выделено колебание не на истинной частоте, а на смещенной в область низких частот до частоты Котельникова. При этом истинную частоту можно вычислить по формуле

$$f_{\text{ист}} = f_{\text{рез}} + kf_{\text{такт АЦП}}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{ист}}$  — истинная частота колебания на входе АЦП;  $f_{\text{рез}}$  — частота колебания на выходе АЦП,  $f_{\text{такт}}$  целым числом.

Как следует из выражения (1) уравнение имеет бесконечно большое количество решений. Однако, если использовать два АЦП, настроенных на разные частоты можно получить также бесконечное количество решений, но резко увеличить область частот, в которых решение данного уравнения будет всего лишь одно. Покажем сущность работы метода схематично на рисунках. На рис. 1 представлен сигнал на входе АЦП. Штриховыми линиями выделены частоты равные половине частоты дискретизации.

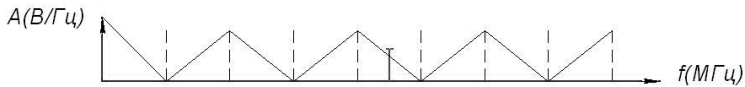


Рис. 1. Сигнал на входе АЦП

Оценка сигнала после АЦП показана на рис. 2, видно существование бесконечного множества решений, при которых получим тот же спектр что и при исходном сигнале.

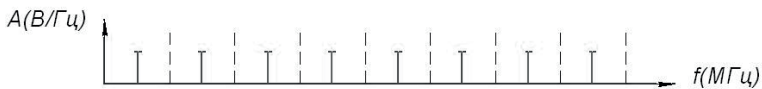


Рис. 2. Оценка сигнала на выходе АЦП

Если рассмотреть аналогичный процесс на другом АЦП, с иной частотой дискретизации, можно заметить, что из выделенных возможных решений остается только одно возможное (рис. 3).



Рис. 3. Сигнал на выходе 2-го АЦП с тактовой частотой, отличной от 1-го АЦП

Таким образом можно выделить некоторое колебание на входе приемника даже если это колебание заведомо намного выше тактовой частоты работы АЦП. Однако, поскольку несущая частота всегда содержит информацию, необходимо учитывать ширину спектра предполагаемого сигнала. Для этого нужен второй АЦП на некоторой отстройке частоты, равной минимальной ширине спектра сигнала. Со-

ответственно следующим шагом должна быть перестройка несущей частоты гетеродина в супергетеродинном приемнике на центральную частоту сигнала. В дальнейшем для определения модуляции и демодулирования сигнала легко применить программно определяемый приемник, позволяющий выполнить необходимые вычисления, определить используемую модуляцию и выделить из принятых данных полезную информацию.

### Литература

Кренев А.И. Способ расширения полосы частот оценки спектров сигналов. Пат. № 2516763 Российская Федерация, МПК Н 03 М 1/08 G 01 R 23/16, 2014.

УДК 621.22

## Моделирование переходного процесса пластинчатого насоса

© Зайцев Игорь Александрович<sup>1</sup>, Медведев Александр Владимирович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, Владимирская обл., г. Ковров, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт “Сигнал”»

<sup>2</sup> Россия, Владимирская обл., г. Ковров, Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева, конструкторское бюро «Арматура»

[zenzebubel@mail.ru](mailto:zenzebubel@mail.ru)

*Описано математическое моделирование характеристик пластинчатого насоса. Разработана расчетная схема, на основании которой составлена математическая модель ходовой части пластинчатого насоса. В качестве инструмента моделирования использована система MatLAB Simulink. В результате моделирования установлено, что рассматриваемый пластинчатый насос имеет достаточное быстродействие для его использования в качестве подпиточного насоса.*

**Ключевые слова:** гидропривод, быстродействие, имитационная модель, переходный процесс.

Современный процесс проектирования объемных гидромашин (ГМ) неразрывно связан с применением ПЭВМ. Задача автоматизации этого процесса как и задача углубленных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований многообразных и сложных физических явлений, имеющих место в узлах ГМ, в настоящее время приобретает особую актуальность. Применение средств моделирования позволят, особенно на ранних стадиях проектирования, повысить качество процесса проектирования, сократить материальные и временные затраты, связанные с созданием новых образцов ГМ [1].

Одно из направлений автоматизации процесса проектирования ГМ — разработка математических моделей их узлов и машины в целом. Математические модели позволят спрогнозировать решения задач управления, регулирования, статики, кинематики, динамики и энергетики ГМ с единых методологических позиций.

Объемные ГМ находят достаточно широкое применение в гидроприводах в качестве источников гидравлической энергии — насосов. Они работают в широком диапазоне изменения подач и давлений рабочей жидкости. При этом требования, предъявляемые к качеству их работы в условиях эксплуатации, в большой степени противоречивы. Эти обстоятельства обуславливают существенные трудности при проектировании насосов.

Типовой процесс проектирования насосов предусматривает последовательное выполнение расчетных операций, операций по предварительной разработке конструкции ГМ и операции анализа динамических характеристик этой конструкции. При выполнении операций анализа целесообразно применение математического моделирования с использованием ПЭВМ. Для проведения моделирования необходимым является построение математической модели насоса на основании имеющейся информации.

Динамика ходовой части регулируемого пластинчатого насоса оценена в соответствии с расчетной схемой его ходовой части (рис. 1).

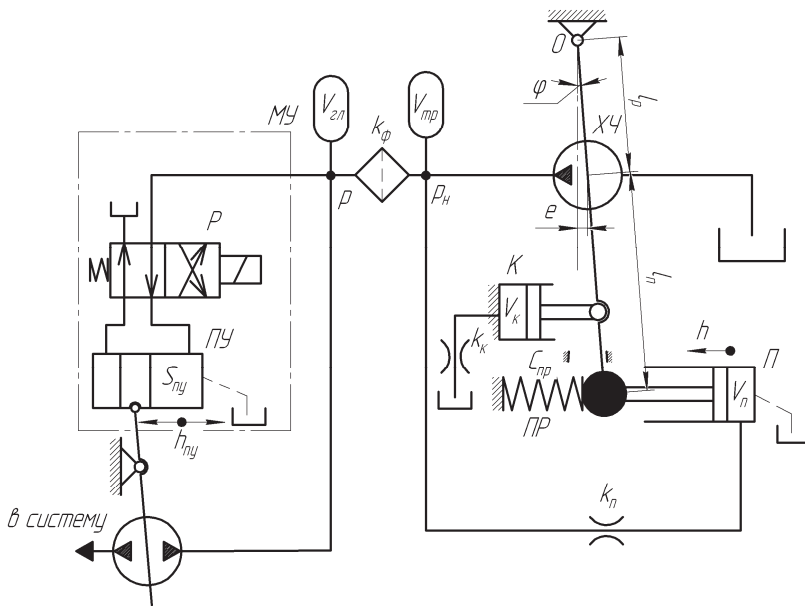


Рис. 1. Расчетная схема ходовой части пластинчатого насоса

Математическая модель пластинчатого насоса основана на уравнении моментов относительно оси  $O$  поворота статора насоса

$$F_{пп}I_{п} - F_{пр}I_{п} - M_{л.сопр} - M_{тр} - M_{в.тр} + F_{уп}I_{п} = J_{\Sigma O}\ddot{\varphi}, \quad (1)$$

где  $F_{\Pi}$  — сила давления рабочей жидкости на поршень  $\Pi$ ;  $F_{\text{пр}}$  — позиционная сила сжатия пружины;  $M_{\text{тр}}$  — момент трения в опоре статора;  $F_{\text{уп}}$  — сила реакции упоров;  $M_{\text{л.сопр}}$  — момент сил лобового сопротивления перемещению статора внутри корпуса насоса, заполненного рабочей жидкостью;  $M_{\text{в.тр}}$  — момент сил вязкого трения при перемещении статора насоса;  $J_{\Sigma O}$  — суммарный момент инерции подвижных частей механизма регулирования;  $\varphi$  — угол поворота статора пластинчатого насоса.

При этом действующие силовые факторы определялись по следующим формулам:

- сила давления рабочей жидкости на поршень

$$F_{\Pi} = p_{\Pi} S_{\Pi} = (p_{\text{упр}} - \Delta p_{\text{упр}}) S_{\Pi}, \quad (2)$$

где  $p_{\text{упр}}$  — давление управления;  $\Delta p_{\text{упр}} = k_{\text{упр}} (v_{\Pi} S_{\Pi})^2$  — падение давления в подводящих каналах;  $k_{\text{упр}}$  — коэффициент сопротивления подводящих каналов, примем  $k_{\text{упр}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ ;

$$\Delta p_{\text{упр}} = k_{\text{упр}} (v_{\Pi} S_{\Pi})^2 = \frac{k_{\text{упр}} J_{\Pi}^2}{S_{\Pi}^2} \varphi^2 \quad (3)$$

$$S_{\Pi} = \frac{\pi d_{\Pi}^2}{2};$$

- позиционная сила сжатия пружины:

$$F_{\text{пр}} = C(h + h_0). \quad (5)$$

Здесь  $h$  — перемещение поршня управления, м;

- момент сил трения в опоре статора

$$M_{\text{тр}} = T f_{\text{с.т.}} \frac{D_{\text{оп}}}{2} \text{sign } h, \quad (6)$$

где  $T_{\text{max}} = p B_{\text{ст}} D_{\text{ст}}$  — максимальная сила нормальной реакции в опоре  $O$  статора;  $p$  — давление нагнетания насоса;

- сила лобового сопротивления жидкости при перемещении статора внутри корпуса насоса, заполненного рабочей жидкостью

$$F_{\text{л.сопр}} = C_x \frac{\rho v_{\text{мест}}^2}{2} S_{\text{м}}. \quad (7)$$

Здесь  $C_x$  — эмпирический коэффициент;  $S_{\text{м}} = D_{\text{ст}} B_{\text{хч}}$  — миделева площадь, м;  $v_{\text{мест}}$  — местная скорость потока в живом сечении  $F_0 - S_{\text{м}}$ ;  $F_0$  — площадь сечения расточки корпуса насоса, перпендикулярно к которому происходит перемещение статора.

При этом местная скорость потока в живом сечении  $F_0 - S_{\text{м}}$

$$v_{\text{мест}} = \frac{v}{1 - S_{\text{м}}/F_0}, \quad (8)$$

где  $v$  — скорость жидкости в сечении перед телом,  $v = \dot{\phi} S_M$ ;

- сила реакции упоров

$$F_{уп} = \begin{cases} 0 & \text{при } h_{\min} < h < h_{\max}; \\ C_{уп} h & \text{при } h \leq h_{\max}; \\ -C_{уп} h & \text{при } h \geq h_{\max}, \end{cases} \quad (9)$$

или

$$F_{уп} = \begin{cases} 0 & \text{при } Q_{\min} < Q < Q_{\max}; \\ C'_{уп} Q & \text{при } Q \leq Q_{\max}; \\ -C'_{уп} Q & \text{при } Q \geq Q_{\max}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $C_{уп}$ ,  $C'_{уп}$  — жесткость упоров.

Для моделирования переходного процесса пластинчатого насоса с помощью программного продукта MatLAB Simulink была построена его имитационная модель (рис. 2)

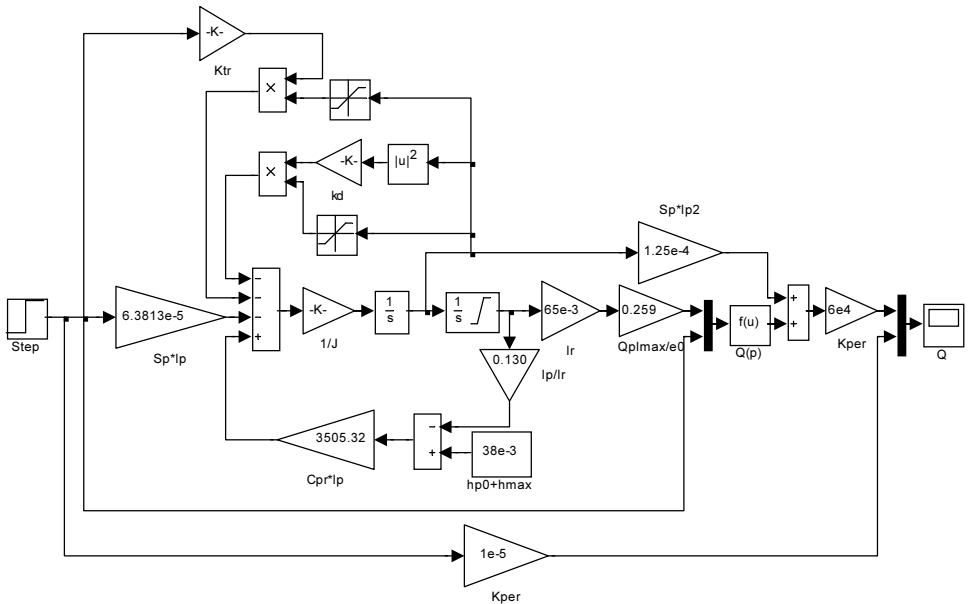
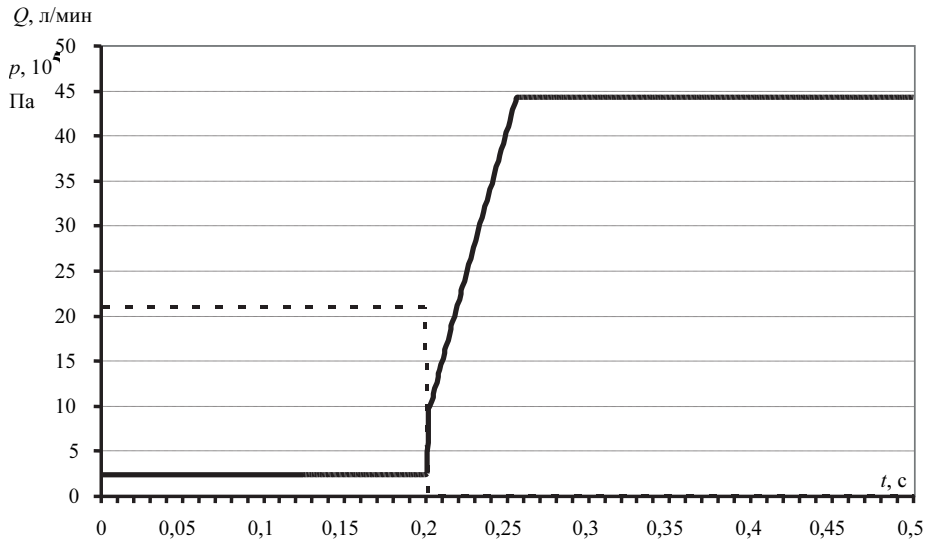


Рис. 2. Имитационная модель пластинчатого насоса

Результаты моделирования реакции пластинчатого насоса (переходный процесс) при изменении давления нагнетания  $p_H$  от  $22 \cdot 10^5$  до 0 Па приведены на рис. 3. Изменение подачи насоса от минимального до максимального значения происходит за 60 мс, что в 2 раза быстрее аналогичного показателя для основного насоса.



**Рис. 3.** Переходный процесс пластинчатого насоса, доказывающий достаточность по быстродействию:

— — — подача насоса; - - - - - давление на выходе насоса

Таким образом, в результате моделирования установлено, что рассматриваемый пластинчатый насос имеет достаточное быстродействие и может быть использован в качестве подпиточного насоса.

### Литература

- [1] Даршт Я.А. *Расчетный комплекс машиностроительной гидравлики*. Ковров, КГТА, 2003, 412 с.
- [2] Казмиренко В.Ф. *Электрогидравлические мехатронные модули движения: Основы теории и системное проектирование*. Москва, Радио и связь, 2001, 432 с.
- [3] Попов Д.Н. *Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем*. Москва, Машиностроение, 1987, 464 с.
- [4] Чемоданов Б.К., ред. *Следящие приводы: В 3 т. Т. 1: Теория и проектирование следящих приводов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, 904 с.



## Контактная жесткость шероховатых поверхностей на основе 3D-моделирования

© Измеров Михаил Александрович, Тихомиров Виктор Петрович

Россия, г. Брянск, Брянский государственный технический университет

[m.izmerov@yandex.ru](mailto:m.izmerov@yandex.ru), [dm-bgtu@yandex.ru](mailto:dm-bgtu@yandex.ru)

*Разработана методика оценки контактной жесткости плоского стыка в упругом состоянии. Представлена автоматизированная система моделирования трехмерного контакта шероховатых инженерных поверхностей, позволяющая моделировать контакт реальных поверхностей или их моделей и оценить основные параметры контакта: контурную и фактическую площадь контакта, контактное давление, жесткость, воспринимаемую поверхностями нагрузку, величину сближения поверхностей, пористость контакта, проницаемость и т. д.*

**Ключевые слова:** контактная жесткость, шероховатость, 3D-моделирование, фрактальные поверхности, контактирование, сближение.

Работоспособность многих устройств и механизмов зависит от состояния контакта сопряженных поверхностей, их нагрузочной способности, величины сближения. Задача становится еще более актуальной, если речь идет об уплотнительных металл-металлических устройствах, обеспечивающих требуемое состояние герметичности в экстремальных условиях, где промежуточные неметаллические уплотнения не обеспечивают нужной герметичности.

Для решения контактной задачи была разработана автоматизированная система трехмерного 3D-моделирования контакта шероховатых поверхностей деталей машин, позволяющая оценивать параметры контакта по ранее полученным картам реальных поверхностей или по созданным трехмерным моделям поверхностей, адекватно отражающих реальную картину [1].

Карты поверхностей получают сканированием интересующего объекта методом ощупывания по трем координатным осям [2]. Получаемые карты поверхностей заносятся в базу данных. Для создания моделей используется теория фракталов, с помощью которой поверхности получают геометрически очень похожими на реальные. Для создания поверхности можно использовать, например, уравнение Вейерштрасса — Мандельбротта [3]:

$$z(x) = L \left( \frac{G}{L} \right)^{D-1} (\lg \gamma)^{\frac{1}{2}} \sum_{n=0}^{n_{\max}} \gamma^{(D-2)n} \left[ \cos \varphi_{1n} - \cos \left( \frac{2\pi \gamma^n x}{L} \right) + \varphi_{1n} \right].$$

Здесь  $z$  — высота поверхности;  $x$  — длина трассы;  $D$  — фрактальная размерность ( $1 < D < 2$ );  $\gamma$  — параметр масштаба ( $\gamma > 1$ ), определяющий спектральную плотность и самоаффинность;  $L$  — длина в пределах которой проявляются фрактальные свойства поверхности;  $\varphi_{1n}$  — случайная величина, имеющая распределение в пределах  $0 \dots 2\pi$ .

Параметр масштаба  $\gamma$  связан с частотой поверхности, равной величине, обратно пропорциональной шагу неровностей (по [4]  $\gamma = 1,5$ ). Фрактальный параметр шероховатости  $G$ , имеющий размерность длины, является масштабом высот неровностей, не зависящим от частоты. Более грубая поверхность имеет большее значение  $G$ . Фрактальная размерность  $D$  характеризует низкие и высокочастотные компоненты профиля. Для изотропной поверхности фрактальная размерность определяется разными способами, например, методом Yard-stick, по соотношению периметр — площадь, по мощности спектральной плотности  $S(\omega)$  и т. д. [4]. Практический интерес для инженера представляет связь фрактальной размерности с параметрами качества шероховатых поверхностей, например, со средней арифметической высотой профиля  $Ra$ . В работе [5] приведено выражение, связывающее фрактальную размерность  $D$  с параметром  $Ra$ :

$$D = -0,46Ra^5 + 3,1Ra^4 - 8,1Ra^3 + 10Ra^2 - 6,2Ra + 2,9.$$

Ранее в работе [6] предложена следующая линейная аппроксимация:

$$D = 1,414 - 0,199Ra.$$

Сравнение этих зависимостей, представленных на рис. 1, показало их удовлетворительное соответствие в диапазоне  $Ra \in [0,5 \dots 1,3]$ .

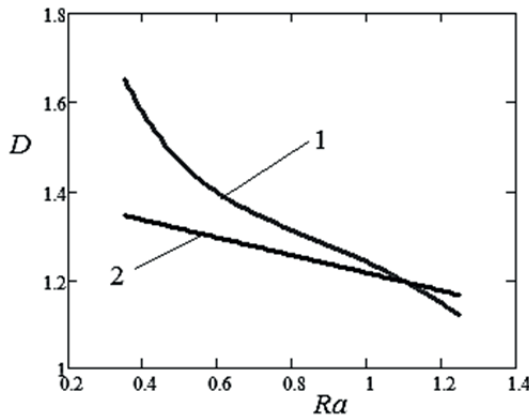


Рис. 1. Зависимость  $D$  от  $Ra$  по данным: 1 — [4]; 2 — [5]

При взаимодействии двух номинально плоских поверхностей при наличии шероховатости фактическая площадь касания составляет малую часть от номинальной (геометрической) площади. Полагаем, что деформация отдельных неровностей не связана с деформацией соседних выступов. Верхнюю часть выступа фрактальной поверхности представим в виде эквивалентного сферического сегмента. Пусть пятно контакта фрактальной поверхности с гладкой имеет радиус  $r$  и диаметр  $L^* = 2r$ . Высота неровности с учетом исходного уравнения при  $n = 0$ ;  $x = L^*/2$  и  $\varphi_{1n}$  описывается зависимостью

$$\delta = 2G^{(D-1)}(\ln \gamma)^{1/2}(2r)^{(2-D)}.$$

Радиус верхней части выступа найдем из геометрических соображений без учета деформации:

$$R = \frac{r^2}{2\delta}.$$

Решив два последних уравнения относительно радиуса верхней части выступа  $R$  с учетом площади пятна контакта  $a = \pi r^2$ , получим

$$R = \frac{a^{D/2}}{2^{(4-D)} \pi^{D/2} G^{(D-1)} (\ln \gamma)^{1/2}}.$$

Нормальная сила при упругом контакте сферического выступа с радиусом  $R$  и приведенным модулем упругости  $E^*$  определяется зависимостью (по Герцу)

$$F_n = \frac{4E^* r^3}{3R}; \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}.$$

Для упругого состояния контакта  $r^3 = (R\delta)^{3/2}$ . Подставив найденное значение  $r^3$  в формулу Герца с учетом предпоследнего выражения, получим

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \frac{\delta^{\frac{3-D}{2-D}}}{2^{\frac{4-D}{2-D}} G^{\frac{D-1}{2-D}} (\ln \gamma)^{\frac{1}{2(2-D)}}}.$$

Тогда жесткость единичного пятна определим, вычислив производную

$$j_n^0 = \frac{dF_n}{d\delta} = \frac{4}{3} E^* \left( \frac{3-D}{2-D} \right) \frac{\delta^{\frac{1}{2-D}}}{2^{\frac{4-D}{2-D}} G^{\frac{D-1}{2-D}} (\ln \gamma)^{\frac{1}{2(2-D)}}},$$

или

$$j_n^0 = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} E^* \left( \frac{3-D}{2-D} \right) a^{1/2}.$$

Рассмотрим распределение площадок контакта. Фундаментальное положение в теории контактного взаимодействия о дискретности контакта предполагает наличие определенного распределения площадей пятен касания. В работе [7] показано, что распределение площадок контакта подчиняется степенному закону

$$F(a^*) = (a^*)^{1-\alpha},$$

где  $a^*$  — относительная площадь, равная отношению площади пятна к максимальной площади касания  $a^* = a/a_{\max}$ ;  $0 < a_{\min}^* \leq a^* \leq 1$ ;  $a_{\min}^* = a_{\min}/a_{\max}$ , а  $\alpha$  — показатель степени.

Интегральная функция распределения (или просто функция распределения) в работе [7] определяется соотношением

$$F(a^*) = \frac{(a^*)^{1-\alpha} - (a_{\min}^*)^{1-\alpha}}{1 - (a_{\min}^*)^{1-\alpha}}.$$

Тогда контактную жесткость при упругом состоянии плоского стыка запишем в следующем виде:

$$j_n = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} E^* \left( \frac{3-D}{2-D} \right) a_{\max}^{1/2} \int_{a_{\min}^*}^1 (a^*)^{1/2} N(a^*) f(a^*) da^*.$$

Здесь  $a^*$  — переменная интегрирования;  $N(a^*)$  — число пятен контакта;  $f(a^*)$  — плотность распределения пятен контакта как случайных величин, где  $a^* = a/a_{\max}$ .

Число пятен контакта относительно максимальной площади пятна касания рассчитывается по формуле [4]

$$N(a^*) = (a^*)^{-D/2}.$$

Приняв  $a_{\min}^* = 0$ , представим дифференциальную функцию распределения в виде

$$f(a^*) = (1-p)(a^*)^{-p}.$$

Тогда

$$j_n = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} E^* \left( \frac{3-D}{2-D} \right) a_{\max}^{1/2} \int_0^1 (a^*)^{(1-D)/2} (1-p)(a^*)^{-p} da^*.$$

После интегрирования запишем

$$j_n = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} E^* \left( \frac{3-D}{2-D} \right) a_{\max}^{1/2} \frac{2(1-p)}{3-D-2p}, \quad p \neq \frac{3-D}{2}.$$

По представленным выше зависимостям в среде программирования С++ была разработана автоматизированная система моделирования контакта шероховатых поверхностей, позволяющая оценить параметры контакта в 3D-формате карт реальных поверхностей или созданных моделей по заданным условиям. Созданные поверхности приводятся в контакт друг с другом, образуя в межконтактном пространстве разветвленную сеть микроканалов, которые при сближении поверхностей изменяют свой объем за счет деформации микровыступов. Представляется возможным оценить их геометрические размеры, протяженность, извилистость, распределение площадок фактического контакта, а также нагрузочную характеристику и контактную жесткость. Пример работы автоматизированной системы моделирования контактного взаимодействия представлен на рис. 2.

Адекватность фрактальной модели контактной жесткости проверялась путем сравнения с экспериментальными данными, приведенными в [8]. Так, при электромеханической обработке и нагрузке в 100, 200 и 300 Н, измеренная в результате эксперимента нормальная контактная жесткость  $j_n$  оказалась равной 208, 317 и 405 Н/мкм. Расчеты по предлагаемой методике при  $D = 1,73...1,75$  и  $p = 0,55...0,60$  дали значения контактной жесткости соответственно 271, 311 и 336 Н/мкм, что указывает на удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных с результатами, полученными по предлагаемой методике.

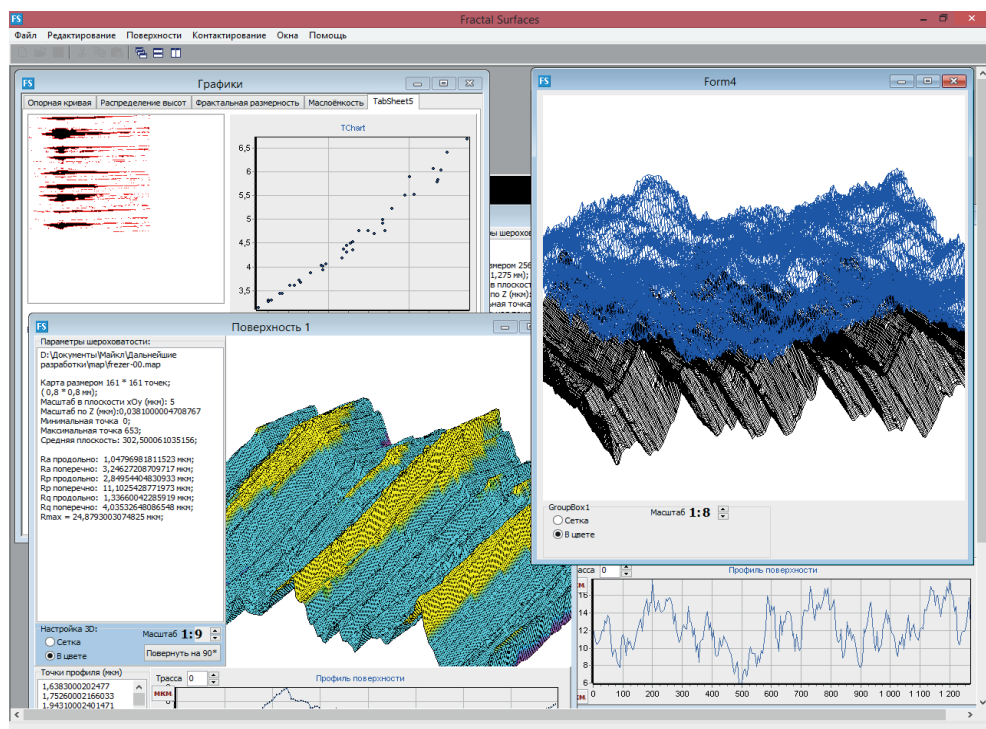


Рис. 2. Пример работы приложения Fractal Surfaces

## Литература

- [1] Тихомиров В.П., Измеров М.А., Тихомиров П.В. Фрактальные модели инженерных поверхностей. *Вестник БГТУ*, 2014, с. 72–80.
- [2] Порошин В.В. Основы комплексного контроля топографических параметров поверхности деталей в машиностроении. Москва, Машиностроение-1, 2007, 196 с.
- [3] Wang S., Komvopoulos K. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime. P. 1: Elastic contact and heat transfer analysis. *Trans. ASME, Journal of Tribology*, 1994, vol. 116, pp. 812–823.
- [4] Маджумдар А., Бхушан Б. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей. *Современное машиностроение. Сер. Б*, 1991, № 6, с. 11–23.
- [5] Barman T.K., Sahoo P. Fractal relation with conventional roughness parameters for surface topography generated in grinding. *Proc. of the Intern. Conf. of Mech. Engineering*, 2005, Dhaka, Bangladesh, pp. 1–5.
- [6] Тихомиров В.П. Контактное взаимодействие фрактальных поверхностей. *Трение и износ*, 1997, т. 18, № 3, с. 369–374.
- [7] Измеров М.А., Тихомиров В.П., Воробьев В.И., Волохов С.Г. Закон распределения пятен в задачах механики дискретного контакта. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2014, № 6 (308), с. 21–28.
- [8] Измайлов В.В., Левыкин Д.А. Нормальная и касательная жесткости плоского стыка шероховатых поверхностей. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.*, 2012, вып. 5, с. 4–11.

## Моделирование воздействия стекла на конструкцию рамы фонаря при расчете на прочность

© Коротеев Александр Юрьевич, Попов Евгений Владимирович

Россия, г. Воронеж, филиал ПАО «Корпорация «Иркут» в г. Воронеже

[Alexandr.Koroteev@vfki.irkut.com](mailto:Alexandr.Koroteev@vfki.irkut.com)

*Рассмотрено несколько вариантов передачи нагрузки (внутреннего давления) со стекла на раму фюзеляжа и различные результаты при разных способах передачи нагрузок. Моделирование выполнено с помощью программного обеспечения MSC.Software PATRAN, расчет произведен в модуле MSC Software NASTRAN. По результатам расчета получены напряжения, возникающие в конструкции. Для одной из зон рамы выполнен аналитический расчет, который позволил определить способ передачи нагрузки с минимальной погрешностью.*

**Ключевые слова:** *способы передачи нагрузок, нагружение, рама, стекло, внутреннее давление, Rod-элемент, напряжение.*

В ходе выполнения данной работы был рассмотрен случай нагружения герметичной кабины внутренним давлением и передача нагрузки со стекла на раму фонаря. Для передачи нагрузки были использованы два способа передачи нагрузки:

- 1) передача происходила непосредственно со стекла на раму через Rod-элементы, который воспринимающие нагрузку, действующую только вдоль своей оси;
- 2) нагрузка от стекла была представлена в виде распределенной нагрузки, приходящейся на каждую из полок рамы (зона стыковки стекла и рамы), и рассчитывалась в зависимости от длины и ширины полки. Для аналитического расчета и сравнения результатов была выбрана зона Г (рис. 1).

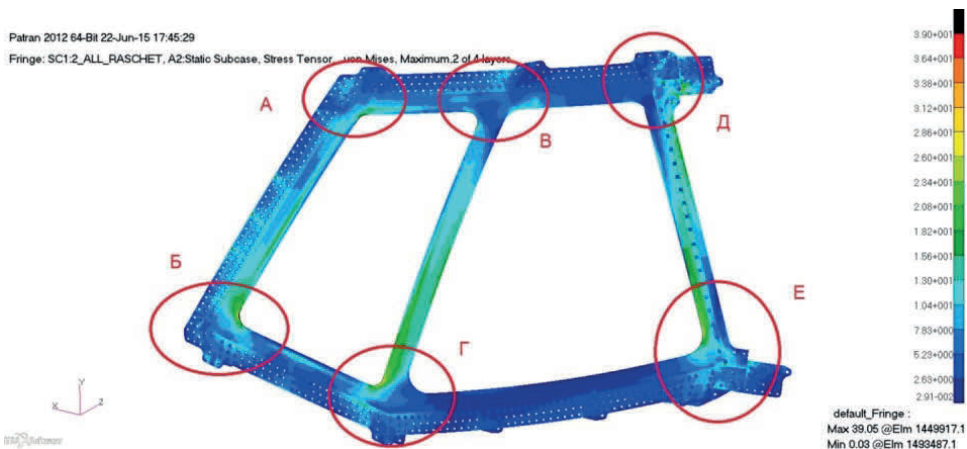


Рис. 1. Анализируемая зона

Полученные напряжения при аналитическом расчете в зоне Г составили 39,4 кгс/мм<sup>2</sup>. В первом способе передачи нагрузки напряжения составили 37,12 кгс/мм<sup>2</sup>, во втором 30,78 кгс/мм<sup>2</sup> (табл. 1).

Таблица 1

Сводка напряжений в зоне Г

Эквивалентные напряжения, кгс/мм <sup>2</sup>		Напряжение при аналитическом расчете
Способ передачи нагрузки № 1	Способ передачи нагрузки № 2	
37,12	30,78	39,4

В результате сравнения двух способов передачи нагрузки со стекла на раму с теоретическим значением, наиболее близким с погрешностью 6 % является первый способ нагружения, при втором способе передачи нагрузки погрешность составила 28 %.

#### Литература

- [1] Астахов Ф.М., Каравлев А.В., Макаров С.Я., Суздальцев Я.Я. *Справочная книга по расчету самолета на прочность*. Москва, Государственное издательство оборонной промышленности, 1954, 708 с.
- [2] Гончаров П.С. Артамонов И.А., Халитов Т.Ф. Денисихин С.В., Сотников Д.Е. *NZ Advanced Simulation. Инженерный анализ*. Москва, ДМК Пресс, 2012, 504 с.
- [3] *Руководство пользователя по MSC.Patran*, 2004, 162 с.

УДК 533.695

## Учет влияния интерференционных сил от АСП при решении деформационных задач для крыла сверхзвукового самолета

© Макаров Илья Константинович, Салтыков Сергей Николаевич

Россия, г. Воронеж, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

[Маk-11@yandex.ru](mailto:Маk-11@yandex.ru)

*Представлен результат расчета деформации крыла сверхзвукового самолета с учетом интерференционного взаимодействия крыла самолета-носителя и подкрыльевого авиационного средства поражения (АСП) с помощью классических инженерных методик и расчетного комплекса ANSYS.*

**Ключевые слова:** крыло сверхзвукового самолета, интерференционное взаимодействие, расчетный комплекс ANSYS.

При проектировании новых летательных аппаратов (ЛА) и модернизации существующих большое значение имеет полный учет всех сил, действующих на ЛА. Известно, что при движении ЛА с подкрыльевыми авиационными средствами поражения (АСП), возникают значительные по величине интерференционные силы [1]. Направление и величина этих сил могут изменяться в зависимости от режима полета ЛА, типа АСП и положения относительно крыла [2] (рис. 1). Интерференционные силы в свою очередь создают изгибающий и крутящий моменты, которые также могут менять свое направление и величину [3] (рис. 2).

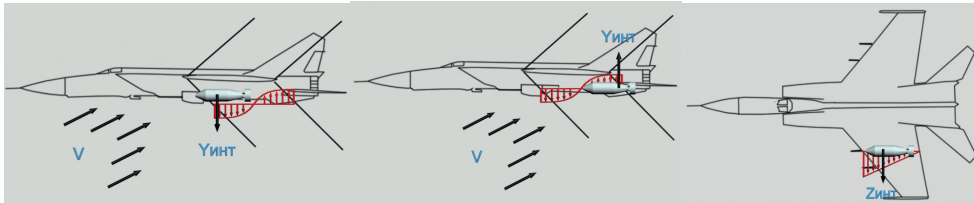


Рис.1. Направление интерференционных сил на АСП

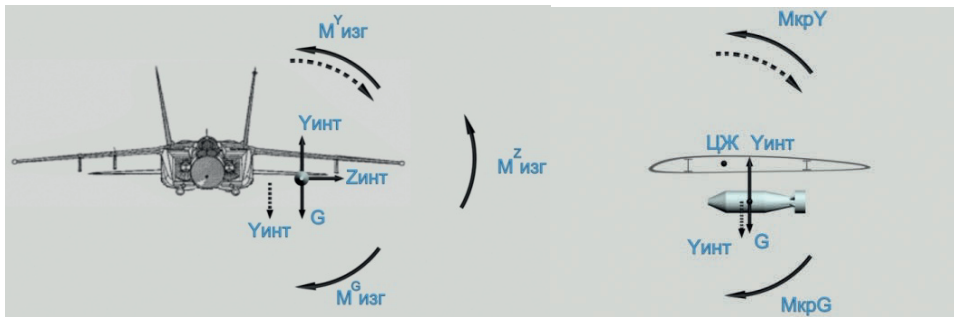


Рис. 2. Изгибающий и крутящий моменты, возникающие в полете

Целью данной работы является сравнение результатов расчета деформации основных элементов крыла ЛА с учетом интерференционного взаимодействия самолета-носителя и подкрылевого АСП, полученных инженерным методом с результатами, полученными в расчетном комплексе ANSYS.

Расчетной схемой крыла была принята балочная схема. В качестве балки рассматривался лонжерон крыла.

Выполнены исследования по оценке влияния формы поперечного сечения и конструкции лонжерона на деформацию балки. Рассматривались лонжероны с квадратной формой поперечного сечения и в виде двутавра с параллельными и со сходящимися поясами. Оценено влияние интерференционных сил на величину вертикальных перемещений сечений крыла ЛА.

Результаты расчетов ANSYS сопоставлялись с расчетами, полученными с помощью правила Верещагина (для лонжеронов с параллельными поясами) и метода Мора (для лонжеронов со сходящимися поясами).



Исследуемые модели элементов крыла ЛА представлены на рис. 3 . На рис. 4 приведены некоторые результаты сравнения расчетов полученных с помощью инженерных методов и результатов, полученных в расчетном комплексе ANSYS для двух и трех лонжеронных крыльев.

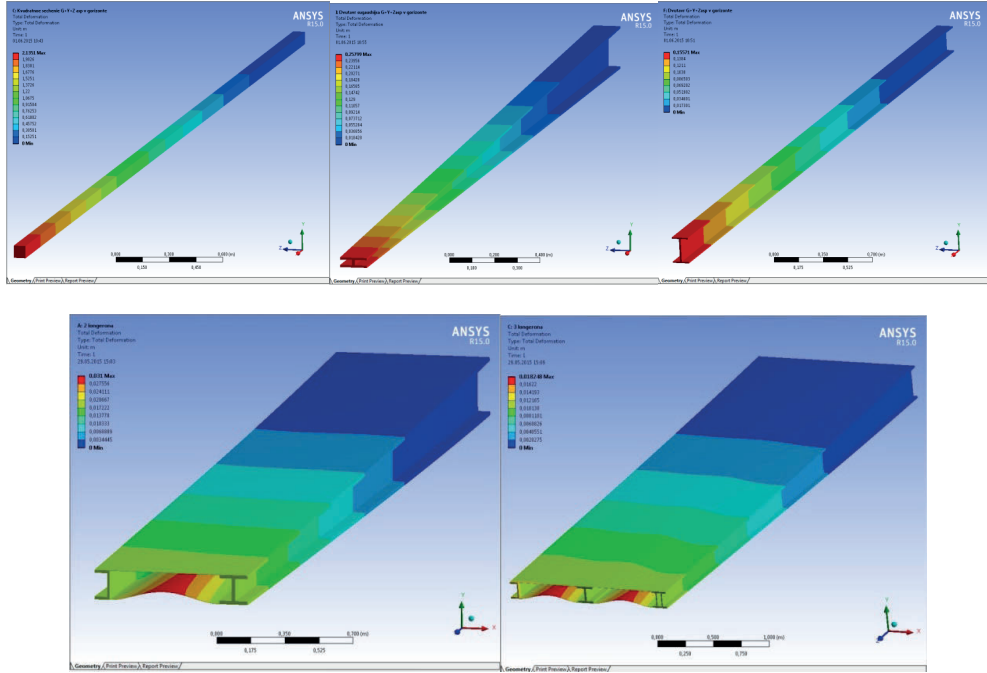


Рис. 3. Исследуемые модели элементов крыла летательного аппарата

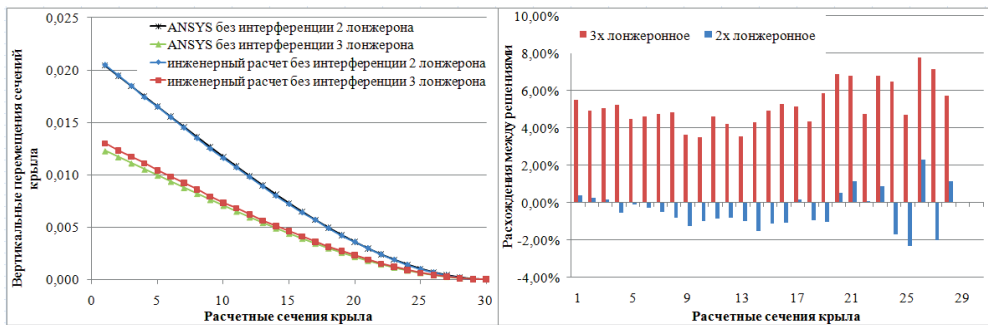


Рис. 4. Исследуемые модели элементов крыла ЛА

Сравнение инженерных методов с результатами расчетной программы ANSYS показало наличие минимальных расхождений между их решениями. Максимальные расхождения во всех расчетных случаях составляют 5 %.

## Литература

- [1] Салтыков С. Н. *К расчету несущих свойств подвески под крылом летательного аппарата на числа  $M > 1$ : Научно-методические материалы по аэродинамике летательных аппаратов*. Москва, ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1985.
- [2] Кусакин С.И. Экспериментальное исследование влияния крыла самолета-носителя на аэродинамические характеристики подвесных грузов при сверхзвуковых скоростях набегающего потока. *Тр. ЦАГИ*, 1981.
- [3] Салтыков С.Н., Верещиков Д.В., Макаров И.К., Особенности прочностных характеристик силовых элементов крыла с учетом влияния интерференционных сил от внешних подкрыльевых подвесок при сверхзвуковых скоростях полета. *Матер. 54 науч. конф. МФТИ — Всероссийской научной конференции «Проблемы фундаментальных и прикладных, естественных и технических наук в современном информационном обществе»*. Москва, 10–30 ноября 2011 г., МФТИ. Москва, МФТИ, 2011.

УДК 517.958:539.3

## Программное обеспечение для 3D-моделирования обтекателей гиперзвуковых летательных аппаратов

© Персова Марина Геннадьевна, Вагин Денис Владимирович,  
Епанчинцева Татьяна Борисовна, Кошкина Юлия Игоревна,  
Соловейчик Юрий Григорьевич

Россия, г. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет

[persova@ami.nstu.ru](mailto:persova@ami.nstu.ru), [vdv\\_wk@mail.ru](mailto:vdv_wk@mail.ru), [etb-tatiana@mail.ru](mailto:etb-tatiana@mail.ru), [koshkina\\_yui@mail.ru](mailto:koshkina_yui@mail.ru)

*Рассмотрены задачи термоупругости в трехмерной постановке для конструкций обтекателей гиперзвуковых летательных аппаратов и специализированное программное обеспечение для их решения, которое предоставляет удобные средства задания этих конструкций с простой параметризацией основных элементов конструкции и автоматическим построением конечноэлементных сеток. Программное обеспечение гарантирует требуемую точность при небольших вычислительных затратах.*

**Ключевые слова:** численный деформационный анализ, термоупругость, нелинейный анализ напряженно-деформированных состояний, криволинейные конечные элементы, программный комплекс, носовой обтекатель летательного аппарата.

При проектировании гиперзвуковых летательных аппаратов (ЛА) одной из важных проблем является разработка его носового обтекателя, который испытывает очень большие термические и аэродинамические нагрузки. Для решения этой проблемы разрабатываются различные подходы, позволяющие оптимизировать геометрическую форму и материалы обтекателя. При этом использование универсальных (так называемых тяжелых) конечноэлементных пакетов зачастую очень трудоемко как для пользователя, так и очень затратно вычислительно. Поэтому начинают разра-

бываться упрощенные подходы (аналитические или основанные на 1D-моделировании), которые далеко не всегда дают приемлемые по точности решения.

В данной работе предлагается специализированное программное обеспечение, реализующее конечноэлементное решение задачи термоупругости в трехмерной постановке для конструкций обтекателей гиперзвуковых ЛА. При этом, с одной стороны, оно будет представлять удобный инструмент задания этих конструкций с простой параметризацией основных элементов конструкции и автоматическим построением конечноэлементных сеток, а с другой, — обеспечивать требуемую точность при небольших вычислительных затратах.

Рассмотрим обтекатели конусообразной формы со сферическим затуплением, состоящие из двух основных частей — передней (головной) части, представляющей собой полусферу, возможно, соединенную со сплошным круговым конусом из того же материала, и задней части в виде полого кругового конуса. Такие обтекатели обеспечивают наименьшее аэродинамическое сопротивление [1, 2]. Передняя часть изготавливается, как правило, из материала Ultra High Temperature Ceramic (УНТС), а задняя может состоять из нескольких слоев с различными термическими и механическими свойствами.

Задание геометрии конструкции и свойств составляющих ее материалов осуществляется с использованием графического интерфейса. Задаются размеры основных конструктивных элементов, их материалы и свойства этих материалов. В качестве свойств материалов конструкции могут быть заданы: коэффициент теплопроводности (с учетом возможности задания трех компонент в анизотропных материалах и с учетом возможной зависимости от температуры); плотность и теплоемкость (с учетом возможной зависимости от температуры); коэффициент теплообмена с внешней средой и коэффициент черноты; модуль Юнга и коэффициент Пуассона (с учетом возможности задания их для анизотропных материалов и с учетом возможной зависимости от температуры), коэффициент термического расширения (с учетом возможной зависимости от температуры). На границах тела могут быть заданы поверхностные силы, действующие на конструкцию.

Рассматриваемое в данной работе программное обеспечение позволяет получать решение нестационарной связанной задачи на основе следующей процедуры. На каждом временном слое выполняется расчет теплового поля, передача вычисленных значений температур в процедуру решения задачи упругости, выполнение процедуры расчета упругих напряжений с учетом термических деформаций и зависимости механических свойств материалов от температуры, изменение геометрии тела и расчетной сетки с учетом полученных перемещений узлов.

Математическая модель для расчета температурного поля  $T(x, y, z, t)$  имеет вид

$$-\operatorname{div}(\Lambda \operatorname{grad} T) + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0; \quad (1)$$

$$-\left((\Lambda \operatorname{grad} T) \cdot \vec{n}\right)\Big|_{\Gamma} = \kappa \gamma_0 T^4 - Q, \quad (2)$$

где  $\Lambda$  — тензор теплопроводности;  $\rho$  — плотность;  $c_p$  — теплоемкость;  $\kappa$  — коэффициент черноты;  $\gamma_0$  — постоянная Больцмана;  $Q$  — плотность теплового потока,  $\Gamma$  — граница обтекателя, на которую падает тепловой поток  $Q$  и с которой тепловая энергия может излучаться.

Компоненты тензора напряжений удовлетворяют уравнениям вида

$$\begin{cases} -\operatorname{div}(\sigma_x, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}) = F_x; \\ -\operatorname{div}(\sigma_{xy}, \sigma_y, \sigma_{yz}) = F_y; \\ -\operatorname{div}(\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_z) = F_z, \end{cases} \quad (3)$$

где  $F_x, F_y, F_z$  — компоненты плотности объемных сил, а вектор напряжений  $\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}\}$  имеет вид

$$\sigma = \mathbf{D}(\varepsilon - \varepsilon^{th}). \quad (4)$$

Здесь  $\varepsilon$  — вектор полных деформаций;  $\varepsilon^{th}$  — вектор термических деформаций,

$$\varepsilon^{th} = \Delta T \{\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, 0, 0, 0\},$$

где  $\Delta T = T - T_{ref}$ ;  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  — вектор коэффициентов теплового расширения.

Матрица  $\mathbf{D}$  в соотношении (4) определяется через модули Юнга, коэффициенты Пуассона и модули сдвига.

Отличительной особенностью рассматриваемого в данной работе программного обеспечения является то, что геометрия расчетной области задается несколькими параметрами, а конечноэлементная сетка строится полностью автоматически. При этом шаг по сетке обеспечивает получение решения с необходимой точностью.

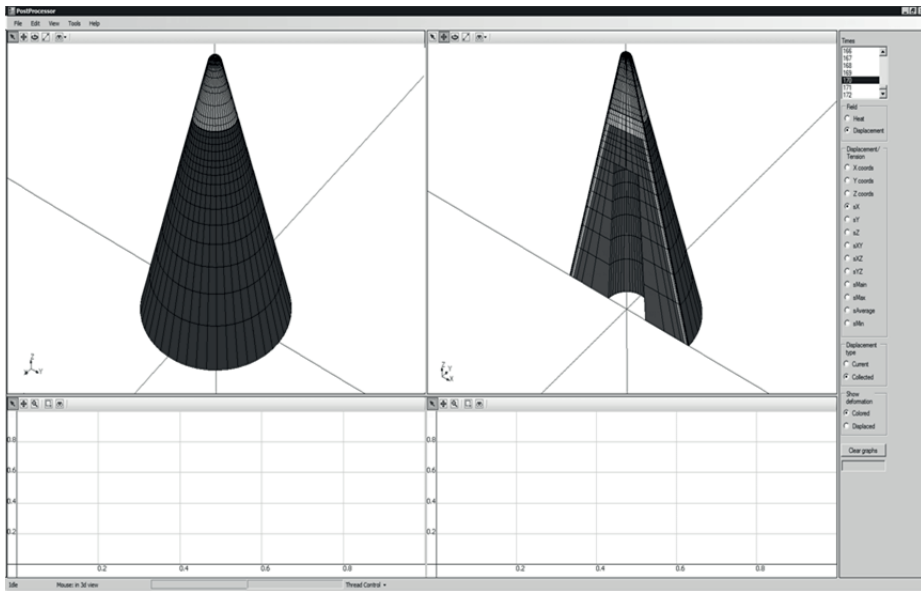


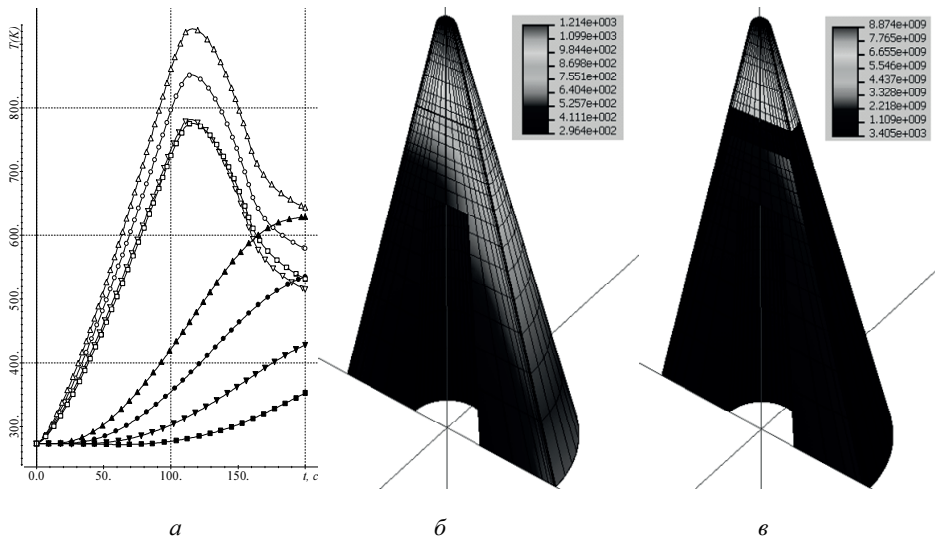
Рис. 1. Вид трехмерной конструкции обтекателя общий и в разрезе

Общий вид и сечение конструкции обтекателя (подобные обтекатели рассматривались, например, в работах [3–5]), изображенные в окне препроцессора разработанного программного комплекса представлены на рис. 1. Конструкция обтекателя, как уже сказано выше, задавалась несколькими параметрами: число и радиус слоев стен-

ки обтекателя, угол полураствора конуса, радиусы слоев стенки задней части обтекателя, толщины слоев в верхней части обтекателя (до сферического затупления), радиус полусферы затупления конуса обтекателя, а также характеристики материалов, изменение теплотопо потока  $Q$  по времени. Сетка в конструкции строилась полностью автоматически.

Результаты расчетов при нагреве обтекателя гиперзвуковым воздушным потоком с углом атаки  $10^\circ$  приведены на рис. 2.

Время счета для рассматриваемой конструкции составило  $\sim 40$  мин. При этом был рассчитан физический процесс аэродинамического нагрева обтекателя длительностью 200 с, и на каждом слое по времени вычислялось температурное поле и поле термоупругих напряжений.



**Рис. 2.** Результаты расчетов в виде графиков температуры в некоторых точках на внешней и внутренней поверхностях обтекателя (а), распределение температуры в момент времени 170 с (б) и распределение  $\sigma_{xx}$  в момент времени 170 с (в)

Разработанное программное обеспечение, во-первых, существенно облегчает работу пользователя-проектировщика, а во-вторых, с учетом автоматизации задания геометрии и построения расчетной сетки, а также достаточно высокой скорости моделирования может быть использовано в системах автоматической оптимизации такого рода конструкций.

*Работа проводилась в рамках прикладных научных исследований, выполняемых при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.574.21.0118).*

### Литература

- [1] Lee J.W., Min B.Y., Btun Y.H., KimS .J. Multipoint nose shape optimization of space launcher using response surface method. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, vol. 43, no 1, pp. 137–146.

- [2] Narayan R. Deepak Taprabata Ray Russell R. Boyce. 2008. Evolutionary Algorithm Shape Optimization of a Hypersonic Flight Experiment Nose Cone. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2008, vol. 45, no 3, pp. 428–437.
- [3] Ferraiuolo M., Manca O., Heat transfer in a multi-layered thermal protection system under aerodynamic heating. *International Journal of Thermal Sciences*, 2012, vol. 53, pp. 56–70, doi:10.1016/j.ijthermalsci.
- [4] Borrelli R., Riccio F., Tescione D., Gardi R., Marino G. Numerical/Experimental Correlation of a Plasma Wind Tunnel Test on a UHTC-Made Nose Cap of a Reentry Vehicle. *J. Aerosp. Eng.*, 2010, vol. 23, pp. 309–316. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000047.
- [5] Borrelli R., Riccio F., Tescione D., Gardi R., Marino G. Thermo-structural behaviour of an UHTC made nose cap of reentry vehicle. *Acta Astronautica*, 2009, vol. 65, pp. 442–456.

УДК 004.942

## Моделирование предварительной геометрической крутки створки ТНУ при расчете на прочность

© Федосеев Владислав Игоревич, Попов Евгений Владимирович

Россия, г. Воронеж, Филиал ПАО «Корпорация “Иркут”» в г. Воронеже

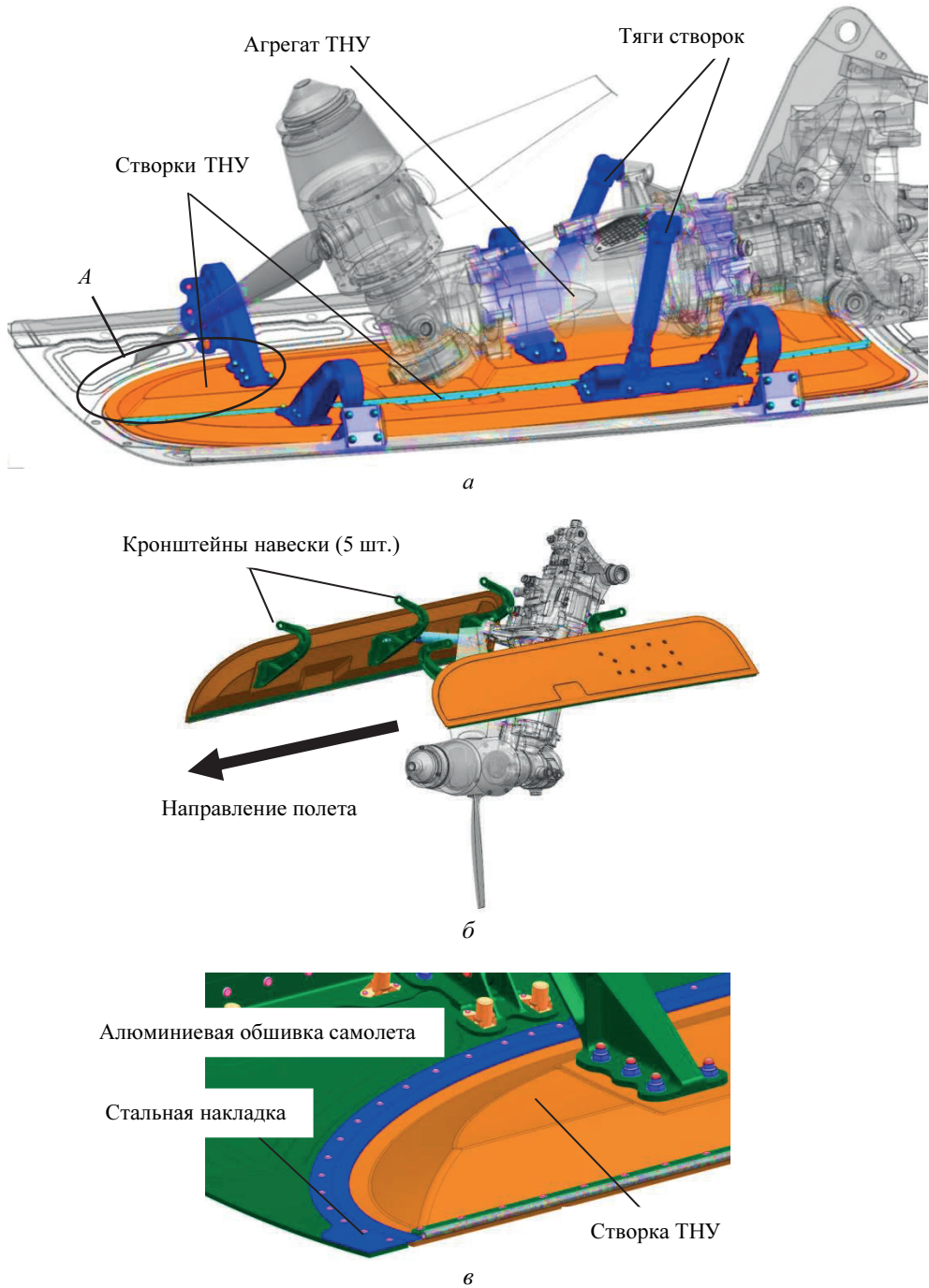
[Vladislav.Fedoseev@vfki.irkut.com](mailto:Vladislav.Fedoseev@vfki.irkut.com)

*Рассмотрен вопрос моделирования упругой деформации при контакте двух тел на примере опирания на фюзеляж самолета створок турбонасосной установки (ТНУ). Проблема расчета подобной конструкции заключается в правильной имитации эффекта упругой связи. Решение модели конечных элементов створок ТНУ подготовлено на программном обеспечении MSC.Software PATRAN и решено пакетом MSC.Software NASTRAN. В результате расчета модели определены значения перемещений узлов конечных элементов. Проведенный анализ полученных данных позволил произвести достаточно точную оценку конструкции при расчете на прочность в условиях полета самолета.*

**Ключевые слова:** моделирование, конечные элементы, упругая деформация.

При расчете на прочность конструкций из полимерных композиционных материалов первоочередную роль играет применение правильно подобранной расчетной схемы. В работе рассмотрен способ моделирования упругой связи между деталями конструкции при расчете ее на прочность методом конечных элементов на примере створок турбонасосной установки (ТНУ) самолета.

Створки ТНУ представляют собой композитные сотовые панели, навешенные с помощью кронштейнов на каркас самолета и связанные с агрегатом ТНУ посредством тяг. По контуру створки опираются на стальную накладку, связанную с фюзеляжем (рис. 1). Внешняя поверхность панелей «выходит» на теоретический контур самолета, поэтому к створкам предъявляются жесткие требования по прилеганию к фюзеляжу самолета в полете (рис. 2).



**Рис. 1.** Турбонасосная установка:

*А* — убранное положение; *б* — выпущенное положение агрегата ТНУ; *в* — опирание створки на фюзеляж самолета

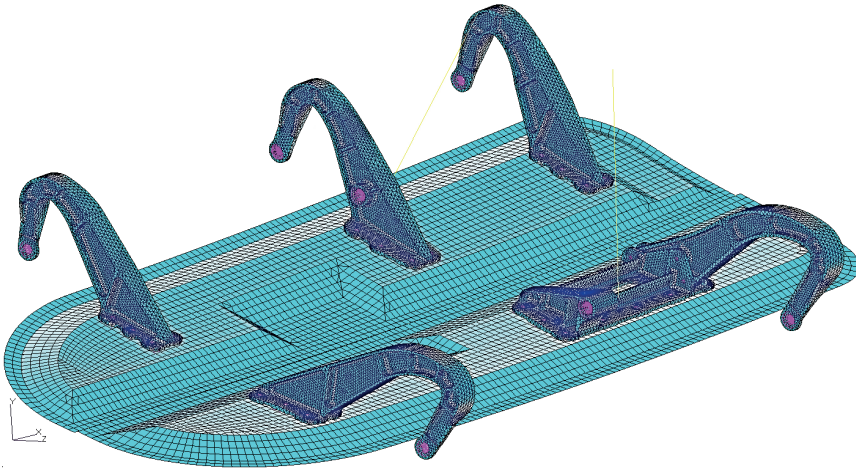


Рис. 2. Конечноэлементная модель створок ТНУ

При первоначальном расчете на прочность створок ТНУ были получены неудовлетворительные результаты по деформации панелей створок: створки отгибаются в набегающий поток на 13,5 (мм) (значение  $x$  на рис. 3, I) при допустимом значении 1 (мм) (створки нагружались расчетной нагрузкой в виде распределенного давления  $p$  (см. рис. 3, I).

В связи с этим к обшивкам створок была применена «геометрическая крутка», то есть панели были предварительно деформированы в сторону, обратную действию нагрузки (рис. 3, II). При прижатии створок к фюзеляжу посредством тяг за счет опирания створками на накладку, связанную с каркасом фюзеляжа, в панелях возникают внутренние напряжения, препятствующие выгибанию створок в поток (рис. 3, III).

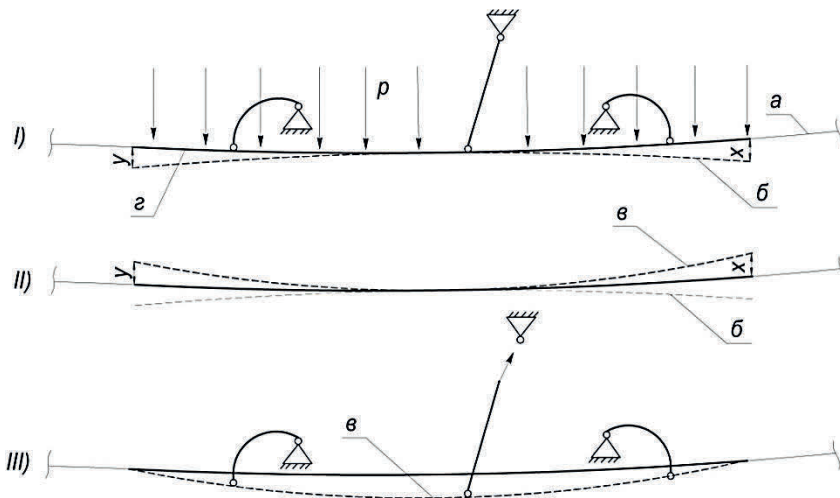


Рис. 3. Схематичное представление этапов проведенной работы:  
 $a$  — контур фюзеляжа;  $b$  — контур створок после приложения давления;  $в$  — зеркальное отражение кривой  $b$ ;  $z$  — контур створок ТНУ



Основная задача работы состоит в том, чтобы смоделировать эффект упругой связи между створками и накладкой и учесть это при анализе конструкции.

Предлагаемое решение связано с применением в модели конечных элементов одномерных *bar*-элементов со свойством *gar*, позволяющие задавать различную жесткость на сжатие и растяжение. Данные элементы создавались в краевых узлах панели (в месте контакта створки с накладкой), при этом свободным узлам элементов были заданы перемещения, соответствующие предварительной деформации, описанной выше.

В результате повторного анализа конструкции с учетом внесенных в модель изменений, были получены данные о деформации створок при применении к ним «геометрической крутки» при наличии упругой связи между деталями: максимальные перемещения узлов составили 14,9 мм. Тогда, учитывая первоначальную деформацию, заданную панели на этапе проектирования («геометрическая крутка»), равную 13,5 мм, получим конечный результат:  $(14,9 - 13,5) / 1,5 = 0,9$  мм.

Таким образом, при применении геометрической крутки и моделирования эффекта упругой связи между створками и фюзеляжем, максимальное отгибание створок в воздушный поток при полете самолета составляет 0,9 мм, что удовлетворяет требованию аэродинамики самолета  $\leq 1$  мм.

Проработка данного вопроса является актуальной в виду широкого применения конструкций из ПКМ и метода конечных элементов для их анализа.

Предложенный в работе способ может быть использован при конечноэлементном расчете любых конструкций, в которых есть упругие связи между ее элементами.

### Литература

- [1] Шимкович Д. Г. *Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows*. Москва, ДМК Пресс, 2003, 448 с.
- [2] Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е. *NX Advanced Simulation. Инженерный анализ*. Москва, ДМК Пресс, 2012, 504 с.
- [3] Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. *Расчет на прочность деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1993, 640 с.

УДК 629.7

## Автоматизация расчетов усталостной долговечности элементов конструкции самолета МС-21

© Полоник Евгений Николаевич, Суренский Евгений Аркадьевич,  
Федотов Александр Александрович, Хазин Лев Моисеевич

Россия, г. Москва, ОАО «Корпорация “Иркут”»

[Evgeniy.Polonik@irkut.com](mailto:Evgeniy.Polonik@irkut.com)

*Дано краткое описание компьютерной программы для расчета долговечности элементов конструкции с геометрическими концентраторами. Приведена принципиальная схема алгоритма указанного расчета. Алгоритм реализует три наиболее*

распространенные в авиационной отрасли методики расчета усталостной прочности: расчет по качеству конструкции (Лоим), расчет по эффективным коэффициентам концентрации напряжений (Когаев) и расчет по теории рейтингов усталости (Стрижиус).

**Ключевые слова:** усталость, долговечность, самолет, автоматизация, МКЭ.

Обеспечение проектного ресурса — важная задача при проектировании современных транспортных самолетов. Решение этой задачи позволяет уточнить выбор материалов и конструктивно-технологических решений, тем самым, создать более безопасную и экономически эффективную конструкцию.

Для выполнения оценки усталостной долговечности элементов конструкции с геометрическими концентраторами напряжений (в первую очередь разнообразных вырезов) с высокой степенью автоматизации на языке программирования С# разработана программа SNCalculator (рис. 1), которая интегрируется в программный комплекс Femar. Это обеспечивает интерактивность взаимодействия с анализируемой конечно-элементной моделью (КЭМ), а также загрузку статических результатов расчетов в автоматическом режиме (при формировании циклограмм напряжений) посредством API [1].

Программа SNCalculator позволяет выполнять расчеты усталостной долговечности по трем различным методам (теориям): теории подобия, теории «качества» конструкции и теории рейтингов усталости. Первые два метода относятся к группе методов, которые используют понятие эффективного коэффициента концентрации напряжений. В теории подобия эффективный коэффициент концентрации напряжений рассчитывается по формуле Когаева [2].

Во втором методе, предложенном Лоимом [3], оперируют параметром «качество». Уровень SN кривой эталонного образца материала и значение эффективного коэффициента концентрации напряжений определяют «качество» элемента конструкции, эта характеристика составляется на основании анализа экспериментальных данных и накопленного опыта эксплуатации аналогичных конструкций.

В третьем методе, предложенном Стрижиусом [4], используется понятие рейтинга усталости — максимального нормального напряжения отнулевого цикла (номинальное напряжение в сечении «брутто»), при котором усталостная долговечность элемента в зоне рассматриваемого потенциально-критического места равна  $10^5$  циклов при 50%-ной вероятности с уровнем надежности 0,5. Принципиальная схема алгоритма расчета по всем трем методикам приведена на рис. 2.

Общие положения всех реализованных в SNCalculator методов:

- для схематизации циклограммы напряжений и выделения полуциклов применяется метод «дождя» [2];
- для приведения асимметричных циклов нагружения к отнулевым циклам равного повреждения используется:
  - формула Одингга, при расчете по теории качества конструкции и теории подобия;
  - формула Уолкера с параметром ( $\gamma = 0,6$ ), при расчете по теории рейтингов усталости;
- для суммирования повреждений используется линейная теория Пальмгрена — Майнера.

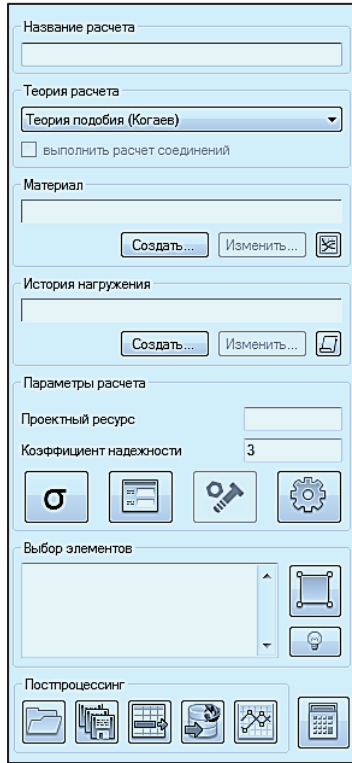


Рис. 1. Главное окно SNCalculator

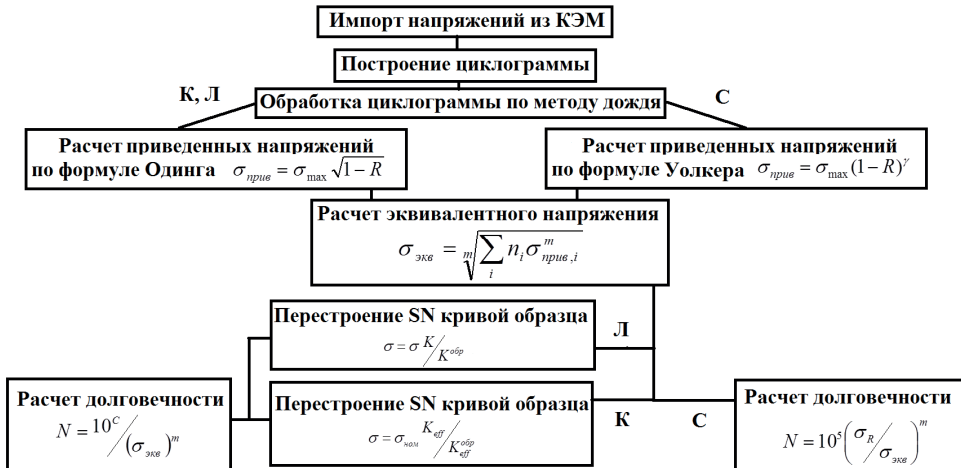


Рис. 2. Принципиальная схема алгоритма расчета усталостной долговечности:  
 К — Когаев; Л — Лоим; С — Стрижус

Перед проведением усталостных расчетов пользователь должен выполнить статический анализ КЭМ для соответствующих режимов полета. Полученные результаты используются при задании маски истории нагружения. Маска — таблица, в которой каждая строка содержит информацию о коэффициенте пульсации, соответствующем расчетному случаю (наборе результатов статического расчета Femap) и числе повторений цикла с данным уровнем напряжений. В процессе расчета происходит загрузка необходимых данных статического анализа из КЭМ, и на их основе формируются циклограммы нагружения.

Исходными данными для работы программы являются:

- параметры материала;
- маска истории нагружения;
- параметры теории расчета;
- уровень напряжений (для теории подобия);
- напряжения, полученные при статическом анализе конструкции (автоматически загружаются из модели Femap).

Для возможности повторного использования материалов и масок истории нагружения в приложении реализована система библиотек.

Выполнив расчет, пользователь получает доступ к возможностям постпроцессинга (обработки результатов расчета) SNCalculator, который позволяет:

- сохранить результаты;
- экспортировать результаты в таблицу Excel;
- экспортировать результаты в модель Femap;
- выполнить просмотр циклограмм напряжений (рис. 3).

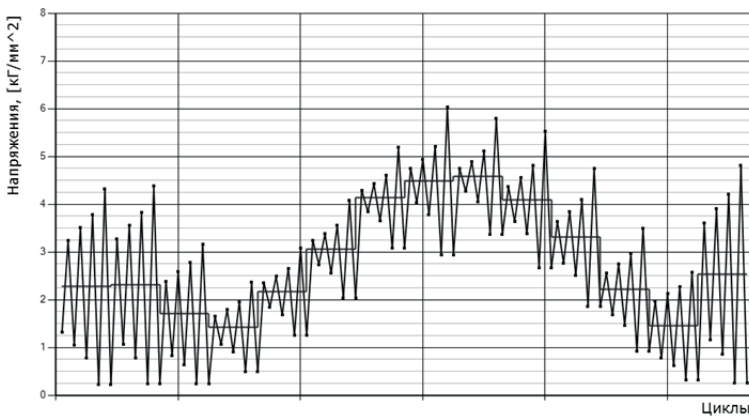


Рис. 3. Циклограмма напряжений, построенная с помощью SNCalculator

Для получения более полной информации о расчете предусмотрена возможность настройки вывода промежуточных файлов нескольких типов (циклограмма до обработки методом «дождя», обработанная циклограмма (в виде блока нагружения) и т.п.), запись которых осуществляется в директорию, заданную пользователем.

Применение SNCalculator при проектировании самолета МС-21 позволяет значительно снизить временные затраты на подготовку исходных данных, проведение усталостных расчетов и анализ полученных результатов. Добиться этого помогает эффективное использование имеющихся КЭМ, простота в задании исходных данных,

а также возможность получения подробной информации о расчетах в удобной для анализа форме.

Дальнейшее направление развития программы — реализация расчета болтовых и заклепочных соединений по методикам, предложенным Стебеньвым и Стрижиусом.

### **Литература**

- [1] *Femap API Reference Version 10.3*
- [2] Гусенков А.П., ред. *Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени*. Москва, Машиностроение, 1993, 364 с.
- [3] Лоим В.Б. Выносливость обшивки герметического фюзеляжа в зоне подкрепленного выреза. *Труды ЦАГИ*, 1971, вып. 1318, с. 2–43.
- [4] Стрижиус В.Е. *Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций*. Москва, Машиностроение, 2012, 272 с.

УДК 621.43

## Разработка интерактивной системы поиска и устранения неисправностей двигателей семейства ЯМЗ-530

© Андриевский-Герберг Сергей Николаевич,  
Новосельцев Владимир Викторович, Гогин Евгений Николаевич

Россия, г. Ярославль, ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод)

[sergey.andrievsky@gmail.com](mailto:sergey.andrievsky@gmail.com), [NovoseltsevVV@gaz.ru](mailto:NovoseltsevVV@gaz.ru)

*Проведен анализ выявленных неисправностей и отказов двигателей внутреннего сгорания семейства ЯМЗ-530 с момента начала выпуска по настоящее время. На основе полученных результатов, с помощью специализированного программного продукта разработана интерактивная система поиска и устранения неисправностей. В зависимости от условий работать с данной системой можно с помощью разного рода устройств: стационарного компьютера, ноутбука, планшетного компьютера и мобильного телефона. Успешная реализация проекта позволит сократить затраты, связанные с ремонтом двигателей, повысить качество сервисного обслуживания и потребительские свойства продукции ОАО «Автодизель».*

**Ключевые слова:** *двигатель внутреннего сгорания, неисправность, отказ, ремонт, техническое обслуживание.*

В представленной научно-технической работе рассмотрен вопрос повышения удовлетворенности конечного потребителя продукции ОАО «Автодизель» за счет предоставления ему качественных сервисных услуг, путем повышения компетенции специалистов сервисных центров, использующих интерактивную электронную систему поиска и устранения неисправностей (ПиУН).

В процессе работы проведен анализ выявленных отказов и неисправностей двигателей семейства ЯМЗ-530, начиная с момента выпуска по настоящее время. Результатом

анализа является разработка алгоритма поиска и устранения неисправностей двигателей семейства ЯМЗ-530. В специализированном программном комплексе TG Builder сформирована интерактивная диаграмма поиска неисправностей и отказов. На сегодняшний день активно ведутся работы по наполнению интерактивной диаграммы способами устранения неисправностей. Планируется полностью завершить работы по разработке интерактивной системы поиска и устранения неисправностей к концу 2015 г.

Для разработки интерактивной системы поиска и устранения неисправностей использован программный комплекс TG Builder, разработчиком которого является НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика». Дополнительно применяется следующее программное обеспечение: Pro ENGINEER, Deep Exploration, Corel DESIGNER X5. Все эти программы успешно функционируют на Ярославском моторном заводе, поэтому дополнительных финансовых затрат не требуется.

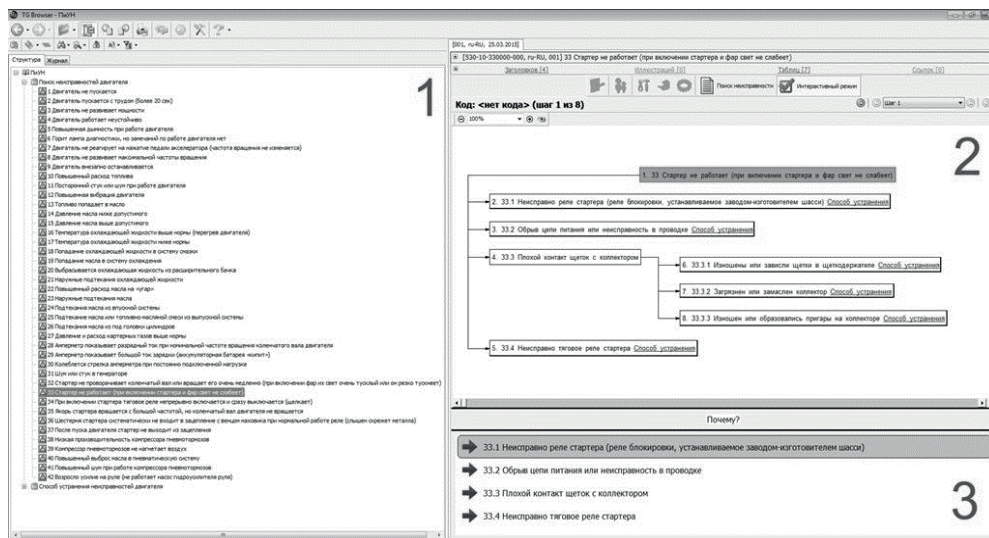


Рис. 1. Окно просмотра интерактивной системы ПиУН

Интерактивная система ПиУН глазами пользователя выглядит следующим образом (рис. 1):

1) окно просмотра структуры интерактивной системы ПиУН. Здесь представлены внешние проявления неисправностей двигателя, например «Повышенный расход топлива», «Двигатель не пускается» и т. д.;

2) окно просмотра диаграммы интерактивной системы ПиУН. Позволяет вести поиск возможных причин неисправностей в виде блок-схемы;

3) диалоговое окно пользователя интерактивной системы ПиУН. Позволяет вести поиск возможных причин неисправностей в виде диалога.

Работать с интерактивной системой ПиУН можно с помощью разного рода устройств: стационарного компьютера, ноутбука, планшетного компьютера и мобильного телефона. Главным условием является наличие выхода в Интернет (рис. 2). Также можно работать локально, предварительно загрузив интерактивную систему ПиУН на свое устройство.



Рис. 2. Применение интерактивной системы ПиУН

Периодически в ОАО «Автодизель» проводится обучение сотрудников завода и специалистов сервисных центров. Мы предлагаем включить интерактивную систему ПиУН в образовательный процесс, что позволит повысить его эффективность.

Экономический анализ показал, что дополнительных финансовых вливаний для реализации проекта не требуется. При этом имеем следующий экономический эффект:

- 1) сокращение времени на поиск и устранение неисправностей двигателей семейства ЯМЗ-530;
- 2) снижение затрат, связанных с устранением неисправностей;
- 3) повышение эффективности оказания услуг по устранению неисправностей.

Все это в результате позволит повысить конкурентоспособность нашей продукции и удовлетворенность конечного потребителя.

Данные по затратам, которые несут эксплуатанты транспортных средств с двигателями семейства ЯМЗ-530, приведены ниже:

Критерий экономического эффекта	Интерактивная система поиска и устранения неисправностей
Затраты на реализацию проекта, руб. ....	0
Сокращение времени на поиск и устранение неисправностей двигателей семейства ЯМЗ-530 .....	+
Снижение затрат, связанных с устранением неисправностей .....	+
Повышение эффективности оказания услуг по устранению неисправностей .....	+

Стоимость одного дня простоя, одной единицы техники городских автобусов ПАЗ и ЛиАЗ, а также грузового автомобиля МАЗ составляет порядка 12 000... 15 000 руб. Производители должны учитывать этот факт, чтобы удержать лидирующие позиции в борьбе за потребителя.



УДК 004.031.2

## Система мониторинга высокопроизводительного оборудования

© Аравин Дмитрий Дмитриевич, Лукьянов Сергей Викторович

Россия, г. Рязань, АО «Государственный Рязанский приборный завод»

[Adm.in.grpz@ya.ru](mailto:Adm.in.grpz@ya.ru)

*Описан метод мониторинга высокопроизводительного оборудования. Рассмотрены основные требования и исходя из них разработана система мониторинга высокопроизводительного оборудования. В качестве решения приведен метод мониторинга при помощи бесконтактных токовых датчиков. Для осуществления безопасности предложен метод авторизации работника его личной картой доступа. Система имеет три уровня — нижний (контроллеры, медиаконвертеры), средний (сервер СМВО) и верхний (интерфейс удобный для пользователя).*

**Ключевые слова:** мониторинг, бесконтактная карта, высокопроизводительное оборудование, медиаконвертор, токовый датчик, Linux, RS-485.

Рассмотрим вопрос повышения производительности труда обрабатывающих центров путем контроля их использования. В современном мире повышение производительности труда — одна из приоритетных задач производства. Основной проблемой в данном контексте является действие обслуживающего персонала и работников.

Для устранения субъективизма на АО «Государственный Рязанский приборный завод» была разработана, изготовлена и внедрена система мониторинга высокопроизводительного (обрабатывающие центры) оборудования (СМВО).

При постановке задачи были заданы следующие критерии:

- 1) система должна быть высоко защищенной с точки зрения идентификации работника и возможных режимов работы системы;
- 2) система должна минимально воздействовать на оборудование с целью предотвращения лишения гарантии;
- 3) система должна быть недорогой и надежной.

Для решения первого критерия в качестве идентификации используются пропуска исполнителей (бесконтактной карты E-MARIN)

Поскольку в СМВО присутствует считывающее устройство карт, было принято решение отказаться от механических элементов управления контроллерами и управлять ими с помощью комплекта идентификаторов E-MARIN, привязанных к каждому пользователю, то есть если зарегистрирован пользователь 1 то никто кроме него не сможет изменить режимы контроллера СМВО.

Для решения второго критерия был использован неразрывный датчик тока.

Разработка велась с помощью процессора AT-MEGA16.

Связь с контроллерами осуществлялась по протоколу RS-485. С помощью медиаконвертора MOXA RS-485 => TCP контроллеры подключаются к заводской локальной сети.

Высокая надежность устройства определяется отсутствием механических элементов управления.

Разработанные контроллеры выполняют следующие функции:

- непрерывно измеряют ток, потребляемый оборудованием, усредняют его и по команде сервера СМВО передает это значение серверу;
- следят за состоянием считывателя карт E-MARIN и передают идентификатор приложенной карты серверу СМВО;
- отображают номер режима, установленного работником (работа в автоматическом режиме, наладка, простой, регистрация работника и т. п.)

Данные устройства образуют первый (нижний) уровень системы.

Второй (средний) уровень образован сервером СМВО, разработана специальная программа, работающая как сервис Linux.

Сервер непрерывно опрашивает контроллеры (примерно 3–4 опроса в секунду каждого контроллера). С определенным интервалом, заданным в файле конфигурации, запрашивается значение потребленного тока и помещается в корпоративную базу данных. Информация о приложенных идентификаторах тоже помещается в базу данных.

При обнаружении идентификатора «Требуется вмешательство» сервер через корпоративную почту оповещает службу технического обслуживания (ТО). Сервер отслеживает исправность контроллеров и медиаконвертеров, при обнаружении неисправности сообщает об этом по почте службе ТО. С определенным интервалом, заданным в файле конфигурации, сервер пытается установить соединение с неотвечающими устройствами.

Вся информация о конфигурации системы хранится в базе и все настройки выполняются программным обеспечением третьего (верхнего) уровня. Верхний уровень обеспечивает выдачу и анализ информации, хранящейся в базе по нескольким разрезам. По каждой единице оборудования может быть построен график потребляемого тока за произвольный период, благодаря чему очень четко может определяться три уровня потребления:

- оборудование обесточено;
- простой оборудования (включено, но не используется);
- оборудование под нагрузкой.

Кроме того, используя информацию о приложенных идентификаторах, можно определить, кто из работников в настоящее время использует это оборудование и в каком режиме. Если потребляемый ток не соответствует указанному режиму, загорается индикатор «Недостоверные данные» и на контроллере и на экране системы мониторинга.

Используемые в настоящее время возможные режимы приведены в таблице.

Группа	Номер режима	Наименование режима.
Холостой ход	1	Регистрация сотрудника
	2	Прогрев станка
	3	Отладка управляющей программы
Работа по программе	4	Автоматическая работа — сталь
	5	Автоматическая работа — сплав алюминия
	6	Автоматическая работа — титан
	7	Автоматическая работа — цветные сплавы
	8	Автоматическая работа — пластик
	9	Автоматическая работа — финишные операции

Группа	Номер режима	Наименование режима.
Выключен	10	Окончание работы
Простой/ремонт	11	Простой — нет управляющей программы
	12	Простой — отсутствие заготовки
	13	Простой — отсутствие сотрудника
	14	Неисправность станка
	15	Простой — поломка или замена инструмента
	16	Выполнение плановых ремонтных работ
	17	Профилактические работы
	18	Ремонт механической части оборудования
	19	Ремонт электрической части оборудования
	20	Ремонт системы ЧПУ

### Литература

- [1] *A Simple Network Management Protocol (SNMP)*. URL.: <http://ru.wikipedia.org/wiki/SNMP> (дата обращения 15.09.2013).
- [2] Shipway Steve. *Using MRTG with RRDtool and Routers2.CheshireCatComputing*, 2010.
- [3] *CACTI*. <http://www.cacti.net/> (дата обращения 16.09.2013).
- [4] Olups Rihards. *Zabbix 1.8 Network Monitoring*, Packt Publishing, 2010.
- [5] *IBM Tivoli — Integrated Management software*. URL: <http://www-01.ibm.com/software/tivoli/solutions/> (дата обращения 17.09.2013)

УДК 004.01

## Внедрение интерактивных руководств по эксплуатации на заказах основного производства

© Будрин Павел Константинович, Жадовский Александр Александрович

Россия, Архангельская обл., г. Северодвинск, ОАО «Производственное объединение “Северное машиностроительное предприятие”»

[g0dvin@rambler.ru](mailto:g0dvin@rambler.ru)

*Рассмотрены интерактивные электронные технические руководства (ИЭТР). Проанализированы причины появления ИЭТР. Описаны предназначение, использование, преимущества ИЭТР. Дана классификация и стандартизация ИЭТР.*

**Ключевые слова:** интерактивное электронное техническое руководство, база данных, электронная система отображения, CALS-технологии.

Интерактивное электронное техническое руководство (ИЭТР) — техническое руководство, выполненное в электронной форме, которое представляет собой структурированный комплекс взаимосвязанных технических данных, предназначенный

для предоставления в интерактивном режиме справочной и описательной информации об эксплуатационных и ремонтных процедурах, связанных с конкретным изделием. ИЭТР включает в себя базу данных (БД), в которой хранится вся информация об изделии, и электронную систему отображения (ЭСО), предназначенную для визуализации данных и обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем. Информация в ИЭТР может быть представлена в виде текста, графических изображений, 3D-моделей, анимации, аудио- и видеороликов. Использование аудио- и видеоданных позволяет наглядно показать выполнение операции обслуживания или ремонта изделия.

Рассмотрим проблемы эксплуатации традиционной бумажной документации. Как известно, для наукоемких промышленных изделий стоимость их эксплуатации может равняться стоимости первичного изготовления или превосходить эту стоимость. В свою очередь, затраты на создание и поддержку эксплуатационной технической документации могут составлять значительную часть от общих затрат на эксплуатацию самого изделия. Это объясняется необходимостью решения следующих задач:

- поддержание актуальности документации, обусловленное необходимостью учета большого количества изменений в документации, которые появляются уже в процессе эксплуатации изделия;
- полное и однозначное представление эксплуатационной информации. Например, сложные операции по обслуживанию изделия лучше всего представлять в виде анимационного или видеоролика;
- поддержание целостности документации;
- организация своевременного и правильного заказа и поставки запасных частей и материалов;
- освоение новых изделий эксплуатационным, обслуживающим и ремонтным персоналом.

**Информация, содержащаяся в ИЭТР.** Эксплуатационная техническая документация — важнейшая составляющая эффективного использования изделия на постпроизводственных стадиях его жизненного цикла. От полноты и достоверности сведений, содержащихся в эксплуатационной технической документации, зависит качество выполнения процессов и процедур обслуживания изделия, а также производительность труда эксплуатационного и ремонтного персонала.

Руководство по технической эксплуатации — документ, содержащий техническое описание и инструкцию по эксплуатации, куда должны входить все сведения, необходимые для правильной эксплуатации.

Любое сложное изделие представляет собой иерархию подсистем, узлов и деталей. В ИЭТР с каждым элементом изделия ассоциируется следующая информация:

- состав изделия;
- техническое описание изделия;
- технология эксплуатации, обслуживания и ремонта изделия;
- информация о диагностике неисправностей;
- информация о заказе комплектующих.

**Механизм представления информации пользователю ИЭТР.** ИЭТР включает в себя БД и ЭСО, предназначенную для визуализации данных и обеспечения интерактивного взаимодействия с пользователем. База данных ИЭТР имеет структуру, позволяющую пользователю быстро получить доступ к нужной информации. База данных ИЭТР может содержать текстовую и графическую информацию, а также

данные в мультимедийной форме (аудио и видео данные). ЭСО обеспечивает унифицированный для всех ИЭТР способ взаимодействия с пользователем и технику представления информации.

**Основные функции ИЭТР.** Общий перечень функций, которые должно выполнять ИЭТР для решения рассмотренных проблем, выглядит следующим образом:

1) *справочный материал по эксплуатации изделия.* ИЭТР позволяет ознакомить персонал с устройством и функционированием изделия, его систем и частей.

ИЭТР позволяет контролировать выполнение операций при эксплуатации и обслуживании изделия. Предупреждения об возможных опасностях позволяют повысить безопасность работы;

2) *справочный материал по регламентным работам и ремонту изделия.* В ИЭТР содержатся сведения об условиях проведения технического обслуживания и ремонта, необходимых инструментах и материалах, количестве и квалификации персонала.

ИЭТР позволяет просматривать всю информацию, необходимую для выполнения ремонтных операций либо перед выполнением ремонтной операции, либо, при наличии портативного компьютера, даже во время выполнения ремонтных операций непосредственно на рабочем месте.

3) *обучение персонала.* Введение в ИЭТР специальных учебных программ позволяет совершенствовать качество обучения. В ИЭТР при дальнейшем развитии могут войти специальные программы, имитирующие функционирование изделия для тренировки персонала. Это позволит сократить время тренировки персонала на реальном изделии, что повлияет на качество обучения и, что более важно, позволит проигрывать те критические ситуации, которые при возникновении в реальной работе могут привести к катастрофическим последствиям.

4) *диагностика оборудования и поиск неисправностей.* Она основана на использовании экспертных систем ИЭТР предполагает либо интерактивный диалог с человеком, который вручную вводит состояние элементов системы или отвечает на вопросы, либо непосредственный автоматический контакт с диагностическим оборудованием.

Результатом диагностирования изделия является список возможных неисправностей и план ремонтных работ по их устранению%

5) *обеспечение взаимодействия пользователя с производителем и сервисным центром.* Осуществляется, как правило, с помощью механизмов Интернет. С помощью системы ссылок организуется доступ к содержащейся на сайте производителя или сервисного центра постоянно обновляемой технической информации об изделии. Также организуется обратная связь пользователя изделия с производителем. В ИЭТР можно организовать автоматизированный заказ материалов и запасных частей. Для этого в спецификации запасных частей указываются реквизиты поставщиков этих деталей. Система способна на основе запроса пользователя самостоятельно создавать заявки на запасные части и материалы и отправлять их по указанному адресу.

**Классификация ИЭТР.** Можно выделить несколько классов ИЭТР, каждый из которых характеризуется определенной функциональностью и стоимостью реализации.

Чем выше класс ИЭТР, тем выше уровень сложности его создания, но функциональные возможности и удобства использования систем более высоких классов выше возможностей ИЭТР более низких классов.

Рассмотрим подробнее каждый из классов.

**Класс 1. Бумажно-ориентированные электронные документы.** Бумажно-ориентированные электронные документы предполагают перевод бумажных руко-

водств в электронный вид простым сканированием изображений страниц руководств и снабжением их кратким оглавлением.

Серьезным недостатком бумажных руководств по эксплуатации является то, что для больших изданий эти руководства представляют собой десятки килограмм всевозможных книг и занимают много места. Отсюда возникают проблемы с поиском необходимой информации, тиражированием, транспортировкой и поддержанием целостности руководства.

**Класс 2. Неструктурированные документы.** При создании ИЭТР 2-го класса необходимо отсканированные страницы руководств распознать, это позволит работать с данными, представленными в виде текста. Текст также может быть подготовлен в одном из текстовых редакторов (например, MS Word). К этому классу руководств можно отнести электронные документы, выполненные в формате HTML, а также электронные руководства, выполненные в виде специализированного программного обеспечения (например, различные «Энциклопедии автолюбителя»).

При создании ИЭТР 1-го класса просто переводят информацию из бумажного в электронный вид, не добавляя к возможностям руководства ничего нового. ИЭТР 2 класса позволяет расширить функции бумажного руководства за счет добавления к ним новых возможностей: ссылок для автоматического перехода из любого места руководства в любое место руководства, иллюстраций, аудио- и видеофрагментов. Кроме того, за счет представления руководства в виде электронного текста, появляется возможность проводить полнотекстовый поиск по всему руководству.

**Класс 3. Структурированные документы.** ИЭТР должны удовлетворять требованию программно-аппаратной независимости, поэтому ИЭТР 3-го класса и выше должны быть оформлены как SGML-документы. Основным преимуществом ИЭТР 3-го класса является возможность стандартизации — электронный документ делится на отдельные компоненты, которые и стандартизируются.

*Общие требования к содержанию ИЭТР.* ИЭТР должно включать в себя: введение, оглавление, декларацию об области применения, номер ИЭТР, дату выпуска ИЭТР, а также может содержать дополнительные разделы, требуемые заказчиком.

*Требования к техническим функциям.* Состав ИЭТР должен обеспечивать полноту, ясность изложения и эффективность применения. Например, использование иллюстрированных схем должно обеспечивать быстрый поиск нужного агрегата или детали, демонтаж или замену. Общая схема изделия должна помогать понять технологию выполнения работ и т.д.

*Общие требования к стилю ИЭТР.* Требования в «стилю» ИЭТР определяют:

- а) требования языкового характера (грамматика, синтаксис, применяемый словарь, критерии отбора технической терминологии, нумерация, сокращения);
- б) презентационные аспекты текста, графики, звуковой информации (дизайн графических элементов, конструкция выносок и экспликации на чертежах, ограничения на применение звуковых сигналов и т. д.).

*Общие требования к интерактивному взаимодействию с пользователем:*

- а) требования к функциям управления дисплеем (окна, курсор, прокрутка и т. д.);
- б) требования к функциям взаимодействия пользователя с ИЭТР, которые необходимы пользователю для того, чтобы получить интересующую информацию.

Эти требования должны найти свое отражение при создании ЭСО.

**Класс 4. Интерактивные базы данных.** По внешним признакам ИЭТР 3-го и 4-го классов практически одинаковы, в том числе и в смысле стандартизованного интерфейса. Однако по внутренней организации они существенно отличаются, что

влияет на способ их использования. Так как текст является структурированным, снабженным атрибутами, разбитым на элементы, то он может быть с достаточной легкостью помещен в соответствующую базу данных. В отличие от ИЭТР -го класса, представляющего собой набор файлов, в ИЭТР 4-го класса для хранения информации применяется промышленная СУБД, что позволяет эффективно управлять большими объемами данных и, соответственно, создавать и использовать ИЭТР на сложные промышленные изделия (например, самолет). Кроме того, исключение дублирования многократно используемых данных приводит к значительному уменьшению объема документации и вероятности ошибки при повторном вводе идентичной информации.

**Класс 5. Интегрированные базы данных.** ИЭТР данного класса сочетают в себе функциональность технических руководств предыдущих классов с возможностью прямого взаимодействия с электронными модулями диагностики изделий, что существенно облегчает обслуживание и ремонт изделия. ИЭТР 5-го класса позволяют автоматически проводить операции по поиску неисправностей в изделии, локализации сбоев, подбору запасных частей и взаимодействию с поставщиком изделия.

**Преимущества ИЭТР.** Использование ИЭТР дает следующие преимущества по сравнению с традиционными бумажными техническими руководствами:

1) проведенные исследования показали, что при освоении нового изделия применение ИЭТР позволяет на 20...25 % сократить сроки обучения. При этом существенно повышается средний уровень освоения материала учащимися. Более того, правильно организованное ИЭТР позволяет в ряде случаев проводить такое обучение без отрыва от производства прямо в процессе внедрения новой техники;

2) одно интегрированное ИЭТР может заменить собой целый комплекс традиционных технических руководств, посвященных эксплуатации, техническому обслуживанию и различным видам ремонта изделия. Естественно, что в рамках одного документа процедура поиска нужной информации существенно упрощается. В частности снимается проблема утери отдельных технических руководств или их частей, что характерно для эксплуатации бумажной документации.

В интегрированном ИЭТР организовать обновление информации гораздо проще, чем в бумажных руководствах. Например, не надо перепечатывать руководство целиком или допечатывать к нему тома обновлений. В правильно организованном ИЭТР обновление какой-либо части информации тут же влечет за собой автоматическое обновление этой информации во всех ее вхождениях в ИЭТР. В ИЭТР должна быть включена процедура регулярного обращения к производителю изделия за свежей информацией по всем разделам ИЭТР.

Таким образом, ИЭТР по эксплуатации, обслуживанию и ремонту, предоставляемое заказчику в электронном виде и отображаемое электронной системой отображения, является важным компонентом CALS-технологии в области организации электронного обмена и автоматизированного управления информацией об изделии.

## Литература

- [1] ГОСТ 2.051—2006. *Электронные документы.*
- [2] ИСО 8879—86. *Обработка информации. Текстовые и офисные системы. Стандартный обобщенный язык разметки (SGML).*
- [3] ИСО/МЭК 10744—98. *Информационная технология. Язык структурирования гипермедийной информации на основе разметки по времени (HyTime).*

УДК 621.47

## Модель работы системы электронного обучения с учетом психофизиологического состояния обучаемого

© Варнавский Александр Николаевич, Мусолин Александр Константинович

Россия, г. Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет

[varnavsky\\_alex@rambler.ru](mailto:varnavsky_alex@rambler.ru)

*Рассмотрена возможность организации работы в системе электронного обучения с учетом психофизиологического состояния обучаемого. проанализировано множество возможных состояний обучаемого в процессе его работы в системе и разработана сетевая модель Петри для описания работы системы электронного обучения с учетом психофизиологического состояния обучаемого. Проведена серия экспериментов по исследованию зависимости успешности текущего обучения от показателей памяти и внимания, на основе которой построена математическая модель.*

**Ключевые слова:** система электронного обучения, психофизиологическое состояние, модель успешности обучения, сетевая модель Петри, состояния обучаемого.

В настоящее время большой популярностью для обучения и изучения информации пользуются системы электронного обучения. Такое изучение учебного материала имеет свои достоинства и недостатки. Студент может самостоятельно выбирать наиболее оптимальное для него время обучения, имеется возможность для персонализации и адаптации процесса обучения с учетом индивидуальных свойств обучаемого, его текущего и базового уровня подготовки [1–2]. С другой стороны, чтение с экрана является более трудоемким процессом, создавая большую нагрузку на головной мозг. А отсутствие психофизиологического контроля за состоянием обучаемого может привести к тому, что обучаемый продолжит изучение материала при снижении работоспособности или процесс обучения для данного состояния будет неоптимальным.

В процессе обучения желательно учитывать психофизиологическое состояние обучаемого, поскольку оно сильно влияет на эффективность обучения. Поэтому актуальной является задача учета психоэмоционального состояния в процессе электронного обучения.

Целью работы является разработка сетевой модели Петри работы системы электронного обучения с учетом психофизиологического состояния обучаемого.

Выделим множество  $\{B_i\}$  возможных состояний обучаемого в процессе взаимодействия с системой электронного обучения:

$B_0$  — начальное состояние обучаемого перед входом в систему;

$B_1$  — подготовка обучаемого к процессу обучения в системе в случае, если прогноз текущего уровня его обучения не удовлетворительный;

$B_2$  — разрешение работы в системе электронного обучения;

$B_3$  — работа в системе электронного обучения;

$B_4$  — отдых или перерыв в процессе работы в системе электронного обучения.



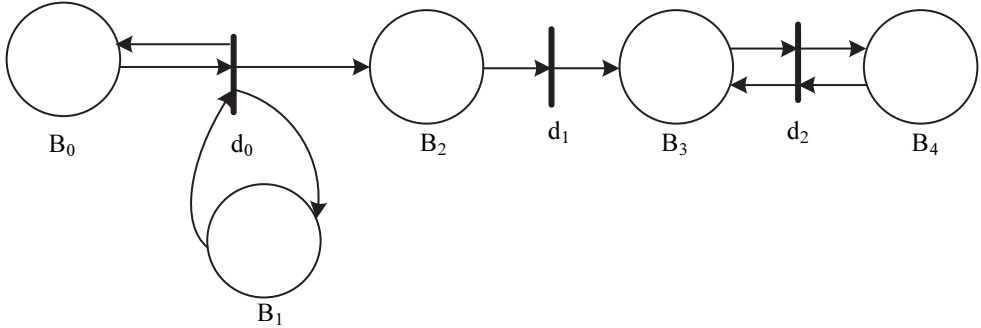
Множество  $\{d_j\}$  возможных переходов, описывающих переход из одного состояния в другое, следующее:

$d_0$  — начальное психофизиологическое тестирование, позволяющее спрогнозировать успешность текущего обучения в системе;

$d_1$  — начало работы с системой электронного обучения;

$d_2$  — контроль текущего функционального состояния в процессе работы в системе.

Тогда можно построить сетевую модель Петри, описывающую работу системы электронного обучения с учетом психофизиологического состояния обучаемого (рис. 1).



**Рис. 1.** Сетевая модель Петри для описания работы системы электронного обучения с учетом психофизиологического состояния обучаемого

Данная модель описывает следующий алгоритм функционирования системы электронного обучения:

- 1) проведение психофизиологического тестирования перед началом работы;
- 2) прогнозирование успешности текущего обучения;
- 3) в случае, если результат прогноза является неудовлетворительным, то осуществляется подготовка обучаемого к работе в системе до тех пор, пока после повторного психофизиологического тестирования результат прогноза не станет удовлетворительным;
- 4) при удовлетворительном прогнозе разрешается работа в системе электронного обучения и осуществляется определение начальных значений показателей функционального состояния, исходя из которых формируются критические значения показателей функционального состояния;
- 5) в процессе работы в системе осуществляется контроль показателей текущего функционального состояния. Если в результате такого контроля значения показателей функционального состояния достигли критических уровней, в частности, развилось утомление, то осуществляется принудительный запрет на работу и предоставляется интервал для отдыха.

Для реализации данного алгоритма необходимо разработать модель, которая позволяет оценить успешность обучения, исходя из результатов психофизиологического тестирования. Такая модель была построена с помощью регрессионного анализа на основе экспериментальных данных, полученных в серии экспериментов участниками которого являлись 30 студентов II–V-го курсов Рязанского государственного радиотехнического университета. Испытуемым предъявлялась запись 10 двухзначных чисел, которые они должны были запомнить в течение 30 с и воспроизвести в

течение 1 мин. После минутного отдыха в течение 4 мин проводился тест Крепелина [3], а затем после минутного отдыха в течение 4 мин — тест Бурдона [3]. Для оценки степени усвоения материала испытуемым было предложено в течение 2 мин изучить небольшой незнакомый технический материал, а затем в течение 1 мин воспроизвести его, отразив наиболее значимые моменты.

По результатам эксперимента был сформирован набор из 30 наблюдений, на основе которого была рассчитана совокупность следующих параметров:

$x_1$  — коэффициент работоспособности; отношение числа произведенных операций сложения в тесте Крепелина за первую половину времени тестирования к числу операций за вторую половину;

$x_2$  — средняя скорость выполнения операций сложения в тесте Крепелина;

$x_3$  — показатель точности работы в тесте на внимание: отношение разности числа верно зачеркнутых букв и числа ошибок (пропусков и лишних зачеркнутых) к числу букв, которые должны быть зачеркнуты;

$x_4$  — коэффициент концентрации внимания по результатам теста Бурдона;

$x_5$  — коэффициент кратковременной памяти; процент верно запомненных и воспроизведенных двузначных чисел;

$Y$  — оценка понимания материала по шкале зачет/незачет.

Был проведен регрессионный анализ полученных значений для определения логистической регрессии  $Y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ . В этой зависимости  $Y$  описывает вероятность способности обучаемого к успешному обучению.

Для прогнозирования способности обучаемого к успешному обучению для значения  $Y$  необходимо задать пороговый уровень. Задав пороговый уровень  $Y_{\text{пор}} = 0,6$ , получили, что логистическая модель  $Y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5$  способна правильно классифицировать обучаемых, принимавших участие в эксперименте, с вероятностью 0,87. В таком случае при  $Y < Y_{\text{пор}}$  обучаемый не готов к обучению, необходимо организовать отдых или настроиться на обучение и повторно пройти психофизиологическое тестирование. При  $Y \geq Y_{\text{пор}}$  обучаемый может работать в системе.

Психофизиологическое тестирование нельзя использовать для динамической оценки текущего психофизиологического состояния обучаемого в процессе работы с системой электронного обучения, поскольку требует отвлечение обучаемого на выполнение тестов. Можно предложить использовать анализ биоэлектрических сигналов, в частности кожно-гальванической реакции (КГР) [4]. При этом необходима аппаратная часть для съема сигнала КГР и программная часть для ее анализа.

Пороговые уровни для составляющих КГР могут быть заданы, исходя из значения сигнала КГР в момент начала работы в системе электронного обучения. В таком случае можно сопоставить результаты психофизиологического тестирования и полученное значение  $Y$  со значением сопротивления кожи обучаемого.

Реализация предложенной модели и алгоритма работы системы электронного обучения позволит повысить эффективность обучения за счет того, что будут учитываться психофизиологическое состояние обучаемого.

## Литература

- [1] Солонина А.Г. *Концепция персонализированного обучения*. Москва, Прометей, 1997, 187 с.
- [2] Живенков А.Н., Иванова О.Г. Формирование плагинов LMS Moodle для адаптивного построения структуры курса электронного обучения. *Научные ведомости. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика*, 2010, № 19 (90), вып. 16/1, с. 150.

- [3] Бруннер Е.Ю. *Лучше, чем супервнимание. Методики диагностики и психокоррекции*. Ростов-на-Дону, Феникс, 2006, 316 с.
- [4] Варнавский А.Н. Имитационное моделирование производительности труда работника при разных вариантах организации производственных работ. *Автоматизация в промышленности*, 2013, № 7, с. 55–59.

УДК 004.942

## Система автоматизированного проектирования Optolithium для моделирования процесса проекционной литографии

© Гладких Алексей Алексеевич, Шахнов Вадим Анатольевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[gladkikhalexei@gmail.com](mailto:gladkikhalexei@gmail.com)

*Рассмотрена система автоматизированного проектирования (САПР) для моделирования процесса проекционной литографии. Описана ее внутренняя архитектура и структура. Приведены основные программные библиотеки, использованные при разработке программного обеспечения. Показаны основные возможности разработанной САПР, а также примеры результатов моделирования профиля резиста. Представлены возможные варианты использования САПР, в частности в учебном процессе при подготовке студентов по соответствующим специальностям.*

**Ключевые слова:** литография, моделирование, сверхбольшие интегральные схемы, САПР, оптика.

**Введение.** Одной из основных критических технологий изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС), влияющих на текущий уровень развития и стабильность производства электронной элементной базы, в частности субмикронных СБИС, является технологический процесс литографии [1].

Качественная взаимосвязь минимального воспроизводимого элемента топологии интегральных микросхем в зависимости от параметров оптической системы хорошо известна, как критерий Релея [2]. Кроме этого процесс проекционной литографии характеризуется большим количеством настраиваемых технологических параметров, не охватываемых критерием Релея, таких как доза экспонирования, положение фокальной плоскости оптической системы и т. п.

За время развития микро- и нанoeлектроники, а также подходов к компьютерному моделированию были разработаны различные модели, позволяющие оценить качественно и количественно влияние тех или иных технологических параметров на результат процесса литографии [2]. Далее будем называть эти модели физические. Кроме этого были разработаны модели, позволяющие проводить быстрые расчеты с фиксированными параметрами технологического процесса, но для варьирующейся

конфигурации топологических структур [3], далее будем называть эти модели эмпирические.

В настоящее время разработано несколько систем автоматизированного проектирования, позволяющих проводить моделирование всех этапов технологического процесса литографии на основе физических моделей [4, 5], а также системы на базе эмпирических моделей [6]. Необходимо отметить, что все это программное обеспечение является разработкой зарубежных компаний, причем его стоимость зачастую крайне высока. Среди отечественных систем литографического моделирования можно отметить [7]. Однако в данной работе представлена возможность моделирования только этапов процесса литографии, относящихся к оптической системе.

Следует отметить, что во время подготовки студентов технических вузов по направлениям подготовки, связанным с конструированием и технологией производства микро- и нанoeлектроники, существует задача формирования базовых знаний по моделированию различных технологических процессов. С учетом большого количества различных параметрических зависимостей результата процесса литографии от его технологических параметров, а также его основополагающей роли в процессе изготовления интегральных микросхем, этот процесс представляется одним из наиболее удачных для задачи формирования навыков моделирования у студентов. В связи с указанным выше в рамках работы была проведена разработка системы автоматизированного проектирования для моделирования процесса проекционной литографии.

**Основные возможности и внутренняя структура САПР Optolithium.** В настоящее время САПР Optolithium позволяет проводить моделирование всех основных этапов процесса проекционной литографии с использованием указанных выше физических моделей:

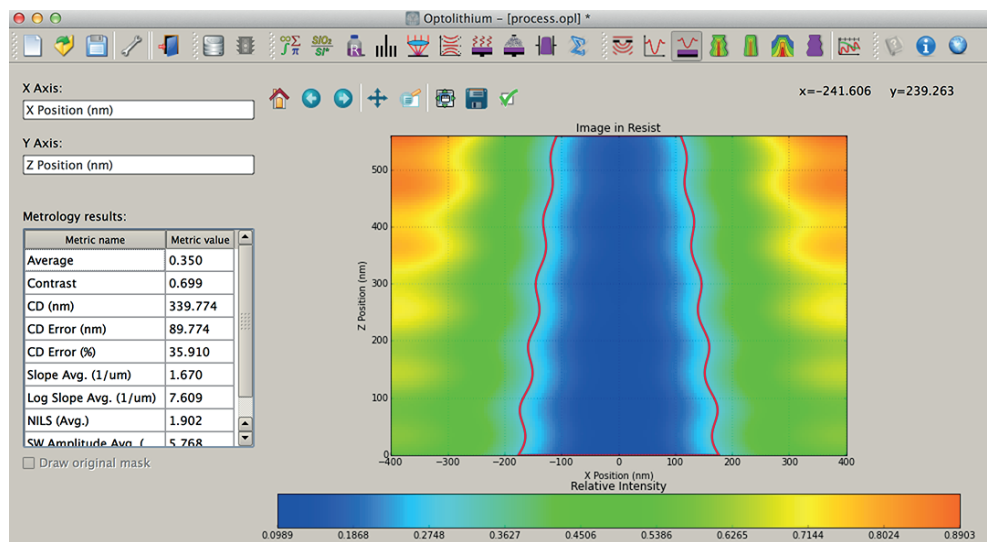
- 1) моделирование воздушного изображения — интенсивности излучения на плоской поверхности (поддерживаются только расчеты на основе скалярной модели);
- 2) моделирование распределения интенсивности излучения в толще резиста (используется модель расчета стоячих волн, приведенная в работе [1]);
- 3) экспонированное скрытое изображение в резисте, представляемое распределением фотоактивного вещества (Photoactive Component Concentration — PAC). Для расчета используется так называемая модель Дилла [1];
- 4) экспонированное скрытое изображение после проведения постэкспозиционной термообработки (выполняется для уменьшения влияния стоячих волн);
- 5) двухмерный профиль резиста.

Таким образом, САПР Optolithium охватывает все этапы процесса литографии. Кроме этого доступно также и возможность параметрических расчетов (варьирование заданного параметра и автоматизированное построение зависимости выходного значения, например ширины профиля резиста по основанию).

По структуре САПР стоит отметить ее модульную архитектуру. Так все программное обеспечение разделено на две основные части: быстродействующее ядро OptolithiumC и графический интерфейс пользователя OptolithiumGui. Рассмотрим их несколько подробнее. Ядро разработано на языке программирования C++ и его основная задача — непосредственное моделирование этапов процесса литографии. Этот модуль полностью независим от графического интерфейса и может быть использован в другом программном обеспечении в виде динамически-подключаемой библиотеки (shared library). Графический интерфейс пользователя разработан на языке программирования Python с использованием библиотеки для разработки интерфейсов Qt4 (интеграция обеспечивается за счет PySide). Можно отметить, что ядро

подключается с использованием программы автоматического формирования программных интерфейсов SWIG [8].

**Представление графического интерфейса и примеры моделирования.** Основной графического интерфейса пользователя является стандартный на сегодняшний день для большинства САПР оконный интерфейс. Все настройки технологического процесса литографии представлены в левой половине окна и разделены по соответствующим вкладкам с заданными мнемоническими обозначениями (рис. 1). Аналогично для результатов моделирования, также выделены отдельные вкладки, представленные в правой половине окна.

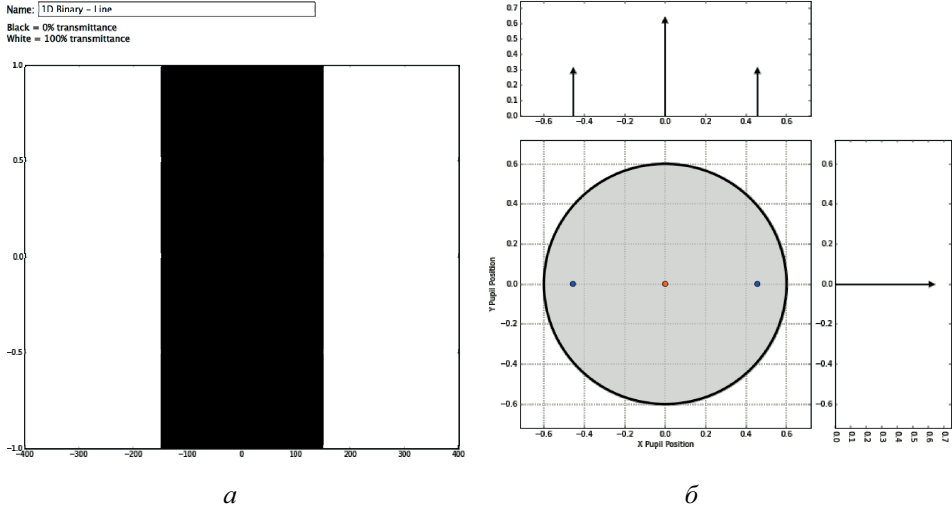


**Рис. 1.** Результат моделирования распределения относительной интенсивности излучения в резисте для группового элемента с размером 300 нм и шагом 800 нм

В качестве примера рассмотрим моделирование стандартных для аттестации литографического процесса тестовых структур (групповое расположение структур), представляющих собой набор повторяющихся элементов типа линия/зазор с заданным размером темной (непрозрачной) части и шагом структуры (периодом повторения). Участок фотошаблона представлен на рис. 2, а, а соответствующее ему распределение дифракционных порядков по выходному зрачку проекционного объектива оптической системы — на рис. 2, б.

В качестве технологического стека слоев подложки был задан следующий набор слоев: резист (толщина резиста 530 нм), нижнее антиотражающее покрытие (Bottom Anti-Reflection Coat — BARC), поликремний, диоксид кремния, монокремний. Такой технологический стек слоев соответствует этапу изготовления поликремниевых затворов полевых транзисторов технологического процесса производства интегральных схем. Кроме этого фоточувствительным материалом для полученных результатов моделирования был использован резист Ultra i-123, применяемый для размеров порядка 250 нм [10]. В качестве модели фоторезиста была использована так называемая notch-модель с параметрами, полученными в работе [11]. Чтобы акцентировать

внимание на возможности моделирования эффектов отражения от границ раздела в стекле слоев и формирования стоячих волн, получаемых на боковых стенках профиля резиста во время проведения моделирования, этап постэкспозиционной термообработки (далее ПЭТ) был пропущен.



**Рис. 2.** Участок фотошаблона с групповой тестовой структурой с параметрами: ширина непрозрачной области 300 нм и шагом 800 нм (а) и соответствующее ему распределение дифракционных порядков по выходному зрачку объектива (б)

Результат моделирования распределения относительной интенсивности излучения в резисте для группового элемента с размером 300 нм и шагом 800 нм вместе с основным окном разработанной САПР приведен на рис. 1. На рис. 3 представлен результат моделирования двумерного профиля резиста после экспонирования для группового элемента с размером 300 нм и шагом 800 нм. На приведенных рисунках хорошо видно наличие стоячих волн, вызванных отсутствием во время моделирования стадии ПЭТ. Кроме этого на рис. 3 показаны измеренные размеры профиля резиста на различных уровнях толщины.

**Применение разработанной САПР Optolithium.** В настоящий момент основное назначение САПР Optolithium для моделирования процесса проекционной литографии является обучение студентов, проходящих подготовку по направлению 211000.62 «Конструирование и технология электронных средств» основам технологических процессов полупроводникового производства интегральных микросхем с использованием компьютерного моделирования. В связи с этим на базе программы обучения кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан курс «Методы литографии в нанотехнологии», в рамках которого внедрена САПР Optolithium. Это позволяет отказаться от дорогостоящих САПР, разработанных иностранными компаниями, зачастую находящихся под эмбарго. В будущем также планируется проводить расширение функциональности разработанной САПР и повысить возможность ее применения на различных отечественных производствах интегральных микросхем. В частности, для

повышения качества кодовой базы и функциональности разработанного программного обеспечения, предполагается перевод проекта в разряд проектов с открытым исходным кодом. Это позволит обеспечить доступ к возможности оказания помощи в развитии проекта другими исследовательскими коллективами, а также решению их собственных задач.

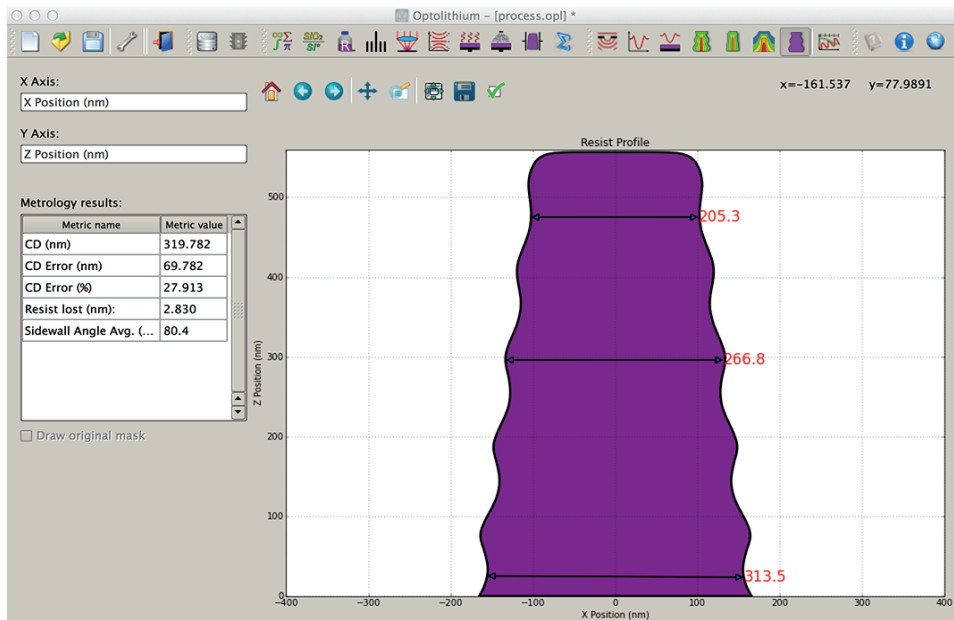


Рис. 3. Результат моделирования двумерного профиля резиста после экспонирования для группового элемента с размером 300 нм и шагом 800 нм

**Выводы.** Разработана система автоматизированного проектирования, позволяющая проводить моделирования технологического процесса проекционной литографии. В системе реализованы модели, дающие возможность оценить с помощью компьютерного моделирования результаты каждого из этапов процесса проекционной литографии. Разработанная система внедрена в учебный процесс кафедры «ИУ-4» «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» в рамках курса «Методы литографии в нанотехнологии».

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (грант НШ-2903.2014.9) и гранта РФФИ № 15-07-03116.*

## Литература

- [1] Родионов И.А. *Разработка литографических процессов изготовления СБИС с размерами элементов меньше длины волны экспонирующего излучения.* Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2010, 165 с.
- [2] Chris A. Mack. *Fundamental Principles of Optical Lithography. The Science of Microfabrication.* John Wiley & Sons Ltd, 2007, 515 p.

- [3] Cobb N.B. *Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing*: PhD. California, Berkeley University, 1998, 123 p.
- [4] *PROLITH. KLA-Tencor*. URL: <http://www.kla-tencor.com/Lithography-Software/chip-prolith.html> (дата обращения 23.06.2015).
- [5] *Advanced 2D Optical Lithography Simulator. Silvaco*. URL: [http://www.silvaco.com/products/vwf/athena/optolith/optolith\\_br.html](http://www.silvaco.com/products/vwf/athena/optolith/optolith_br.html) (дата обращения 23.06.2015).
- [6] *Calibre Computational Lithography. Mentor Graphics*. URL: <http://www.mentor.com/products/ic-manufacturing/computational-lithography/> (дата обращения 23.06.2015).
- [7] Домненко В.М. *Математическое моделирование формирования фотолитографического изображения*. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 1999, 130 с.
- [8] Simplified Wrapper and Interface Generator. Электронный ресурс. <http://www.swig.org/> (дата обращения 23.06.2015).
- [9] Ultra-i 123 i-line photoresist. Electronic materials and Microelectronic technologies. URL: [http://micromaterialstech.com/wp-content/dow\\_electronic\\_materials/datasheets/Ultra-i-123\\_Photoresist.pdf](http://micromaterialstech.com/wp-content/dow_electronic_materials/datasheets/Ultra-i-123_Photoresist.pdf) (дата обращения 23.06.2015).
- [10] Mack C., Maslow M., Robertson S. Towards a Universal Resist Dissolution Model for Lithography Simulation. Proceedings. Lithography for Semiconductor Manufacturing. *SPIE*, 2013, vol. 4404, pp. 111–122.

УДК 621.81

## **Автоматизация технологических расчетов при изготовлении изделий из металлопроката**

© Гринюк Ольга Николаевна, Лукиенко Леонид Викторович

Россия, Тульская обл., г. Новомосковск, Новомосковский институт (филиал)  
Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

[olgrinyuk@mail.ru](mailto:olgrinyuk@mail.ru), [lukienko\\_lv@mail.ru](mailto:lukienko_lv@mail.ru)

*Дана характеристика существующих методов повышения эффективности изготовления изделий из металлопроката. Рассмотрены основные этапы производства и технологических расчетов. Проанализированы программы для автоматизации технологических расчетов. Разработан программный комплекс, позволяющий пользователю проводить расчеты различных этапов и стадий изготовления изделий из металлопроката: эффективности использования металла, расчеты формообразующих операций, складкообразования (гофры) при вытяжке, гибочных операций, энергосиловых характеристик. Программный комплекс может использоваться при технологическом проектировании, в научно-исследовательских работах и в учебном процессе.*

**Ключевые слова:** производство изделий из металлопроката, повышение эффективности выполнения технологических операций при производстве металлоконструкций.

Изготовление изделий из металлопроката всегда актуально. Металлические изделия окружают нас везде: конструкции зданий и сооружений, решетки, двери, металлические шкафы, гаражи, конструкции железобетонные и пр. Изделия из металлопроката имеют широкое значение и используются в современном строительстве и



машиностроении. Они различаются по способу изготовления, конфигурации, принципам действия и размерам. Для производства крупных конструкций нужны большие заводы, а для производства металлических изделий среднего и небольшого размера нужен только цех.

Технология изготовления изделий из металлопроката включает следующие этапы: очистка, раскрой, правка металла, разметка и резка металла. В связи с высокой популярностью данного вида деятельности очень высока конкуренция. Основным конкурентным преимуществом является высокое качество изделий при минимальной стоимости изготовления, которое достигается путем повышения эффективности и точности изготовления. Повышение эффективности осуществляется за счет снижения удельных затрат сырья и материалов, которое возможно в результате увеличения применения прогрессивных конструкционных материалов, сокращение отходов производства. В свою очередь, комплекс мер по снижению материалоемкости изделия включает: применение рациональных сортментов и марок материалов, эффективных способов получения заготовок, методов и режимов упрочнения деталей; разработку и применение прогрессивных конструктивных решений, позволяющих повысить ресурс изделия и использовать малоотходные и безотходные технологические процессы; разработку рациональной компоновки изделия, обеспечивающей сокращение расхода материала.

Повышение качества изготовления, а следовательно уменьшение брака, также возможно за счет достижения точно рассчитанных значений технологических параметров деталей и технологических значений применяемого оборудования. Определяя, например, рациональность той или иной схемы раскроя, необходимо учитывать не только ее экономичность — коэффициент использования металла (КИМ). Раскрой должен обеспечить высокое качество деталей, наибольшую производительность (низкую трудоемкость), простоту конструкции штампа и высокую стойкость его рабочих частей, а также удобство и безопасность работы, т. е. даже для одной технологической операции необходимо многократно рассчитывать целый ряд технологических параметров и определять их влияние на эффективность и качество изготовления в комплексе.

Например, согласно ГОСТ 18970—84 мерой эффективности раскроя служит КИМ —  $K_{и}$  (мера плотности размещения заготовок):

$$K_{и} = \frac{M_{д}}{H},$$

где  $M_{д}$  — масса детали, кг;  $H$  — норма расхода материала на одну деталь,

$$H = \frac{M_{л}}{n_{д}}.$$

Здесь  $M$  — масса листа (рулона, фрагмента ленты) применяемого для штамповки, кг;  $n_{д}$  — число деталей, полученных в результате раскроя материала, шт.

Необходимые технологические расчеты выполняются для каждой операции.

При разработке различных разделительных операций (например, вырубка, пробивка) необходимо выполнить ряд технологических расчетов. Помимо определения размеров полосы (ширину), из которой будет вырубаться заготовка и выбора размеров листа и раскрой его на полосы, необходимо рассчитать коэффициент раскроя для каждого варианта и выбрать наиболее рациональный раскрой. Следует также расчи-

тать усилие резки при раскрое листа на ножницах и рассчитать усилие вырубки (пробивки отверстий), съема и проталкивания (выталкивания) детали и отхода.

Однако вручную выполнить все эти расчеты очень трудоемко, поэтому для автоматизации технологических расчетов применяют различные программное обеспечение: Астра Раскрой 4.2, ИНТЕХ — РАСКРОЙ программа для ЧПУ раскроя металла, семейство программ Cutting, Crude 1.0.0, APM WinMachine 9.0, программа KONCUT, OPTIMIZE 2.2, «Калькулятор металлста 4.5D», САПР раскроя листового материала «Винтех RCAM», «Калькулятор металлопроката», «Расчет нормвремени станочных работ», Microsoft Excel, Техтран. Однако данные программные продукты зачастую либо узко специализированы, т. е. предназначены для автоматизации расчетов какого-то одного этапа производства, либо обладают избыточным интерфейсом и слишком высокой стоимостью, доступной только крупным предприятиям по производству изделий из металлопроката.

Поэтому назрела необходимость разработки программного обеспечения, которое позволило бы автоматизировать технологические расчеты малого предприятия по производству изделий из металлопроката, уменьшить затраты времени на подготовку к выполнению стадий производства, снизить риск повреждения дорогостоящего оборудования вследствие применения неточных настроечных данных.

Программа предназначена для автоматизации расчетов различных этапов и стадий изготовления изделий из металлопроката, таких как расчеты эффективности использования металла (рис. 1), расчеты формообразующих операций, расчеты складкообразования (гофры) при вытяжке, расчеты для гибочных операций. Также с ее помощью можно рассчитать энергосиловые характеристики для различных типов операций производства изделий из металлопроката, например для одной из формообразующих операций, такой как резка (рис. 2) и автоматизировать расчеты простых металлоконструкций: заборы, ворота, цистерны и баки, и ряд наиболее популярных расчетов, таких как гаражи и др.

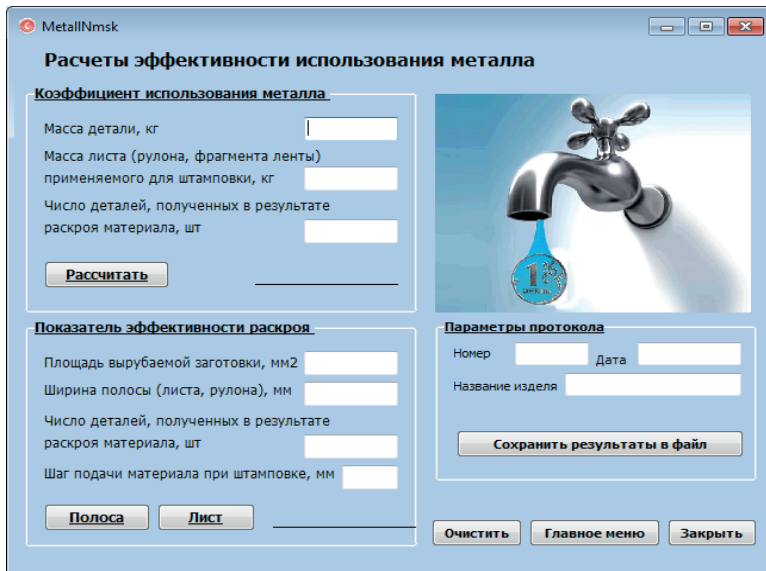


Рис. 1. Программное окно расчета эффективности использования металла

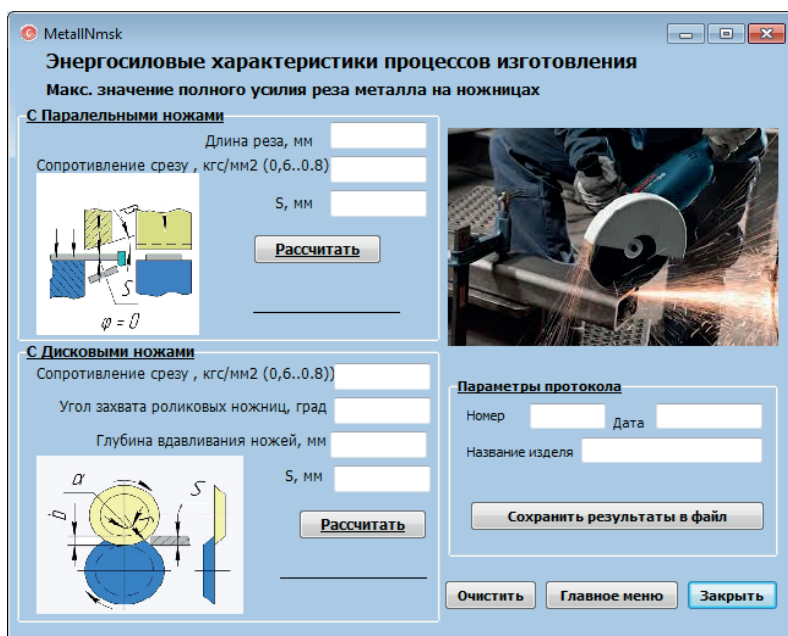


Рис. 2. Программное окно расчета энергосиловых характеристик процессов изготовления

Использование таких основных направлений экономии ресурсов, как внедрение новых технологий, повышение качества сырья и материалов, снижение отходов, использование вторичных ресурсов, позволяет создать надежно действующий противозатратный механизм функционирования предприятия по производству изделий из металлопроката.

Развитие машиностроения и металлообработки требует дальнейшего совершенствования технологических процессов и методов расчета деформационных характеристик операций по изготовлению изделий из металлопроката. В настоящее время накоплен большой опыт экспериментальных и теоретических исследований, посвященных изучению НДС изготовления деталей из металлопроката, рациональных принципов расчета технологических, прочностных характеристик. На основе полученных результатов установлены соответствующие расчетные методики, общие правила и нормы проектирования конструкции деталей и технологического процесса изготовления, гарантирующие высокие эксплуатационные способности деталей при обеспечении минимизации энергосиловых характеристик, трудоемкости штамповки; повышении ресурсосбережения (повышения КИМ), т. е. расширении технологических возможностей производства изделий из металлопроката.

## Литература

- [1] URL: <http://www.grandars.ru/student/ekonomicheskaya-teoriya/tehnologicheskaya-podgotovka.html> (дата обращения 05.05.15).
- [2] URL: [http://freesoft.ru/astra\\_raskroy\\_42](http://freesoft.ru/astra_raskroy_42) (дата обращения 05.05.15).
- [3] URL: <http://dwg.ru/dnl/6816> (дата обращения 05.05.15).

[4] URL: <http://www.f1cd.ru/soft/base/> (дата обращения 05.05.15).

[5] URL: <http://www.twirpx.com/file/49164/> (дата обращения 03.04.15).

[6] URL: <http://www.twirpx.com/files/machinery/software/> (дата обращения 25.06.15).

УДК 658.512

## Проектирование в САПР

© Журбенко Павел Александрович, Гузненков Владимир Николаевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[wln83@mail.ru](mailto:wln83@mail.ru)

*Рассмотрены вопросы моделирования, создания трехмерных геометрических моделей. Описаны действия, необходимые перед выполнением процесса проектирования, возможные ограничения и требования к объекту. Представлены этапы построения элементов детали. Показано, что использование САПР Autodesk Inventor расширяет возможности разработчиков изделий.*

**Ключевые слова:** системы автоматизированного проектирования, моделирование, модель, деталь, траектория, документация.

Перед проектированием в системе автоматизированного проектирования (САПР) необходимо определиться с предполагаемым конечным результатом [1, 2]. Например, при твердотельном моделировании стратегия создания электронных трехмерных геометрических моделей деталей имеет следующий вид:

- 1) разбиение детали на элементы, из которых может состоять модель детали;
- 2) определение расположения элементов относительно основных рабочих плоскостей;
- 3) определение размеров для моделирования элементов модели детали;
- 4) выбор операций для построения элементов модели детали и определение контуров для каждого элемента;
- 5) определение последовательности построения элементов модели детали и количества используемых тел.

При создании «быстрых» редактируемых моделей используются геометрические, топологические, размерные ограничения [3], позволяющие выполнить основное требование к электронным геометрическим моделям деталей: изменение значения одной или нескольких размерных зависимостей должно приводить к предсказуемым изменениям геометрической формы электронной геометрической модели детали.

При проектировании в САПР выполняются требования следующих стандартов Единой системы конструкторской документации (ЕСКД): ГОСТ 2.051—2006 «Электронные документы. Общие положения», ГОСТ 2.052—2006 «Электронная модель изделия. Общие положения», ГОСТ 2.053—2006 «Электронная структура изделия. Общие положения».

Перед моделированием необходимо собрать и проанализировать исходные данные геометрии детали, например:

- комплекты документации;
- комплекты электронной документации;
- реально существующие образцы.

При определении элементов модели детали, любую деталь можно представить в виде геометрической суммы различных тел и поверхностей. Задача сводится к разбиению детали на элементы, из которых может состоять модель детали.

Согласно ГОСТ 2.052—2006 начальная ориентация электронной модели изделия в модельном пространстве не оговаривается. Начальное положение модели может быть любое, но от выбора этого положения зависит расположение элементов модели относительно основных рабочих плоскостей.

Размеры для моделирования элементов модели детали считываются с исходных данных.

Этапы построения контура элемента детали:

- разбиение контура на примитивы, из которых может состоять контур;
- определение размеров для моделирования примитивов контура;
- выбор начального примитива и его расположения на рабочей плоскости для построения контура;
- определение последовательности построения примитивов контура;
- определение геометрических и размерных зависимостей для каждого примитива контура.

В качестве операций для моделирования элементов деталей могут использоваться как базовые операции, так и конструкционные.

Базовыми операциями (выдавливание, вращение, лофт (по сечениям), сдвиг) создаются простые тела. Возможности базовых операций:

- перемещение контура без искажений по траектории, перпендикулярной рабочей плоскости;
- перемещение контура без искажений по траектории, не перпендикулярной рабочей плоскости;
- перемещение контура с искажением по траектории, перпендикулярной рабочей плоскости;
- перемещение контура с искажением по траектории, не перпендикулярной рабочей плоскости.

Критерием выбора базовой операции является наименьший пересчет размеров для моделирования при построении контуров элемента модели детали [2]. Так, прямой круговой конус можно построить базовыми операциями: выдавливание (если известны диаметр основания и угол при вершине), вращение (если известны радиус основания и высота или длина образующей) лофт (если известны диаметр основания и высота).

К конструкционным операциям относятся следующие операции: отверстие, оболочка, резьба, ребро жесткости, пружина, сопряжение, фаска. Выбор операции определяется конструкционным назначением элемента.

Критерием выбора базовой и конструкционной операций также может служить наименьшее количество контуров для построения элемента модели детали.

Построенную электронную геометрическую модель детали необходимо проверить. Так, при построении «быстрых» редактируемых моделей необходимо выполнить проверку на отсутствие степеней свободы элементов детали.

Предложенная стратегия создания электронных геометрических моделей деталей применима для работы в любом пакете САПР. Придерживаясь этой стратегии

можно создавать модели деталей любой сложности. Отличие состоит только в количестве элементов.

Современные пакеты САПР позволяют выполнять конструкторскую и текстовую документацию в автоматическом режиме, но при этом требуется настройка под ЕСКД. При проектировании сборочных единиц необходимо, чтобы все модели создавались в едином проекте. Это обеспечивает однозначную взаимосвязь между моделями деталей сборочной единицы, а также возможность участия в проекте различных специалистов: конструкторов, технологов, дизайнеров, экономистов.

Использование САПР Autodesk Inventor расширяет возможности разработчиков [1]. Компании Autodesk принадлежит целая линейка продуктов: AutoCAD, Inventor, 3DSMax, Alias и т. д. Возможность экспорта моделей из приложения в приложение позволяет добиться лучшего эффекта при решении поставленных задач.

### Литература

- [1] Гузненков В.Н., Журбенко П.А. *Autodesk Inventor 2012. Трехмерное моделирование деталей и создание чертежей*. Москва, ДМК Пресс, 2012, 120 с.
- [2] Цибизова Т.Ю., Гузева Т.А. Системы автоматического управления технологическими процессами отверждения изделий из полимерных композитов. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2015, № 5, с. 35–40.
- [3] Якунин В.И., Гузненков В.Н., Журбенко П.А. Геометрическое моделирование как междисциплинарный язык. *Дискуссия*, 2012, № 12 (30), с. 161–166.

УДК 658.5

## Рейтинговая оценка логистических организаций

© Комкова Анастасия Романовна, Ляхович Дмитрий Геннадьевич

Россия, г. Москва, московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[nastia.romanceva@mail.ru](mailto:nastia.romanceva@mail.ru)

*Рассмотрены причины необходимости определения рейтинга логистических организаций для различных пользователей — владельцы компании, конкуренты и потребители услуг. Описана методика определения рейтинга. Методики определения рейтинга, применяемые на данном этапе развития рынка логистических услуг, не в полной мере удовлетворяют потребителей услуг, поскольку не анализируют организацию с точки зрения качества предоставления услуг. Предложена методика, позволяющая всесторонне оценить каждого участника.*

**Ключевые слова:** рейтинг, логистические услуги, методика, качество услуг, оценка.

Экономические отношения логистических компаний с партнерами и клиентами строятся на добровольной основе, принципах взаимовыгодности, доверия и субъективного выбора. При этом все заинтересованные лица ставят перед собой цель —

определить ценность услуги, предоставляемой логистической организацией, а именно качество и безопасность. Основным инструментом анализа рынка логистических услуг является рейтинг.

В связи с тем, что данная отрасль стала активно развиваться не так давно, в настоящее время существует повышенный интерес к рейтинговым оценкам логистических компаний, позволяющим самим компаниям повысить свою известность на рынке, а клиентам определиться с выбором логистической компании, основываясь на независимой оценке качества оказываемых услуг, известности компании и ее репутации, конкурентоспособности, а также спектре оказываемых услуг. Кроме того, рейтинг способствует повышению прозрачности рынка логистических услуг, что стимулирует привлечение инвесторов в российский логистический сектор.

В связи с наличием конкуренции между логистическими организациями рейтинговые оценки позволяют компаниям, стремящимся работать долго и эффективно, изучать своих конкурентов и предлагаемые ими услуги в целях определения своего места на логистическом рынке, поиску возможностей для расширения клиентской базы и совершенствования или расширения спектра своих услуг, а также для разработки стратегии фирмы.

Рейтинг хозяйствующего субъекта — это его оценка по системе показателей, характеризующих важнейшие стороны хозяйственной деятельности организации с позиции различных пользователей информации, путем присвоения ранга, места, класса, группы, категории данной организации среди аналогичных хозяйствующих субъектов с целью оценки данного хозяйствующего субъекта как потенциального партнера в деловых отношениях [1].

В современной экономической системе рейтинги являются важным информационным средством, инструментом установления и поддержания деловых отношений в рамках хозяйственной деятельности, регулирования делового общения. Возникновение рейтингов обусловлено многообразием институтов мирового и регионального хозяйства, не только ростом числа субъектов хозяйствования и установлением связей между ними, необходимостью развития экономических отношений между странами, регионами, отраслями, секторами бизнеса.

В российской практике существует рейтинг «Логистический оператор России», осуществляющий независимую и объективную экспертную оценку уровня компании. В рамках рейтингов логистических компаний выделяют следующие рейтинги [2]:

- транспортно-экспедиторских компаний;
- складских операторов;
- логистических операторов по обслуживанию международных транспортных коридоров;
- логистических операторов по курьерским и экспресс-доставкам;
- мультимодальных транспортных операторов;
- поставщиков IT-решений и консалтинга.

Методика построения рейтинга по расчетным оценкам базируется на методах весовых коэффициентов и определении суммарного показателя на основе семи основных критериев.

После отбора критериев их значимость устанавливается экспертным путем. Итоговое значение рейтинга находится путем суммирования произведений значений (удельного веса) критерия на его экспертную бальную оценку. Сравнивая полученные значения рейтинга, определяют наилучшего партнера. Суммарный показатель для каждой компании определяется на основе следующих основных критериев [3]:

- уровень организации и управления компанией (наличие сертификата ISO, уровень информатизации компании);
- финансовый потенциал (динамика годового оборота, годового оборот на одного сотрудника компании, рентабельность);
- комплекс логистических услуг;
- техническая и технологическая оснащенность (наличие транспортного парка, погрузочно-разгрузочной техники, размеры складских помещений и динамика их роста);
- объемы работ и услуг (объем перевезенных в течение года грузов, грузооборот на складе, объемы экспедиторских и таможенных услуг и т. п.);
- имидж компании (стаж работы компании на российском рынке, число публикаций с информацией о компании, ее участие в общественных профессиональных организациях, наличие дипломов, лауреатских званий);
- наличие сети отделений и филиалов на территории России.

Однако в современных условиях в качестве основного критерия выбора следует выдвигать качество продукции и качество обслуживания.

Учитывая необходимость оценки работы логистических компаний потребителями данных услуг, было предложено составлять рейтинг на основании критериев, разделенных на четыре группы:

- 1) критерии потребительских предпочтений;
- 2) комплексность предоставляемых логистических услуг;
- 3) позиция компании на рынке;
- 4) удовлетворенность потребителей качеством предоставляемых услуг.

Общий рейтинг компании, учитывающий оценку по четырем вышеназванным критериям, рассчитывается по следующей формуле:

$$R = (D + L + P + S)/4,$$

где  $D$  — критерий потребительских предпочтений;  $L$  — критерий комплексности логистических услуг;  $P$  — критерий позиции компании на рынке;  $S$  — критерий удовлетворенности клиентов [3].

Расчет рейтинга осуществляется на основании оценки данных, предоставляемых компанией, экспертной оценки и потребительской оценки. Последняя осуществляется путем анкетирования потребителей услуг.

Критерий потребительских предпочтений основывается на перечне показателей, выбранных потребителями, с установленными для них весовыми коэффициентами.

Критерий комплексности логистических услуг базируется на данных, предоставленных самой компанией, об оказании ею определенного перечня услуг.

Критерий позиции компании на рынке основывается в том числе на таких показателях, как период работы компании на рынке, численность сотрудников, объем услуг в динамике.

Критерий удовлетворенности потребителей определяется на основании анкетных данных потребителей услуг, оценивающих качество работы логистической компании по определенному набору показателей.

Таким образом, потребитель услуг на основании данной методики получает всестороннюю оценку участников рынка логистических услуг и может выявить его преимущества и недостатки [4].

Для самой логистической организации рейтинг позволяет укрепить деловую репутацию предприятия, создать благоприятное отношение покупателей к нему и сформировать



ровать положительный имидж. Участие в рейтинге позволяет компаниям правильно позиционировать себя на рынке логистических услуг, выявить сильные и слабые стороны по отношению к конкурентам, получить новых партнеров для развития.

### Литература

- [1] Ковалев В.В., Волкова О.Н. *Анализ хозяйственной деятельности предприятия*. Москва, Проспект, 2010, 421 с.
- [2] URL: <http://www.logistics.ru/> (дата обращения 15.06.2015).
- [3] Белозерцева Н.П., Ярайкина М.С. Разработка методики оценки конкурентоспособности транспортно- экспедиторских компаний и логистических операторов. *Науковедение*, 2013, № 2, с. 1–7.
- [4] Антошкина А.В., Вершкова Е.М. *Практикум по логистике*. Томск, Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013, 130 с.

УДК 621.3

## Специализированное программное обеспечение автоматизированного проектирования электротехнических комплексов транспортных средств

© Низамов Рустем Айратович, Хайруллина Гузэль Салиховна,  
Шакирзянова Наиля Шарифовна

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный  
исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[5gotika@mail.ru](mailto:5gotika@mail.ru), [gdibaj@mail.ru](mailto:gdibaj@mail.ru), [nely51@mail.ru](mailto:nely51@mail.ru)

*Дано описание специализированного программного обеспечения автоматизированного проектирования электротехнических комплексов транспортных средств, состоящее из трех расчетных программ. Все три программы работают с единой базой проектных и справочных данных.*

**Ключевые слова:** *автоматизированное проектирование, транспортное средство, электротехнический комплекс, оптимизация.*

Специализированное программное обеспечение автоматизированного проектирования электротехнических комплексов транспортных средств состоит из трех расчетных программ.

Первая программа предназначена для расчетов и анализа режимов работы системы электроснабжения постоянного тока транспортных средств при проектировании, модификациях и модернизации системы электроснабжения.

При анализе исследуются нормальные и частичные режимы работы на различных этапах полета, аварийные режимы при отказах в системе генерирования (СГ), обрывах проводов первичной РС и коротких замыканий (КЗ) в сети.

Программа осуществляет:

- интерактивный ввод задания на анализ расчетной части сети;
- расчет и анализ нормальных и аварийных режимов работы сети;
- формирование сообщений о несоответствиях сети предъявляемым требованиям;
- формирование итоговой информации.

В ходе проведения анализа решаются следующие задачи:

- расчет токов на участках цепей и напряжений в узлах расчетной схемы для нормального и директивных режимов с учетом изменения токораспределения по этапам полета;

- расчет токов на участках цепей и напряжений в узлах расчетной схемы для режимов короткого замыкания;

- определение максимальных токов участков и минимальных напряжений узлов схемы для нормального и директивных режимов;

- проверка проводов по предельно допустимому току;

- сводный анализ результатов расчета нормального и директивных режимов;

- проверка по допустимому номинальному напряжению на зажимах потребителей;

- проверка правильности выбора аппаратов защиты (АЗ), установленных в первичных и вторичных сетях, по номинальному току;

- проверка защищаемости проводов аппаратами защиты;

- определение последовательности срабатывания АЗ в режимах КЗ и проверка селективности действия защиты;

- определение максимального, минимального и среднего времени отключения места КЗ от установившихся токов короткого замыкания с учетом технологического разброса времятоковых характеристик АЗ для проверки ограничения времени отключения места КЗ;

- проверка АЗ на устойчивость к токам короткого замыкания;

- проверка чувствительности АЗ.

Расчет токов на участках цепей и напряжений в узлах расчетной схемы для нормальных и директивных режимов с учетом изменения токораспределения по этапам полета и расчет токов на участках цепей и напряжений в узлах расчетной схемы для режимов короткого замыкания осуществляется методом узловых потенциалов.

Вторая программа предназначена для выбора АЗ, установленных в первичных и вторичных сетях систем электроснабжения транспортных средств.

Для первичной сети программа осуществляет проверку правильности выбора:

- АЗ по номиналу. Для этого проводится расчет нормального и директивных режимов;

- АЗ на возможность защиты ими проводов;

- АЗ на устойчивость к токам КЗ. Для этого выполняется расчет режима КЗ (установившийся и переходный режим) на выбранном АЗ.

Для вторичной сети программа осуществляет проверку:

- правильности выбора АЗ по номиналу

- правильности выбора АЗ на возможность защиты ими проводов;

- правильности выбора АЗ по номиналу для защиты электродвигательной нагрузки;

- правильности выбора АЗ на устойчивость к токам КЗ;

- чувствительности АЗ.

Проверка правильности выбора АЗ выполняется согласно методике, изложенной в [1].

---

Третья программа осуществляет оптимальный выбор сечений проводов первичных и вторичных сетей систем электроснабжения транспортных средств. Анализ правильности выбора сечений проводов проводится по трем параметрам:

- 1) допустимая токовая нагрузка провода данного сечения;
- 2) защищаемость провода данного сечения АЗ;
- 3) допустимое напряжение на контактах потребителей.

*Проверка по допустимой токовой нагрузке провода.* Проверяется выполнение условия

$$I_{\text{пр max}} < I_{\text{доп}},$$

где  $I_{\text{пр max}}$  — максимальный ток, протекающий по проводу, при нормальном и директивных режимах по всем этапам полета;  $I_{\text{доп}}$  — допустимый ток для данного сечения провода.

Если условие не выполняется, то дается рекомендация повысить сечение провода на большее ближайшее сечение.

*Проверка защищаемости провода данного сечения АЗ.* Для каждого соединения (провода), имеющего марку и сечение, необходимо выбрать АЗ, защищающий этот провод. При этом определяются исходные данные: марка, сечение провода  $S_{\text{пр}}$ , условия эксплуатации сети (температура, высота), тип, номинал АЗ  $I_{\text{ном АЗ}}$ .

Из справочной БД по марке провода, условиям эксплуатации, типу и номиналу АЗ определяется минимальное сечение провода  $S_{\text{min1}}$  — при защите АЗ провода во всем диапазоне токовых перегрузок и  $S_{\text{min2}}$  — при защите АЗ провода при  $I_{\text{КЗ}} > 2,5I_{\text{ном АЗ}}$ .

При условии  $S_{\text{пр}} \geq S_{\text{min1}}$  провод защищен во всем диапазоне токовых перегрузок. При условии  $S_{\text{пр}} \geq S_{\text{min2}}$  провод защищен при  $I_{\text{КЗ}} > 2,5I_{\text{ном АЗ}}$ . Иначе провод не защищен данным АЗ.

Если провод не защищен данным АЗ, дается рекомендация заменить сечение провода на  $S_{\text{min1}}$ , если провод должен быть защищен во всем диапазоне токовых перегрузок, или на  $S_{\text{min2}}$ , если провод должен быть защищен при  $I_{\text{КЗ}} > 2,5I_{\text{ном АЗ}}$ .

*Проверка по допустимому напряжению на контактах потребителей.*

1. Определяется перечень потребителей, напряжение на контактах которых меньше допустимого.

2. Для каждого из таких потребителей определяется АЗ, защищающий этот потребитель. Далее определяется путь от АЗ до этого потребителя, а затем перечень проводов, входящих в этот путь.

3. У ближайшего к потребителю провода заменить сечение на большее и рассчитать напряжение на контакте потребителя. При необходимости сделать два таких шага.

*Работа выполняется ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор прикладного научного исследования (проекта) RFMEFI57414X0050.*

## Литература

ОСТ 100195—76. *Аппараты защиты бортовых электрических сетей самолетов и вертолетов.* Москва, 1976.

УДК 621.45.01:004.942

## Сравнительный анализ автоматизированных систем проектирования газотурбинных двигателей

© Остапюк Ярослав Анатольевич, Ткаченко Андрей Юрьевич,  
Филинов Евгений Павлович, Кузьмичев Венедикт Степанович

Россия, г. Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

[oya92@mail.ru](mailto:oya92@mail.ru), [tau@ssau.ru](mailto:tau@ssau.ru), [filinov.evg@gmail.com](mailto:filinov.evg@gmail.com)

*Приведен обзор автоматизированных систем концептуального проектирования и инженерного анализа (CAE-систем) авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и наземных газотурбинных установок (ГТУ). Дано описание и сравнительный анализ функциональных возможностей и особенностей компьютерной реализации систем АСТРА, DVIG, EngineSim, GasTurb, GSP, Uni\_TTF. Указаны направления развития CAE-систем газотурбинных двигателей.*

**Ключевые слова:** система, проектирование, математическая модель, компьютерная модель, функциональные возможности, двигатель газотурбинный.

В настоящее время для концептуального проектирования и инженерного анализа авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) широко применяются различные автоматизированные системы проектирования (CAE-системы), которые можно разделить на две категории:

1) программные продукты, созданные на основе универсальных средств, такие как Dymola (основана на языке проектирования Modelica) [1], Simulink (интегрирован в среду MATLAB) [1, 2], TRANSEO (основана на среде MATLAB), PROOSIS (основан на системе EcosimPro) и др., которые позволяют решать достаточно большой круг инженерных задач;

2) специализированные программные продукты, такие как DCOGEN, DVIGwT [3], EngineSim, GasTurb [2], Graphical Engine Cycle Analysis Tool (GECAT), Gas turbine Simulation Program (GSP) [4], Numerical Propulsion System Simulation (NPSS) [1], TERA, Uni\_TTF, WebEngine, Автоматизированная Система Термогазодинамического Расчета и Анализа ГТД и ЭУ (АСТРА) [5–7] и др.

Отдельно следует выделить программы, разработанные в конструкторских бюро (КБ) двигателестроительных предприятий для использования в рамках задач этих КБ. Математические модели этих программ, как правило, максимально возможно учитывают особенности создаваемых фирмой двигателей и накопленный методический и экспериментальный опыт.

Необходимо отметить, что разработка универсального инструмента для решения комплексных задач концептуального проектирования ГТД с использованием многоуровневого и междисциплинарного подхода является весьма сложной задачей [8].

Подробно были рассмотрены следующие специализированные CAE-системы концептуального проектирования и анализа ГТД: АСТРА, DVIG, EngineSim, GasTurb, GSP, Uni\_TTF. Сравнение CAE-систем проводилось по двум направлениям:

1) уровень используемых математических моделей и функциональные возможности;

2) компьютерная реализация (удобство интерфейса, интеллектуализация и т. д.).

Все представленные САЕ-системы, используемые для инженерных расчетов, имеют примерно одинаковые функциональные возможности. Общим недостатком этих систем является отсутствие возможности адекватной оценки показателей шума двигателей на стадии концептуального проектирования. Разработка математической модели оценки шума двигателей применительно к этой стадии проектирования является актуальной и важной задачей, поскольку ограничения по шуму существенно влияют на выбор оптимальных параметров рабочего процесса ГТД. В настоящее время к разрабатываемым двигателям предъявляются все более жесткие требования по экологическим характеристикам. Использование математических моделей шума и эмиссии при оптимизации параметров двигателей позволят получать более адекватные результаты.

Важное направление совершенствования моделей для концептуального проектирования ГТД — разработка многоуровневых одно-двух-трехмерных взаимосвязанных моделей для их применения на последовательно развивающихся стадиях оптимизации проекта.

Другим актуальным направлением совершенствования САЕ-систем ГТД является создание гибридных экспертных систем проектирования и анализа, которые будут включать в себя не только математические модели, но и логико-лингвистические модели представления накопленных знаний. Причем эти модели должны быть ориентированы на разработку перспективных двигателей следующих поколений.

#### Литература

- [1] Gomes K.J., Masiulaniec K.C., Afjeh A.A. Performance, usage, and turbofan transient simulation comparisons between three commercial simulation tools. *Journal of Aircraft*, 2009, vol. 46, iss. 2, pp. 699–704.
- [2] Kong C., Roh H., Lim K. Steady-state and transient simulation of turboprop engine using SIMULINK model. *ASME Turbo Expo*, 2003, vol. 3, pp. 151–161.
- [3] Горюнов И.М. Термогазодинамические расчеты ГТД и теплоэнергетических установок с использованием системы DVIGwT. *Вестник Уфимского гос. авиац. техн. ун-а*, 2006, т. 7, № 1, с. 61–70.
- [4] Sankar B., Subramanian T., Shah B., Vanam V., Jana S., Ramamurthy S., Satpathy R., Sahoo B., Yadav S. Aero-thermodynamic modelling and gas path simulation for a twin spool turbo jet engine. *ASME Gas Turbine India Conference*, 2013.
- [5] Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н., Крупенич И.Н., Кулагин В.В. Методы и средства концептуального проектирования авиационных ГТД в САЕ-системе «АСТРА». *Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та*, 2012, № 5 (36), ч. 1, с. 169–173.
- [6] Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н. Моделирование неустановившихся режимов работы газотурбинного двигателя в САЕ-системе «АСТРА». *Проблемы и перспективы развития двигателестроения: матер. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 25–27 июня 2014 г.*, Самара: СГАУ, 2014, ч. 1, с. 240.
- [7] Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Крупенич И.Н., Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н. Формирование виртуальной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя в САЕ системе «АСТРА». *Труды МАИ*, 2013, № 67, с. 15. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41518> (дата обращения 15.06.2015).
- [8] Carlos S., Madhavan K., Gupta G., Keese D., Maheshwaraa U., Seepersad C.C. Development and application of a flexibility-based method for multi-scale design. *Collection of Technical Papers — 11<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, 2006, vol. 3, pp. 1855–1870.

УДК 621.791

## **Автоматизированное проектирование технологического процесса изготовления металлокерамических узлов аэрокосмического производства**

© Пономарев Сергей Иванович, Ереско Сергей Павлович,  
Ереско Татьяна Трофимовна

Россия, г. Красноярск, Сибирский государственный аэрокосмический университет  
имени академика М.Ф. Решетнева

[Serg\\_ponom@mail.ru](mailto:Serg_ponom@mail.ru), [eresko07@mail.ru](mailto:eresko07@mail.ru), [ereskott@mail.ru](mailto:ereskott@mail.ru)

*Современный уровень развития информационных технологий позволяет создавать и реализовывать качественно новые подходы к проектированию, направленные на разработку систем автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов, учитывающих особенности производства деталей и узлов аэрокосмического производства. Основная часть информационного обеспечения САПР — банк данных, представляющий собой совокупность средств для централизованного накопления и коллективного использования данных в САПР. Банк данных состоит из базы данных и системы управления базой данных. Предлагаемый способ компьютерного управления технологическими процессами изготовления металлокерамических деталей и узлов значительно упрощает организационные работы и сокращает время подготовки производства при одновременном повышении качества изготовления металлокерамических узлов аэрокосмической техники.*

**Ключевые слова:** *автоматизированное компьютерное проектирование и управление технологическими процессами, алгоритм построения технологического процесса, разработка систем автоматизированного проектирования, банк данных.*

При создании аэрокосмической техники все большее внимание уделяется использованию достижений в области информационных технологий. Особую значимость при решении проблем повышения качества изготовления деталей машин и приборов, сокращения сроков и издержек аэрокосмического производства имеют информационные технологии. Задачи снижения трудоемкости и сроков проектирования, уменьшения себестоимости изготовления деталей и узлов, объема проектной документации и повышения качества производства позволяют решить новейшие подходы в области автоматизированного проектирования технологических процессов.

Современный уровень развития информационных технологий способствует созданию и реализации качественно новых подходов к проектированию, направленных на разработку систем автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов, учитывающих особенности производства деталей и узлов аэрокосмического производства. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов в первую очередь предназначены для сокращения перехода от технологической подготовки производства к реализации технологического процесса изготовления деталей и узлов. Информационное обеспечение САПР объединяет всевозможные данные, необходимые для выполнения автоматизированного проектирования. Данные могут

быть представлены в различного вида документах на разных носителях, содержащих сведения справочного характера о материалах, комплектующих изделиях, типовых проектных решениях, параметрах элементов, сведения о состоянии текущих разработок в виде промежуточных и окончательных проектных решений, структур и параметров проектируемых объектов и т. п. Основная часть информационного обеспечения САПР — банк данных (БД), представляющий собой совокупность средств для централизованного накопления и коллективного использования данных в САПР. Банк данных состоит из базы данных и системы управления базой данных.

В Сибирском государственном аэрокосмическом университете ведутся исследования по изготовлению металлокерамических узлов аэрокосмического производства, разработки методов эффективной организации и ведения специализированного информационного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами, включая базы данных и методы их оптимизации.

При создании системы автоматического проектирования технологии изготовления металлокерамических узлов был разработан алгоритм для проведения анализа данных информационного массива и поиска параметров в созданном массиве. Для этого были решены следующие задачи:

- разработана структура таблиц базы данных;
- произведено наполнение таблиц базы данных;
- разработан алгоритм реализации поиска и вывода результатов в виде отчетов по запросам пользователя (рис. 1).

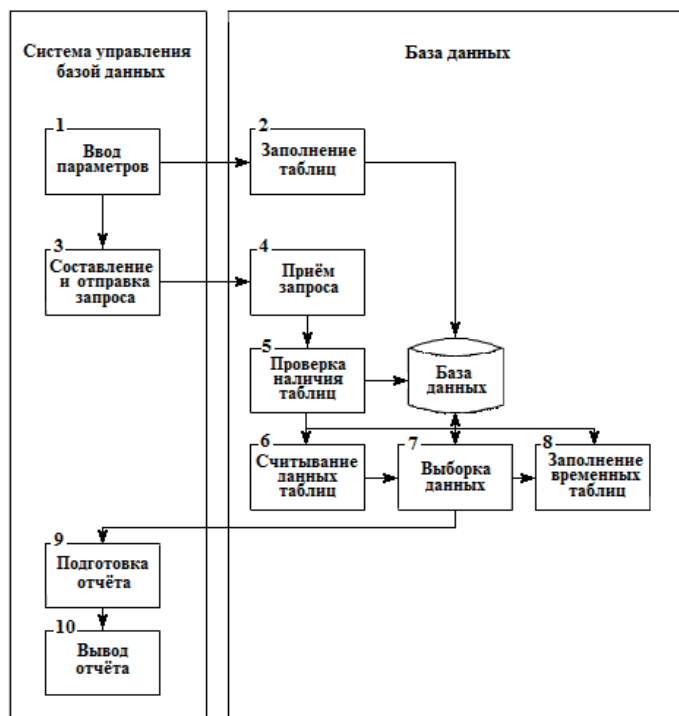


Рис. 1. Алгоритм реализации поиска и вывода результатов в виде отчетов по запросам пользователя

При проектировании технологических процессов создания системы поддержки принятия решений спроектирована и сформирована атрибутивная база данных существующих режимов диффузионной сварки разнородных материалов с керамикой и между собой [1].

Проведен патентно-технический обзор, на основании которого создана база данных существующего технологического оборудования — установок диффузионной сварки материалов [1, 2].

Составленная методика САПР технологических процессов изготовления деталей и узлов опробована при разработке технологии изготовления металлокерамического узла — ротора турбины турбонасосного агрегата.

Таким образом, при проведении исследований [3–9]:

- отработана технология получения неразъемных соединений на образцах-имитаторах;
- спроектирована установка для отработки технологии изготовления металлокерамического соединения на образцах-имитаторах;
- проведена оптимизация технологии методом математического моделирования;
- составлено уравнение регрессии, показывающее влияние параметров сварки на качество соединения;
- исследована структура зоны контакта поверхностей полученного соединения;
- спроектированы приспособления для изготовления металлокерамических узлов — ротора турбины и корпуса оптического преобразователя лазерного излучения (рис. 2).



Рис. 2. Корпус оптического преобразователя лазерного излучения

Полученные результаты исследований защищены патентами РФ [10, 11].

В настоящее время в Сибирском государственном аэрокосмическом университете ведутся исследования по получению металлокерамических соединений, используемых при изготовлении других узлов, применяемых в аэрокосмическом производстве.

## Литература

- [1] Пономарев С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. *Атрибутивная база данных для создания технологических процессов получения деталей аэрокосмического производства диффузионной сваркой*. А.с. № 2013621572, опублик. 20.01.2014, бюл. № 1.
- [2] Пономарев С.И., Ручкин Л.В., Ручкина Н.Л., *Атрибутивная база данных технологического оборудования, инструмента и приспособлений для механической обработки деталей аэрокосмического производства*. А.с. № 2014620691, опублик. 20.06.2014, бюл. № 6.



- [3] Пономарев С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Совершенствование технологии изготовления узлов аэрокосмического производства. Вестник СибГАУ, 2014, вып. 3 (55), с. 114–120.
- [4] Пономарев С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Совершенствование технологии изготовления металлокерамических узлов авиационной техники. Матер. IX Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы авиации и космонавтики». Т. 1. Технические науки. Информационные технологии. Красноярск, СибГАУ, 2013, с. 165–166.
- [5] Пономарев С.И., Ереско С.П. Получение газовых турбин диффузионной сваркой. Матер. Рос. акад. наук «XXXVII Академические чтения по космонавтике». Секция 19 Производство ракетно-космической техники, Москва, РАН, 2013, с. 29–30.
- [6] Пономарев С.И., Ереско С.П. Управление автоматизированным оборудованием диффузионной сварки. Матер. 16-й Междунар. конф. «Решетневские чтения», Красноярск, СибГАУ, 2012, с. 265–266.
- [7] Пономарев С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Методология экспериментальных исследований получения неразъемных металлокерамических узлов диффузионной сваркой. Механики XXI века. XII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: Сб. докл. Братск, ГОУ ВПО «БрГУ», 2013, с. 153–154.
- [8] Пономарев С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Построение алгоритма решения задач оснащения технологического процесса изготовления узлов аэрокосмического производства. Системы. Методы. Технологии, 2014, № 4 (24), с. 27–32.
- [9] Пономарев С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Автоматизация технологии механической обработки поверхностей свариваемых деталей. Машиностроение: сетевой электронный научный журнал, 2015, т. 3, № 1, с. 58–61.
- [10] Пономарев С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Установка для получения металлокерамических изделий. Пат. РФ № 93722, опубл. 10.05.2010, бюл. № 13.
- [11] Пономарев С.И., Прокопьев С.В., Ереско С.П., Ереско Т.Т. Способ соединения жаропрочного сплава на кобальтовой основе с керамикой на основе нитрида кремния. Пат. РФ № 2433026 2011, опубл. 10.11.2011, бюл. № 31.

УДК 004.65

## Автоматизированная база данных для микрофинансовой организации

© Слепцова Ксения Александровна, Кузовлев Вячеслав Иванович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

[ksleptsova@gmail.com](mailto:ksleptsova@gmail.com)

*Описано создание автоматизированной базы данных, объединяющей сотрудников компании, работающих в головном офисе и на местах, объединенными в единую внутрикорпоративную сеть. Предложена автоматизированная система, пополняемая с помощью данных, которые находятся во внутрикорпоративной общей базе головного офиса, с помощью данных, заполняемых клиентом на сайте компании, а также путем внесения информации менеджером в офисах.*

**Ключевые слова:** база данных, внутрикорпоративная сеть, организационная структура, автоматизированная система управления.

В современных условиях большинство организаций имеют внутрикорпоративные системы управления, однако они могут значительно отличаться в зависимости от направления деятельности предприятия, ее целей, задач, предметной области, финансового оборота и т. д.

Организационная структура системы управления современными организациями должна оптимизировать производственные и технологические процессы, повышать эффективность функционирования предприятия и конкурентоспособность организации [1]. Причем автоматизированная система учета данных предприятия должна представлять собой совокупность получаемой и предоставляемой информации, математических моделей, технических, программных, технологических средств, предназначенных для обработки информации. Использование автоматизированных информационных систем позволяет: оптимизировать планы работы, быстро вырабатывать решения, четко маневрировать информационными, материальными, финансовыми и другими ресурсами предприятия [2]. Вся обработка информации является объектом автоматизации с применением современных средств и способов связи, вычислительной техники и программного обеспечения.

В процессе управления предприятием одной из основных задач является сбор информации, ее обработка и передача персоналу и клиентам, поэтому программный продукт должен быть оснащен интерфейсом, удобным для ввода данных, визуального восприятия данных в базовой таблице, возможностью поиска документов по неполным данным, наглядным информированием об изменениях в документах, поставленных на контроль, а также обеспечивать связь между работниками компании из разных офисов и филиалов, объединенных во внутрикорпоративную сеть, предоставляя единую точку входа ко всем материалам в условиях территориальной распределенности [2].

Например, структура средней микрофинансовой организации (МФО) представляет собой центральный офис и офисы, расположенные в разных городах России, служащие для выдачи средств клиентам организации.

Управление данными должно осуществляться из головного офиса, а на местах менеджеры по работе с клиентами должны иметь собственную базу, в которую они могут вносить информацию (иметь возможность локального использования данных и передавать информацию в главный офис в общую базу данных) и получать информацию (от головного офиса и других офисов на местах).

Предлагается метод оптимизации результатов профилирования за счет учета взаимосвязей результирующих объектов как внутри одного класса, так и между несколькими классами. Оптимизация результатов профилирования заключается в повышении эффективности улучшения качества информации в системе во время ее эксплуатации [3]. Данный метод позволит создать автоматизированную систему обработки информации с базой данных, которая будет пополняться с помощью данных, находящихся во внутрикорпоративной общей базе головного офиса, данных, которые клиент будет заполнять на сайте компании, а также данных, вносимых менеджерами в офисах.

Кроме того, в базе данных следует предусмотреть все поля, по которым менеджер и скоринговая система смогут определить возможность предоставления займа данному потенциальному клиенту. Также база должна иметь систему защиты информации, систему проверки на дубликацию, систему автоматической рассылки уведомлений клиентам об одобрении или отказе.

В результате в МФО кроме общей системы автоматизированного управления, которая действует на основе законодательных нормативно-правовых актов и в их

пределах, создана собственная внутрикорпоративная сеть автоматизированной системы учета данных, предназначенная для накопления, хранения, актуализации и обработки систематизированной информации в соответствующей предметной области с предоставлением требуемой информации по запросам пользователей, в том числе о заказчиках для формирования клиентской базы.

#### Литература

- [1] Цибизова Т.Ю., Неусыпин К.А. Некоторые аспекты реструктуризации системы управления современными учебно-научными центрами. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 1, с. 30–34.
- [2] Цибизова Т.Ю., Слепцова К.А. Автоматизированная система учета данных внутрикорпоративной сети управления информацией. *Современные проблемы науки и образования*, 2015, № 1. URL: <http://www.science-education.ru/121-19593> (дата обращения 07.06.2015).
- [3] Кузовлев В.И., Орлов А.О. Учет взаимосвязей между объектами результатов профилирования. *Инженерный вестник*, 2012, № 8, с. 10.

УДК 621.3

## Логическая схема процесса проектирования электротехнических комплексов транспортных средств

© Федоров Евгений Юрьевич, Терещук Валерий Степанович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[zhenek\\_fed@mail.ru](mailto:zhenek_fed@mail.ru), [vter@inbox.ru](mailto:vter@inbox.ru)

*Рассмотрено создание алгоритмов оптимизации электротехнических комплексов; разработка специализированного программного обеспечения; создание эффективного метода автоматизированного проектирования электротехнических комплексов транспортных средств.*

**Ключевые слова:** *автоматизированное проектирование, транспортное средство, электротехнический комплекс, оптимизация.*

Во всем мире в современном машиностроении наблюдается тенденция обеспечения тесной взаимосвязи процессов проектирования, производства, маркетинга и эксплуатации транспортного средства в целом и составляющих его систем. Следовательно, проектирование электрических систем моделей транспортных средств неотрывно как от разработки других систем той же модели, так и от последующей технологической подготовки производства и эксплуатации. Поэтому современные САПР электрических систем транспортных средств, включающие подсистемы CAD, CAE, должны интегрироваться в САМ-системы и вписываться в общий процесс документального сопровождения жизненного цикла при использовании CALS-технологий [1].

При этом требования интеграции проектного процесса в CALS-систему при разработке САПР электрических систем транспортного средства усложняются такими факторами, как интенсивная инновация моделей, модификаций и комплекций транспортных средств; рост требований к качеству проектных документов и их соответствию международным стандартам и нормативам; развитие и усложнение структур электрических систем, усложнение принятия оптимальных решений, увеличение номенклатур и усложнение чертежей.

Для реализации САПР электрических систем транспортных средств требуется эффективный программный инструмент, позволяющий при минимуме кадровых ресурсов и сокращении сроков разработки обеспечить требуемое качество и конкурентноспособность проекта. Кроме того САПР электрических систем является многопользовательской системой, т. е. для организации процесса проектирования, реализуемого параллельно несколькими конструкторами, требуется четкое информационное взаимодействие между ними и решаемыми ими задачами.

Задача организации проектного процесса в многопользовательской системе требует оптимального структурирования процесса и определения логических связей между решаемыми проектными задачами. Последовательность автоматизированного проектирования, отражающая структуру проектного процесса электрических систем транспортных средств с учетом отмеченных факторов приведена ниже. Последовательность составлена на основе анализа процесса проектирования электрических систем транспортных средств разных типов, обобщения опыта научно-исследовательских работ [2, 3] и практики разработки программных систем в смежных отраслях промышленности.

Последовательность включает в себя следующие модули:

1) *формирование модели монтажного пространства (ММП) транспортного средства*. Описание зон возможного размещения элементов электрооборудования и жгутов с учетом конструкции транспортного средства;

2) *принципиальная электрическая схема*. Вносит в проект информацию об электрических связях элементов электрооборудования;

3) *оптимальное размещение элементов электрооборудования с учетом ограничений, задаваемых ММП транспортного средства*;

4) *формирование матрицы кратчайших расстояний* между элементами электрооборудования с учетом ограничений, задаваемых ММП транспортного средства;

5) *формирование модели монтажных жгутов (ММЖ)*. Описание возможных вариантов прокладки жгутов с учетом ограничений, задаваемых ММЖ транспортного средства;

6) *разводка электрических цепей*. Разработка оптимальной разводки электрической цепи исходя из минимума массы проводных соединений с учетом ограничений на число подключаемых проводов к клеммам элементов;

7) *разработка схемы электрических соединений*. Включает в себя разработку эскиза схемы электрических соединений, внесение изменений по результатам разводки;

8) *распределение проводов по клеммам элементов*. Осуществляется с учетом ограничений, например, разделение силовых цепей с цепями управления;

9) *выпуск схемы электрических соединений и отчетов*;

10) *формирование конструкции жгута*. Осуществляется по ММЖ прокладки жгутов с учетом технологических ограничений на формирование жгута;

11) *определение длин участков жгута*. По сформированной конструкции жгута определяется длина участков жгута;

12) *уточненный расчет длин проводов с учетом технологических припусков;*  
13) *формирование расчетных режимов работы магистрали.* Формирование расчетной схемы магистрали с учетом многорежимности работы потребителей (программа разрабатывается КНИТУ — КАИ);

14) *формирование расчетной схемы фидеров* для определения сечений проводов и анализа режима работы фидера (программа разрабатывается КНИТУ — КАИ);

15) *расчет аппаратов защиты* (программа разрабатывается КНИТУ — КАИ);

16) *расчет сечений проводов фидеров* (программа разрабатывается КНИТУ — КАИ);

17) *расчет сечений проводов магистрали.* Требования и критерий оптимальности должны соответствовать расчету сечений проводов фидеров (программа разрабатывается КНИТУ — КАИ).

18) *анализ режимов работы расчетной схемы фидера.* Проводится с целью проверки обеспечения требуемого качества электроснабжения потребителей и защиты системы при коротких замыканиях.

19) *анализ режимов работы магистрали.* Выполняется с целью проверки обеспечения требуемого качества электроснабжения потребителей с учетом многорежимности их функционирования (программа разрабатывается КНИТУ — КАИ);

20) *расчет и выбор элементов конструкции жгута;*

21) *выпуск чертежа жгута, таблиц проводов;*

22) *получение выборок из выходных таблиц жгута;*

23) *выпуск спецификации жгута.* Перечень элементов, входящих в конструкцию жгута;

24) *конструирование установок жгута.* Конструирование элементов крепления жгута к конструкции транспортного средства;

25) *выпуск чертежа установки жгута;*

26) *выпуск спецификации установки жгута.*

В последовательности выделяют два блока: инвариантный и настраиваемый. Инвариантный блок мало зависит от особенностей проектирования различных транспортных средств, и включает в себя:

- ряд операций по проектированию схемы электрических соединений и формированию конструкции жгута (операции 1–13);
- расчетные программы по определению сечений, выбору аппаратов защиты и анализу режимов работы (операции 14–20).

Инвариантный блок можно рассматривать как базовую часть, которая выполняется с помощью таких САПР, как E<sup>3</sup>.Series и Siemens NX и требует сравнительно небольшой настройки на проектный процесс конкретного транспортного средства.

Настраиваемый блок включает в себя расчет и выбор элементов конструкции жгута, выпуск чертежа жгута, таблиц проводов, спецификации жгута, конструирование установок жгута, выпуск чертежа установки и спецификации, различные выборки из выходных таблиц. Настраиваемый блок значительно учитывает специфику конкретного транспортного средства и требует отдельных исследований и разработок.

Анализ этой последовательности показывает, что операции 1–3, 7, 9–11, 22, 25, 26 могут быть реализованы с помощью существующих САПР. Операции 4–6, 8, 12–21, 23, 24, 27 разрабатываются и адаптируются к проектному процессу кафедрой электрооборудования КНИТУ — КАИ.

Составными структурными частями САПР электрических систем, отражающие задачи проектирования, являются следующие модули: компоновка конструктивных узлов, размещение конструктивных узлов, разводка электрических цепей межблочного монтажа, формирование жгутов межблочного монтажа, трассировка жгутов, анализ

режимов работы системы распределения электрической энергии, выбор аппаратов защиты, оптимизация сечений проводов, расчет баланса электрической энергии.

К настоящему времени разработано специализированное программное обеспечение в виде следующих модулей: «Анализ режимов работы системы электроснабжения», «Выбор аппаратов защиты», «Оптимизация сечений проводов».

Модуль «Анализ режимов работы системы электроснабжения» обеспечивает анализ режимов работы электрической сети транспортного средства с целью проверки обеспечения требуемого качества электроснабжения потребителей и защиты сети от коротких замыканий. В ходе проведения анализа решаются следующие задачи: расчет токов на участках цепей питания и напряжений в узлах расчетной схемы для нормальных режимов с учетом изменения токораспределения по режимам потребления; определение максимальных токов участков и минимальных напряжений узлов схемы; расчет силы тока цепи короткого замыкания; проверка проводов по допустимому току и защищаемости предохранителем; проверка по допустимому номинальному напряжению на зажимах потребителей; проверка правильности выбора предохранителя по номинальному току; определение максимального времени отключения места короткого замыкания предохранителем при минимальном токе короткого замыкания; проверка правильности выбора предохранителя при перегрузках в случае электродвигательных нагрузок; проверка чувствительности предохранителя.

Модуль «Выбор аппаратов защиты» обеспечивает: расчет номинального тока аппарата защиты при максимальной рабочей силе тока нагрузки потребителей с учетом: характера токовой нагрузки потребителей; многорежимности работы фидеров; типовых режимов работы потребителей; расчет максимального времени срабатывания аппарата защиты; проверка аппаратов защиты по условиям: соответствия номинала токовым нагрузкам для всех расчетных режимов работы фидера; защищаемости проводов всех сечений фидера в нормальном режиме и аварийных режимах; чувствительности аппарата защиты.

Модуль «Оптимизация сечений проводов» обеспечивает расчет токов участков расчетной схемы для всех расчетных режимов; расчет минимальных сечений проводов участков по допустимому току, аппаратам защиты и условиям механической прочности; оптимизация сечений проводов по выбранному критерию и ограничениям по допустимым величинам напряжений с учетом многорежимности работы.

Модули САПР электрических систем представляют собой выделенные по некоторым признакам части САПР, обеспечивающие получение законченных проектных решений и соответствующих проектных документов. Структурное объединение модулей в систему проводится с помощью специальных связей между компонентами САПР.

Внедрение в промышленную эксплуатацию данной методики и разработанного программного обеспечения позволило значительно сократить время расчетов и трудоемкость при проектировании электрических систем, повысить надежность расчетов благодаря устранению механических ошибок неавтоматизированного проектирования, оперативно вносить изменения в документы, освободить инженеров от рутинной работы. Таким образом достигнут определенный экономический эффект, который обеспечивается сокращением сроков проектирования на 8...12 %.

*Работа выполняется ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор прикладного научного исследования (проекта) RFMEFI57414X0050.*

Литература

- [1] Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М., Никифоров А.Д. *Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения: принципы, системы и технологии САЛС/ИППИ*. Москва, Академия, 2007, 304 с.
2. Федоров Е.Ю., Терещук В.С., Цой А.А. Программный инструмент оптимального синтеза электрожгутов системы электроснабжения грузового автомобиля. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2012, № 4, вып. 2, с. 154–156.
3. Федоров Е.Ю., Терещук В.С. Автоматизированная трассировка жгутов и проводов грузового автомобиля. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2013, № 3, с. 60–64.
4. Федоров Е.Ю., Терещук В.С., Ференец А.В. Особенности разводки сложных электрических цепей летательных аппаратов. *Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности: Междунар. науч.-практ. конф. Казань, 5–8 августа 2014 г.: сб. докл. Том IV*. Казань, Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014, 228 с.

УДК 621.396

## Проблемы использования фильтра Калмана в промышленных контроллерах

© Шитик Андрей Михайлович, Другак Алексей Викторович,  
Якута Екатерина Александровна, Гринюк Дмитрий Анатольевич

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный  
технологический университет

[andres1902@mail.ru](mailto:andres1902@mail.ru), [drug-ak47@mail.ru](mailto:drug-ak47@mail.ru), [londonrain-girl@mail.ru](mailto:londonrain-girl@mail.ru), [hryniuk@tut.by](mailto:hryniuk@tut.by)

*Рассмотрены вопросы применения и теоретических положений теории управления и алгоритмов Калмана в прикладных задачах автоматизации. Одной из проблем, возникающих при использовании идентификации, может быть прохождение измерительной информации через цифровые цепи программируемых логических контроллеров. Выполнена оценка погрешности в определении производных вследствие наличия ограничений в разрядности входных модулей программируемых логических контроллеров (ПЛК).*

**Ключевые слова:** Фильтр Калмана, программируемые логические контроллеры, ПЛК, погрешность.

Фильтр Калмана предназначен для рекурсивного до оценивания вектора состояния априорно известной динамической системы. Для расчета текущего состояния системы необходимо знать текущее измерение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Таким образом, фильтр Калмана, подобно другим рекурсивным фильтрам, реализован во временном, а не в частотном представлении, но в отличие от других подобных фильтров фильтр Калмана оперирует не только оценками состояния, но и оценками неопределенности (плотности распределения) вектора состояния, опираясь на формулу Байеса условной вероятности [1–3]. В то же время существует проблема применимости теоретического алгоритма в прикладных условиях [4].

Алгоритм работает в два этапа. На этапе прогнозирования фильтр Калмана экстраполирует значения переменных состояния, а также их неопределенности. На втором этапе, по данным измерения, полученного с некоторой погрешностью, результат экстраполяции уточняется. Благодаря пошаговой природе алгоритма алгоритм может в реальном времени отслеживать состояние объекта.



Рассмотрим формулировку задачи фильтрации случайного процесса с известными динамическими свойствами, для решения которой фильтр Калмана изначально предназначен. Цель фильтра Калмана — минимизировать дисперсию оценки векторного случайного процесса  $x(k)$ , изменяющегося во времени следующим образом:

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + v(k),$$

где  $\Phi(k)$  — матрица перехода;  $v(k)$  — случайный вектор (шум процесса), имеющий нормальное распределение с корреляционной матрицей  $Q_p(k)$ .

Для наблюдения доступен линейно преобразованный процесс  $y(k)$ , к которому добавляется шум наблюдения:

$$y(k) = H(k)x(k) + w(k),$$

где  $H(k)$  — матрица наблюдения;  $w(k)$  — шум наблюдения, представляющий собой случайный вектор, имеющий нормальное распределение с корреляционной матрицей  $Q_M(k)$ .

Все способы использования адаптивных фильтров так или иначе сводятся к решению задачи идентификации, т. е. определения характеристик некоторой системы. Возможны два варианта идентификации: прямая и обратная.

В первом случае адаптивный фильтр включается параллельно с исследуемой системой (рис. 1, а). Входной сигнал является общим для исследуемой системы и адаптивного фильтра, а выходной сигнал системы служит для адаптивного фильтра образцовым сигналом. В процессе адаптации временные и частотные характеристики фильтра будут стремиться к соответствующим характеристикам исследуемой системы.

При обратной идентификации адаптивный фильтр включается последовательно с исследуемой системой (рис. 1, б). Выходной сигнал системы поступает на вход адаптивного фильтра, а входной сигнал системы является образцом для адаптивного фильтра. Таким образом, фильтр стремится компенсировать влияние системы и восстановить исходный сигнал, устранив внесенные системой искажения.

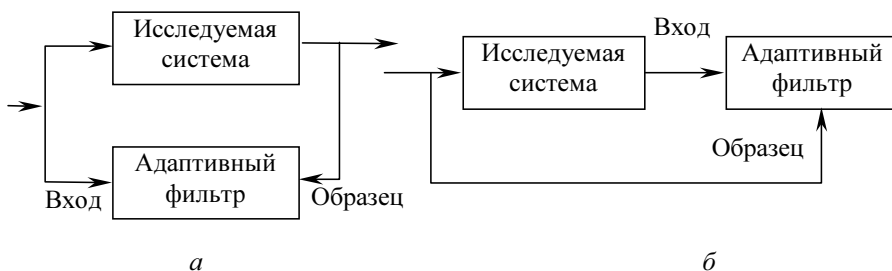


Рис. 1. Идентификация систем с помощью адаптивного фильтра:  
а — прямая; б — обратная

В настоящий момент основная критика фильтра Калмана ведется по следующим направлениям:

1) в фильтре Калмана погрешности представлены белым шумом, которого на самом деле в природе не существует;

2) нет соответствия необходимому и достаточному условию оптимальности. Ошибка в выводе фильтра Калмана — требуются противоречивые условия верности разных уравнений алгоритма: в одних, чтобы  $\tau < t$ , и в других —  $\tau = t$ .

Существенные проблемы для фильтра Калмана возникают от нелинейных искажений входных и выходных цепей. Регулирование технологических параметров на сегодняшний день выполняется программируемыми логическими контроллерами (PLC). Заявленная разрядность ADC и DAC находится в диапазоне 10–12 разрядов. Эффективная же разрядность еще ниже, поскольку определенная часть динамического диапазона модулей контроллера используется для компенсации потенциальных смещений каналов и диагностики.

Дискретизация аналоговых каналов в первую очередь влияет на адекватность вычисления производных. Для оценки вероятности ошибки вычисления производных было смоделирована ситуация работы объекта регулирования при разных значениях младшего разряда и оценена погрешность вычисления.

Моделирование проводилось путем создания модели (рис. 2) в Simulink в MatLab и состояло из параллельных трех замкнутых контуров регулирования. Один был чисто аналоговым контуром с ПИД-регулятором трехемкостного объекта с подмешанным случайным процессом. Кроме этого в обратной связи использовалось апериодическое звено в обратной связи. Настройки регулятора были подобраны по модифицированному интегральному критерию. Во втором варианте аналоговый ПИД-регулятор был заменен на цифровой вариант, в третьем использовались нелинейные элементы на выходе датчика и регулятора для отражения работы АЦП и ЦАП.

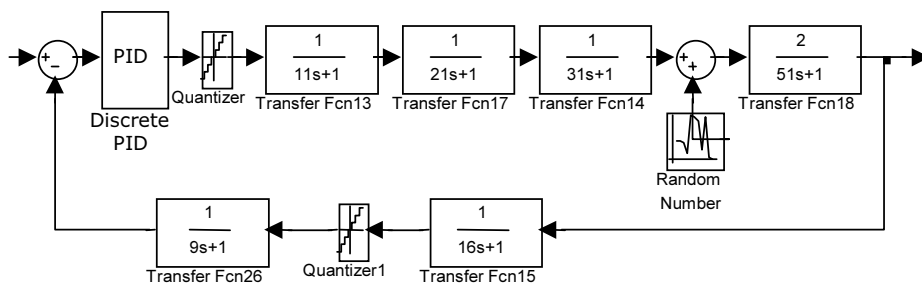


Рис. 2. Структура моделирования

Сигнал по каналу задания менялся плавно с различным ускорением путем изменения амплитуды синусоидальных колебаний; сигнал управления был сформирован так, чтобы производная меняла свой знак и значение в широком диапазоне (рис. 3).

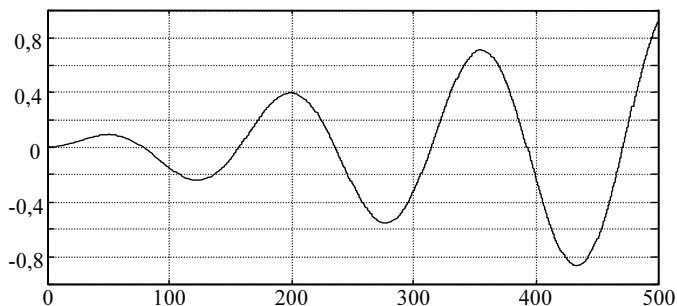


Рис. 3. Сигнал по каналу задания для создания меняющегося значения и знака производной

Амплитуда случайного процесса подбиралась на уровне младшего значащего разряда и была одинакова для всех контуров регулирования. Результаты сравнения для первой и второй производной представлены на рис. 4–6.

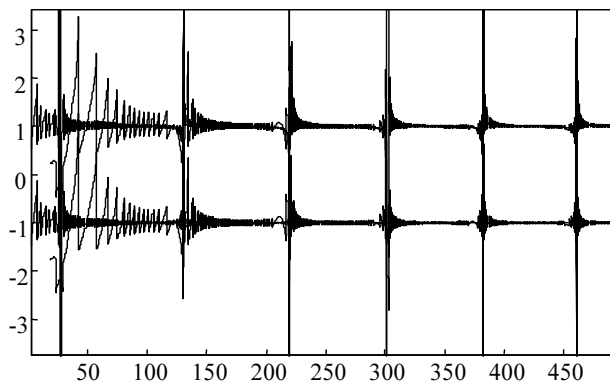


Рис. 4. Относительная погрешность вычисления первой производной Sample time 0,1; 1 (фрагмент)

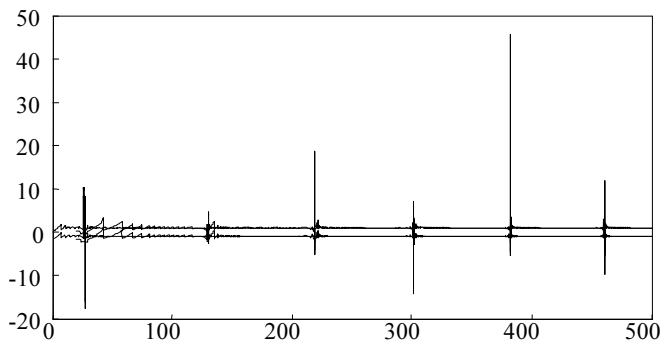


Рис. 5. Относительная погрешность вычисления первой производной Sample time 0,1; 1

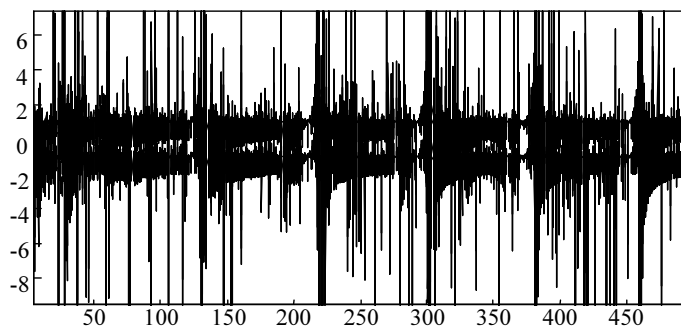


Рис. 6. Относительная погрешность вычисления второй производной Sample time 0,1; 1

Погрешность оценивалась по отношению к чисто аналоговой работе контура. Анализ результатов показал, что при вычислении только первой производной относительная погрешность может достигать 2 000 % ошибки. Наибольшая ошибка достигается при изменении знака ускорения сигнала задания. В среднем при наличии на диапазоне работы 2 000 комбинаций ADC она была 30...40 %. Вычисление второй и третьей производной приводило к значительно большим погрешностям. Поэтому при использовании компенсаторов с необходимостью вычисления производных стоит ограничиваться первым порядком.

#### Литература

- [1] Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME. *Journal of Basic Engineering*, 1960, no 82, pp. 35–4.
- [2] Сизиков В.С. *Устойчивые методы обработки результатов измерений*: Санкт-Петербург, Спецлит, 1999, 240 с.
- [3] Балакришнан А. В. *Теория фильтрации Калмана*. Москва, Мир, 1988, 168 с.
- [4] Багмут И. А. К вопросу о повышении точности оценивания инструментальных погрешностей инерциального блока интегрированной навигационной системы. *Вестник Нац. техн. ун-та ХПИ. Вып. Системный анализ, управление и информационные технологии*. Харьков, НТУ ХПИ, 2011, № 32, с. 81–87.

УДК 004.02

### **Демонстрационный макет экспертной системы интеллектуальной поддержки экипажа при решении пилотажно-навигационных задач**

© Бабиченко Андрей Викторович, Земляный Егор Сергеевич

Россия, Московская обл., г. Раменское, ОАО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»

[a.babichenko@unc-rpkb.ru](mailto:a.babichenko@unc-rpkb.ru), [e.zemlyanyy@unc-rpkb.ru](mailto:e.zemlyanyy@unc-rpkb.ru)

*Рассмотрены вопросы реализации на борту летательного аппарата (ЛА) механизмов интеллектуальной поддержки экипажа при решении пилотажно-навигационных задач в виде экспертных систем (ЭС). Для практической проверки возможности запуска на борту ЛА средств интеллектуальной поддержки с использованием механизма ЭС создан демонстрационный стенд, проведены экспериментальные исследования работы нечеткой ЭС реального времени при возникновении различных особых ситуаций.*

**Ключевые слова:** летательный аппарат, бортовая электронно-вычислительная машина, экспертная система, информация, моделирование.

Исходя из классификации экспертных систем, приведенной в [2], интеллектуальная поддержка решения навигационно-пилотажных задач ЛА может быть реализована в виде бортовой интегрированной динамической нечеткой экспертной систе-

мы. Обоснование требований, предъявляемых к таким системам, более подробно изложено в [1]. Вопросы создания динамических ЭС отражены в [4].

Имеются различные подходы для запуска на борту механизмов ЭС, а именно:

- реализация в бортовой электронно-вычислительной машины (ЭВМ) ЛА программного кода, реализующего собственный механизм ЭС;
- запуск в бортовой ЭВМ ЛА уже существующего механизма ЭС путем подключения уже существующего отдельного модуля.

Первый подход показан в [6] и связан с созданием основных элементов ЭС (базы знаний, пользовательского интерфейса, машины логического вывода), т. е. созданием собственной интеллектуальной системы. Это является сложнейшей программной задачей, требует больших финансовых и трудовых затрат. Более подробно создание инструментальных средств построения интеллектуальных систем рассмотрено в [5].

Второй подход к реализации ЭС на борту связан с решением двух задач: 1) непосредственная стыковка существующего механизма ЭС с основной частью программы; 2) написание собственной базы знаний для этой ЭС. Принципы построения баз знаний интеллектуальных систем изложены в [2, 3].

Решению задачи стыковки готового модуля, реализующего ЭС, посвящена большая часть доклада. Согласно [2], стыковка не просто разных пакетов, а разных методологий порождает целый комплекс теоретических и практических трудностей.

Данные трудности связаны с ограничениями, накладываемыми запуском ЭС именно на борту ЛА:

- операционной системой бортовой ЭВМ является операционная система реального времени (ОСРВ), являющаяся POSIX-системой, т. е. имеющей переносимый интерфейс операционных систем Linux;
- языком для реализации программ в бортовой ЭВМ, работающей под управлением указанных выше ОС, служит язык С;
- исходный код интегрируемой ЭС в целях обеспечения информационной безопасности должен быть открытым и свободно распространяемым.

Программным продуктом для реализации ЭС выбрана оболочка CLIPS (C Language Integrated Production System) как отвечающая указанным требованиям.

В руководстве пользователя [7] и расширенном руководстве программиста [8] описаны следующие варианты по стыковке CLIPS с другими приложениями:

- интеграция CLIPS с использованием внешних функций (External Functions);
- интеграция в JAVA-приложения;
- интеграция в приложения, работающие под управлением ОС Microsoft Windows с использованием технологии DLL — динамически подключаемых библиотек (Dynamic Linked Libraries);
- интеграция в сторонние приложения, работающие под управлением Linux-систем с использованием технологии SO — подключаемых библиотек (Shared Objects).

Несмотря на достаточно полное описание системы в расширенном руководстве программиста CLIPS [8] менее всего описан именно вариант подключения в Linux и прочие ОС. Данный вариант позволяет динамически подключать в основной код программы только необходимые функции системы, а также полностью передавать управление ЭС основной программе.

Для практической проверки возможности запуска на борту ЛА средств интеллектуальной поддержки с использованием механизма ЭС был создан демонстрационный стенд, состоящий из клиентской и серверной частей, его структура показана на рис. 1.

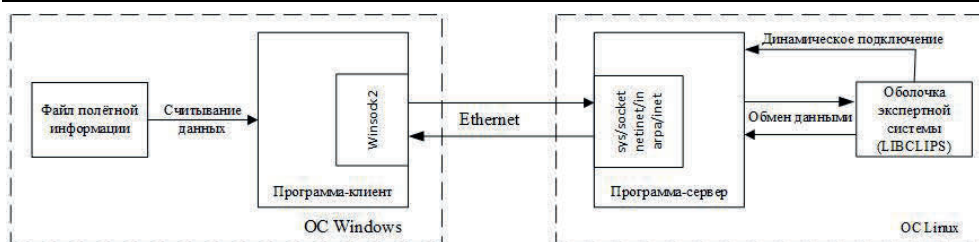


Рис. 1. Структура комплекса полунатурного моделирования

Клиентская часть комплекса реализует моделирование поведения систем ЛА. При этом моделирование происходит в квазиреальном времени путем воспроизведения записанных файлов с полетной информацией из разных источников.

Серверная часть моделирует работу БЦВМ и осуществляет динамическое подключение модуля-оболочки ЭС, а также запуск, инициализацию и работу ЭС интеллектуальной поддержки экипажа.

Кроме того, с использованием указанного выше демонстрационного стенда были проведены экспериментальные исследования работы нечеткой ЭС реального времени при возникновении различных особых ситуаций. База знаний этой ЭС была получена путем анализа экспертных данных, накопленных в процессе многолетней эксплуатации отдельно взятого типа ЛА, а также знаний экспертов, полученных при анализе отчетов о расследовании авиационных происшествий, создаваемых Межгосударственным авиационным комитетом (МАК).

Такой выбор обусловлен тем, что позволяет наглядно продемонстрировать разные подходы к извлечению знаний и возможности ЭС.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- применение нечеткой логики в ЭС позволяет определять сложившуюся ситуацию и прогнозировать ее развитие с некоторым опережением по отношению к системам с булевой логикой;
- динамическая нечеткая ЭС реального времени позволяет информировать экипаж ЛА о сложившейся особой ситуации и выдавать рекомендации по действиям для выхода из нее;
- создание бортовых ЭС обязательно должно предусматривать возможность обновления базы знаний ЭС по мере накопления опыта эксплуатации.

## Литература

- [1] Бабиченко А.В., Земляной Е.С. К обоснованию требований к бортовым экспертным системам интеллектуальной поддержки экипажа. *Авиакосмическое приборостроение*, 2014, № 12.
- [2] Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. *Базы знаний интеллектуальных систем*. Санкт-Петербург, Питер, 2000.
- [3] Джарратано Дж., Райли Г. *Экспертные системы: принципы разработки и программирование*. Москва, Вильямс, 2007.
- [4] Рыбина Г.В. *Интеллектуальные системы: от А до Я: в 3 кн.: кн. 2. Интеллектуальные диалоговые системы. Динамические интеллектуальные системы*. Москва, Научтехлитиздат, 2015.
- [5] Рыбина Г.В. *Интеллектуальные системы: от А до Я: в 3 кн.: кн. 3. Проблемно-специализированные интеллектуальные системы. Инструментальные средства построения интеллектуальных систем*. Москва, Научтехлитиздат, 2015.

- [6] Стефанов В.А., Федунев Б.Е. *Бортовые оперативно-советующие экспертные системы (БОСЭС) типовых ситуаций функционирования антропоцентрических (технических) объектов*. Москва, Изд-во МАИ, 2006.
- [7] Joseph C. Giarratano, Gary D. Riley. *Expert Systems. Principles and Programming*. USA: Thomson, 2007.
- [8] Corporate Author. *CLIPS. Reference Manual, vol. II Advanced Programming Guide*. USA: Quicksilver, 2008.

УДК 681.518

## **Формирование алгоритмического обеспечения современных систем летательных аппаратов**

© Кай Шэнь

Россия, Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[shenkaichn@mail.ru](mailto:shenkaichn@mail.ru)

*Представлены алгоритмические составляющие систем управления и измерительного комплекса летательного аппарата, позволившие сформировать интеллектуальные компоненты исследуемых систем. Базовыми составляющими являются акцептор действия, метод самоорганизации, численные критерии степени управляемости и наблюдаемости, а также модифицированный нелинейный фильтр Калмана.*

**Ключевые слова:** *летательный аппарат, измерительный комплекс, система управления, алгоритм самоорганизации, нелинейный фильтр Калмана, интеллектуальный компонент.*

Летательные аппараты, как правило, классифицируются как атмосферные летательные аппараты (ЛА), космические аппараты (КА) и ракеты. В целях реализации эффективного полета необходимо использовать измерительную информацию о состояниях ЛА высокой точности. Интенсивное маневрирование ЛА предполагает наличие информации о местоположении, скорости и ориентации. Однако информация измерения обычно искажена внешними и внутренними шумами. Компенсация бортового навигационного комплекса ЛА является актуальной проблемой, которая требует незамедлительного решения.

Чтобы осуществлять эффективное управление ЛА, российские профессора в МГТУ им. Н.Э. Баумана непрерывно исследовали алгоритмические подходы к компенсации бортовых навигационных систем и построили несколько алгоритмов и математических моделей ошибок изучаемых процессов — навигационных комплексов, в том числе инерциальной навигационной системы (ИНС), ГЛОНАСС/GPS и других измерительных систем [1–12].

Во время интенсивного маневрирования высокодинамических объектов, а именно ЛА, невозможно применять априорные модели изучаемых процессов, полученных в лабораторных испытаниях. Таким образом, необходимо строить модели высокой точности в течение процесса функционирования высокодинамических объектов.

Для осуществления коррекции высокой точности в навигационных системах управления в [2–4] предложено применять подходы самоорганизации, нейронные сети и генетические алгоритмы, чтобы построить модели для алгоритмов оценивания или/и прогнозирования изучаемых навигационных систем. Однако оценивание работоспособности навигационных алгоритмов и формирование дополнительных критериев оценивания точности сформированных моделей оценивания/прогнозирования навигационного комплекса управления на основе инерционных навигационных систем представляют проблему для исследования.

В настоящее время наиболее точными являются навигационные системы с коррекцией от спутников. Однако встречаются случаи, когда использовать корректирующий сигнал со спутников не представляется возможным. Поэтому применяют различные навигационные системы и их сочетания, предлагают алгоритмические методы повышения точности навигационной информации при функционировании систем в условиях активных и пассивных помех, а также при сложном движении несущего объекта [1, 3, 12, 13].

В процессе работы учеными были получены и исследованы алгоритмы оценивания, в частности фильтрация Калмана, и их модификации, интеллектуальные навигационные алгоритмы, т. е. модифицированные фильтры Калмана, с помощью подхода самоорганизации (Self-Organization Approaches — SOA), нейронных сетей (Neural Networks — NN) и генетических алгоритмов (Genetic Algorithms — GA).

На основе концепции интеллектуальных систем разработан подход синтеза интеллектуализированных систем управления (ИСУ), использующий в качестве интеллектуального компонента такую функциональную систему, как акцептор действия. В акцепторе действия ИСУ для построения прогнозирующих моделей применяется алгоритм самоорганизации. Реализация подхода синтеза ИСУ продемонстрирована на примере разработки систем управления перспективными ЛА, а также измерительного комплекса ЛА [14, 15].

На основе комбинации результатов проведенных исследований сформировано алгоритмическое обеспечение ИСУ и интеллектуализированного измерительного комплекса ЛА. Таким образом, базовым структурным элементом этих объектов является акцептор действия, основным алгоритмом — алгоритм самоорганизации, в котором использованы в качестве критериев селекции (помимо общих критериев) критерии степени управляемости, наблюдаемости. Для оценивания исследуемых процессов применен нелинейный фильтр Калмана, модифицированный с помощью алгоритма самоорганизации. Система управления и измерительный комплекс являются примерами применения концепции интеллектуализации на практике [16].

## Литература

- [1] Неусыпин К.А. *Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами*. Москва, Изд-во МГОУ, 2009, 500 с.
- [2] Анохин П.К. *Биология и нейрофизиология условного рефлекса*. Москва, Медицина, 1968, 325 с.
- [3] Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Цибизова Т.Ю. *Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации*. Москва, Изд-во МГОУ, 2006, 220 с.
- [4] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Вайс Ю.Л., Шолохов Д.О. Формирование ансамбля критериев селекции компактного алгоритма самоорганизации. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 11, с. 14–16.



- [5] Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А. *Навигационный комплекс*. Пат. на изобретение RU 2016383 от 15.07.94 г.
- [6] Неусыпин К.А., Шелухина Н.А. Коррекция навигационной информации посредством нелинейного фильтра Калмана. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 4, с. 21–24.
- [7] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами. *Автоматизация и современные технологии*, 2014, № 6, с. 40–44.
- [8] Неусыпин К.А., Кэ Ф., Дзя Л.С. Управление и наведение ракет, основанное на теории дифференциальной геометрии. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 1, с. 16–20.
- [9] Неусыпин К.А. Системный синтез систем управления с интеллектуальной компонентой. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 3, с. 35–39.
- [10] Кэ Фан, Ким Чжэсу, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов. *Автоматизация и современные технологии*. *Машиностроение*, 2013, № 2, с. 30–34.
- [11] Неусыпин К.А., Фам С.Ф. Повышение степени управляемости летательного аппарата. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 2, с. 21–25.
- [12] Буй Ван Кьонг, Неусыпин К.А. Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2005, № 7, с. 11–15.
- [13] Неусыпин К.А., Мешков Н.А., Пишулин В.И. Исследование систем управления. Москва, Изд-во МГОУ, 2009, 124 с.
- [14] Неусыпин К.А., Муркина Н.В. Фрустрационная толерантность интеллектуальных систем летательных аппаратов. *Автоматизация и современные технологии*, 2004, № 1, с. 25–27.
- [15] Неусыпин К.А. Концептуальный синтез интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 6, с. 23–25.
- [16] Неусыпин К.А. Направления развития интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2002, № 12, с. 12–16.

УДК 004.896:621.865

## **Разработка системы управления руки-манипулятора антропоморфного робота AR601**

**© Камалов Артур Ренатович, Никитина Дарья Викторовна,  
Сиразетдинов Рифкат Талгатович**

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

[arttambel@gmail.com](mailto:arttambel@gmail.com), [daria.92rus@gmail.com](mailto:daria.92rus@gmail.com)

*Начиная с работ в агрессивной или непригодной для человека среде, например, в зоне техногенной катастрофы, заканчивая сферой развлечения и обслуживания, антропоморфные роботы имеют возможность использовать огромный инструментарий, предназначенный для людей. Поэтому реализация захвата и манипуляция окружающих предметов — одна из актуальнейших подзадач.*

**Ключевые слова:** антропоморфные роботы, манипулятор, рука-манипулятор, AR601.

Подсистема автономного управления рукой является частью системы управления антропоморфным роботом. Антропоморфизм как тип конструкции робота, а также как модель взаимодействия с внешним миром наиболее востребован во многих областях, где рассматривается внедрение роботов [1].

Количество характеристик у предметов, возможных для взаимодействия, очень велико, например вес, форма, материал. Важны положение предмета в пространстве, его доступность, а также учет его возможного движения. Возникает необходимость распознавания объекта, нахождения его координат, планирования движения манипулятора.

Поставленные задачи:

- реализовать все компоненты системы в виде типовых шаблонов (паттернов);
- разработать и реализовать серии паттернов:
  - а) паттерн зрения, позволяющий распознать предмет и определить его координаты;
  - б) паттерн движения руки, ответственный за планирование движения руки к заданной точке и установку руки в положение готовности к захвату;
  - в) паттерн захвата предмета путем сжимания пальцев руки.
- проверить адекватность системы на роботе AR-601 (НПО «Андройдная техника»);
- реализовать все элементы системы в программной среде ROS (Robot Operating System) [2].

Разработана система позиционирования манипулятора. Система, получая данные с видеокамер, лазерных дальнометров и энкодеров определяет положение захвата в пространстве.

Создан алгоритм захвата предметов. Зная координаты цели, манипулятор задает необходимые положения своим сочленениям для достижения заданной точки. Для этого разработана математическая модель руки-манипулятора и выведено уравнение, корни которого при решении дают необходимую информацию об углах звеньев кинематической цепи руки.

Программная часть реализована в виде пакетов операционной системы ROS, так была достигнута децентрализация системы, адаптация под разные аппаратные реализации манипуляторов, подключение новых элементов к системе.

Результат (рис. 1) был отработан на антропоморфном роботе AR-601 [3].

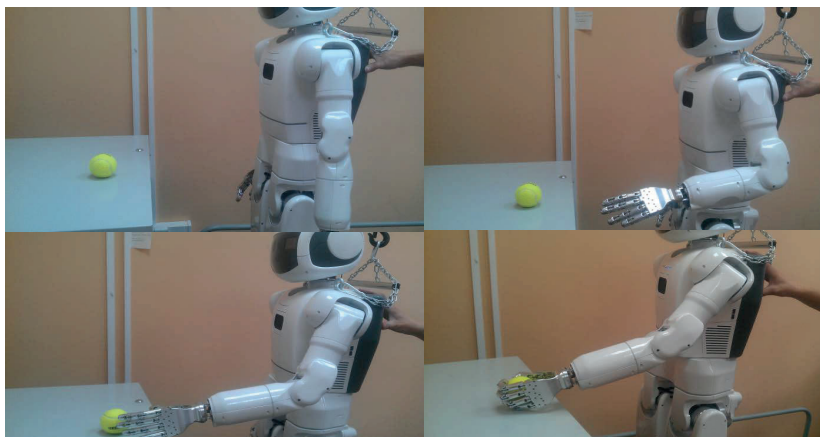


Рис. 1. Пример захвата мяча

## Литература

- [1] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D1%80%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%BC>
- [2] URL: <http://www.ros.org/about-ros/>
- [3] URL: <http://npo-at.com/products/ar-600e/>
- [4] Hirose M., Ogawa K. Honda Humanoid Robots Development. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2007, No. 365, pp. 11–19.

УДК 67.05

## Разработка инновационного импортозамещающего комплекса для поверхностного монтажа

© Клеветов Денис Викторович, Симаков Александр Леонидович

Россия, Владимирская обл., г. Ковров, АО «Всероссийский научно-исследовательский институт “Сигнал”»

[denis\\_klevetov@list.ru](mailto:denis_klevetov@list.ru)

*На отечественном рынке оборудования для поверхностного монтажа существует обширный спектр иностранных решений, позволяющих выполнять отдельные технологические операции в части подготовки к монтажу, монтаж, пайка и т.п. Предлагаемый импортозамещающий комплекс должен обеспечить решение комбинированной задачи — подготовка радиоэлементов к монтажу и сам поверхностный монтаж. Комплекс имеет инновационное захватно-формовочное устройство, собственную систему управления и реализован на механизмах с параллельной кинематикой, что дает ему конкурентоспособные преимущества.*

**Ключевые слова:** механизм с параллельной кинематикой, импортозамещение, комплекс, поверхностный монтаж, радиоэлемент.

В настоящее время в радиоэлектронной промышленности существует тенденция уменьшения габаритных размеров изделий. Для достижения точности позиционирования в технологическом оборудовании применяют прецизионные дорогостоящие приборы и комплектующие.

Предлагаемый комплекс позволит совершить технологический скачек в области поверхностного монтажа радиоэлементов (РЭ) с одновременной автоматической формовкой их выводов. Комплекс предназначен для реализации функций подготовки выводов РЭ к поверхностному монтажу с помощью уникального захватно-формовочного устройства и последующего монтажа РЭ на поверхность печатных плат, в том числе в условиях серийного и мелкосерийного производства методом монтажа в отверстия.

Комплекс обеспечивает возможность встраивания в любые технологические линии по монтажу блоков РЭ, а его компактность за счет применения в основе механизмов (рис. 1) с параллельной кинематической структурой (МПКС) станет весомым преимуществом в скорости выпуска качественной продукции и компактности технологии.



Рис. 1. Промышленные роботы фирм ABB (а) и Fanuc (б)

Комплекс станет доступным для предприятий, выпускающих электронные изделия в объеме серийного и единичного производства (до 7 000 шт.), и предназначен для:

- устранения ручного труда и перехода к автоматизации;
- создания гибких и компактных производств;
- повышения качества и надежности сборочных (конечных технологических процессов) производства.

Комплекс позволит обеспечить заданную технологическую точность без применения прецизионных устройств за счет замкнутой кинематической структуры при снижении себестоимости оборудования на 15...20 %.

К настоящему моменту развитие радиоэлектронной промышленности вышло на совершенно новый качественный уровень. Развитие импортной компонентной базы ушло далеко вперед по сравнению с отечественными производителями. Это доказывает и то, что в основу классификации типов электрорадиоэлементов положен принцип импортного обозначения типов корпусов, в которые они устанавливаются. Однако и отечественная индустрия радиоэлектроники взяла курс на ускоренное развитие данного сектора экономики. Множество целевых программ поддержки внедряются для «оживления отрасли», в том числе о запуске одной из них — «Комплексная программа развития радиоэлектронной промышленности» объявил сам Александр Якунин, директор департамента радиоэлектронной промышленности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (МИНПРОМТОРГ РФ) (Международный журнал «Аэрокосмический курьер». 2011г.). Ярким примером развития является, принятая в 2008 г., федеральная целевая программа «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы, в которой расписана плановая государственная политика в области развития отечественной радиоэлектроники [1]. Актуальность области выбранной тематики подтверждают и другие многочисленные целевые программы, реализующиеся на федеральном уровне.

Технология монтажа в отверстия (Through Hole Technology — ТНТ), также называемая иногда штырьковым монтажом, является основой подавляющего большинства современных технологических процессов сборки электронных модулей.

Технология монтажа в отверстия, как следует из названия, представляет собой метод монтажа компонентов на печатную плату, при котором выводы компонентов устанавливаются в сквозные отверстия платы и припаиваются к контактным площадкам и/или металлизированной внутренней поверхности отверстия.

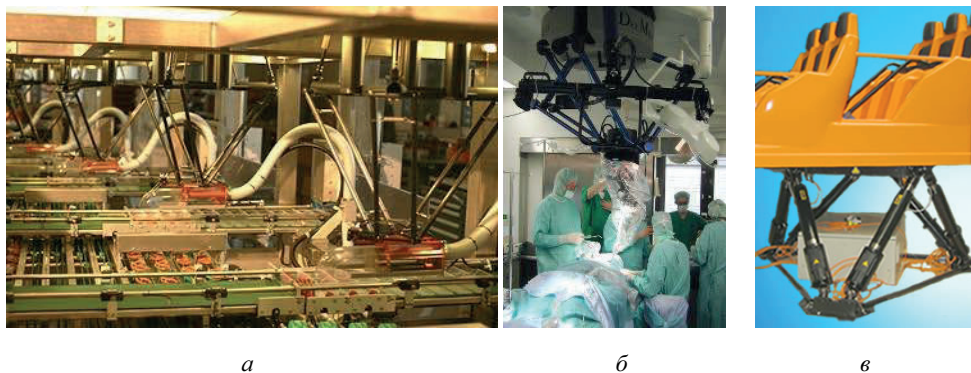
Данный метод используется в силовых устройствах, блоках питания, высоковольтных схемах мониторов и других устройств, а также в областях, в которых предъявляют повышенные требования к надежности, например, авионика, автоматика АЭС, ВПК и т. п. Также данная технология широко применяется в условиях единичного и мелкосерийного многономенклатурного производства, где из-за частой смены выпускаемых моделей автоматизация процессов неактуальна. Эта продукция, в основном, выпускается небольшими отечественными предприятиями как для бытового, так и для специального применения.

Проанализировав существующие автоматизированные комплексы по автоматическому поверхностному монтажу можно однозначно определить, что внедрение в данную отрасль механизмов с параллельной кинематикой позволят решить целый ряд актуальных задач:

- 1) качество (точность) прямо зависит от стоимости;
- 2) скорость (влияет на качество выпуска);
- 3) компактность (массогабаритные характеристики);
- 4) гибкость переналадки (русскоязычный интерфейс);
- 5) энергоэффективность (высокие показатели потребления);
- 6) стоимость организации и создания автоматизированной конвейерной линии (окупается только при массовом производстве, при этом большие временные затраты).

В общей сложности можно выделить пять больших сфер человеческой деятельности с применением МПКС (рис. 2):

- 1) механообработка (станки и оборудование токарной, фрезерной, шлифовальной групп и др.) [2];
- 2) упаковка (сортировка пищевых и фармацевтических товаров, транспортировка товара) (рис. 2, а) [3];
- 3) медицина (протезирование, сложное хирургическое оборудование) (рис. 2, б) [4];
- 4) игровая индустрия (3D и 5D-кинотеатры) (рис. 2, в);
- 5) военная промышленность (авиасимуляторы, симуляторы бортовой качки, стендовое оборудование, тренажерное оборудование).



**Рис. 2.** Применение робототехнических систем с МПКС:  
а — в пищевой промышленности; б — в медицине; в — в игровой индустрии

Конечно, из этих направлений наиболее широко МПКС применяется в промышленности [5]. Однако автору не удалось найти в литературе упоминания о приме-

нии МПКС для автоматизации процесса монтажа блоков радиоэлементов. Поэтому идею по применению МПКС в электронной промышленности можно смело назвать новаторской.

К настоящему времени существуют промышленные образцы, с использованием МПКС (см. рис. 1, 2). Стоимость одного рабочего места представленных образцов с минимальной комплектацией составляет более 2 млн руб., стоимость прецизионных устройств с применением в медицинской сфере (см. рис. 2, б), то доходит до 40 млн руб.

Внедрение предлагаемой технологии в промышленное производство позволит увеличить выпуск готовой продукции до 25 % и снизить энергозатраты до 15 %, высвободит дополнительные площади за счет компактности создаваемого оборудования (увеличит коэффициент использования производственных площадей на 20 %) и повысит качество предоставляемых услуг.

Предлагаемый технологический прорыв предлагается осуществить за счет применения в конструкции оборудования с параллельной кинематикой, а также собственных разработок (захватно-формовочного устройства и способа автоматизированного монтажа блоков радиоэлементов — локальной формовки).

Отсутствие на современном рынке отечественных производителей оборудования накладывает на исполнителя проекта определенные обязательства. Исследования, проведенные профессором МАИ А. Медведевым, позволяют утверждать о положительной динамике развития радиоэлектроники как самостоятельной отрасли промышленности. Имеются данные о том, что за последние 2–3 года предприятия проявляют интерес к приобретению SMT-линий в связи с появлением новых разработок. Предлагаемый комплекс стоимостью 500...600 тыс. руб. должен стать основным конкурентом иностранному оборудованию стоимостью 700...1500 тыс. руб.

В связи с динамичным развитием промышленности и индустрии появилось необходимость к повышению скорости и качеству выпускаемой продукции в области поверхностного монтажа. Неоспоримым является и тот факт, что сборочные процессы блоков радиоэлектронной аппаратуры требуют наиболее высокого качества, так как непосредственно отвечают за работоспособность продукта в целом. Поэтому прорывные технологии в данном секторе промышленности несомненно найдут свою нишу и откроют дополнительные возможности для отрасли в динамичном развитии.

Предлагаемый комплекс [7] призван не только устранить выявленные недостатки, но и имеет ряд неоспоримых преимуществ за счет использования механизмов с параллельной кинематической структурой: замкнутая кинематическая цепь, повышенная жесткость системы, повышенная точность позиционирования, повышенные скоростные характеристики, компактность оборудования, модульность конструкции и в дополнении: собственная система управления и уникальное захватно-формовочное устройство.

К настоящему моменту задача по импортозамещению в проекте по созданию комплекса реализована уже на стадии макетирования. Созданный макет комплекса [7, 8] спроектирован на отечественной базе. Заложенные основные комплектующие (силовая плата и исполнительные двигатели) закуплены на территории РФ у отечественных поставщиков (ЗАО «Электропривод»).

Применение предлагаемого к внедрению комплекса должно обеспечить повышение общей эффективности производства до 30 %.

Работа выполнена при поддержке ГРАНД РФФИ (проект № 05-08-50076, 2005), Государственных контрактов № 8692р/14006 от 14.01.2011 и № 10510р/16861 от 08.06.2012 на выполнение НИОКР по теме «Разработка прогрессивных методов производства в приборо-, машиностроении и высокоэффективных радиоэлектронных устройств и систем» (программа «У.М.Н.И.К.»).

### Литература

- [1] Федеральная целевая программа «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 годы URL: [http://www.rosrep.ru/investment\\_projects/index.php?ELEMENT\\_ID=4794&SECTION\\_ID=23](http://www.rosrep.ru/investment_projects/index.php?ELEMENT_ID=4794&SECTION_ID=23) (дата обращения 25.08.2012).
- [2] Информационно-аналитический сайт по материалам зарубежной печати. URL: <http://www.stankoinform.ru/08.geksapod.htm> (Дата обращения 25.08.2012).
- [3] *Delta Parallel Robot — the Story of Success*. URL: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html> (дата обращения 25.08.2012).
- [4] *Haptic Devices Based on Parallel Mechanisms. State of the Art*. URL: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review003.html> (дата обращения 25.08.2012).
- [5] Клеветов Д.В. Применение механизмов с параллельной кинематической структурой в технологических процессах производства. *Вооружение. Технология. Безопасность. Управление. Матер. V Науч.-техн. конф. аспирантов и молодых ученых*. В 6 ч. Ч. 4. Ковров, ГОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2010, с. 59–71.
- [6] URL: <http://www.contractelectronica.ru/info/articles/contract/russian/> (дата обращения 10.02.2015).
- [7] Клеветов Д.В. Проект создания Delta-робота. *Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России: II Всерос. науч. Звoryкинские чтения. Сб. тез. докладов II Всероссийской межвузовской научной конференции*. Муром, 5 февраля 2010 г. Муром, МИ ВлГУ, 2010, с. 627–629.
- [8] Клеветов Д.В. Создание обратной связи для системы управления сборочным устройством на базе трехстепенного механизма параллельной кинематикой. *Достижения в области технических наук: Сб. науч. тр., посвященный 60-летию высшего профессионального образования в г. Коврове*. Ковров, ФГБОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева», 2012, с. 252–262.

УДК 681.513

## Особенности эксплуатации перспективных средств выведения

© Кочешков Максим Александрович, Пролетарский Андрей Викторович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

*Исследован способ выведения космического аппарата на орбиту и приведения в заданный район. Предложено использовать интеллектуализированную систему управления для реализации процесса управления аппаратом. Представлен анализ факторов, влияющих на точность и безопасность при решении задач космических аппаратов.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, средство выведения, район приземления, алгоритм управления, интеллектуализированная система.

Основной задачей систем управления средствами выведения (СрВ) различных типов является выведение космических аппаратов (КА) на заданную орбиту и приведение ракетных блоков и крылатых ступеней в районы приземления с требуемой точностью и надежностью при одновременном обеспечении требуемого уровня безопасности, в том числе и экологического, по трассе полета и в районах их приземления, а также безопасности экипажа при его наличии [1, 2].

Выбор наиболее целесообразной совокупности параметров, характеризующих целевую орбиту КА, определяется типом орбиты, схемой выведения и задачами, возлагаемыми на СрВ [1, 3].

СрВ должны обеспечивать возможность выведения:

- в заданную область космического пространства, подвижную или неподвижную относительно вращающейся Земли (например, в задачах аварийного спасения космонавтов и т.д.), характеризующуюся параметрами, изменение которых существенно влияет на возможность выполнения целевой задачи КА;
- на орбиту, трасса которой и порядок движения КА вдоль этой трассы заданы определенным образом, а высота полета имеет определенное значение, особенно в районе работы целевой аппаратуры КА (например, в задаче обеспечения связи и управления и т. д.);
- на почти круговую орбиту, имеющую строго определенное положение в абсолютном пространстве (например, в задачах навигационного, метеорологического и топогеодезического обеспечения и т. д.);
- на орбиту с заданным фазовым положением в заданное время  $t_u$  (например, при построении систем КА, находящихся в одной заданной плоскости, но разведенных по фазе).

Наряду с решением основной задачи на интеллектуализированную систему управления (ИСУ) возлагаются также задачи обеспечения оптимального по некоторому критерию качества (например, по энергетике) режима выведения КА, задачи приведения отделяемых частей ЛА в заданные районы приземления и ряд других задач, связанных с управлением автоматикой двигательной установки и различными бортовыми системами при штатных и нештатных режимах полета и т. п. [13].

Точностные характеристики ИСУ спуском и посадкой возвращаемых ступеней ЛА должны определяться исходя из условия обеспечения гарантированной точности захода их на посадку на аэродромы соответствующего класса с работающими или выключенными двигателями в автоматическом или ручном режиме управления полетом. Доставка полезного груза (ПГ) на низкие и средневысокие орбиты может быть обеспечена с помощью непрерывного активного участка при однократном включении двигателей последней ступени ЛА. Управление движением центра масс СрВ по траектории выведения должно осуществляться таким образом, чтобы обеспечивались условия выведения КА на требуемую орбиту при одновременном обеспечении условий приведения ЛА в выделенные районы падения (РП) и полной выработки топлива из баков нижних ступеней СрВ.

В принципе приведение ракетных блоков и крылатых ступеней в заданные РП после отделения от СрВ может осуществляться путем их соответствующего маневрирования на атмосферном участке спуска. В этом случае допустимые отклонения от номинальных значений компенсируются в процессе дальнейшего управления полетом.

Обеспечение требуемой точности и надежности выведения КА на орбиту и приведения в заданные РП может достигаться путем использования алгоритмических возможностей ИСУ [4].



Точность выведения КА или приведения в заданный район приземления будет определяться инструментальными и методическими погрешностями ИСУ [3].

Основными из инструментальных погрешностей ИСУ перспективных ЛА являются уходы гиросприборов, ошибки их первоначальной выставки и ошибки измерения параметров движения центра масс (кажущихся скоростей либо ускорений). Уходы гиросприборов имеют достаточно стабильный характер. Это дает возможность осуществлять их оценку при предстартовой подготовке ИСУ и вводить соответствующие поправки в алгоритмы управления полетом, что позволяет уменьшить влияние инструментальных погрешностей ИСУ на точность выведения КА на требуемую орбиту и приведения ЛА в заданные РП и обеспечить начальную выставку (прицеливание) комплекса командных приборов системы управления РКН на основе, например, метода гирокомпасирования. Соответствующие поправки в алгоритм управления могут быть введены также при калибровке измерителей параметров движения центра масс ЛА и уточнения их начальной выставки на основе, например, аналитического прицеливания.

Уменьшение инструментальных погрешностей ИСУ перспективных ЛА может быть обеспечено также на основе комплексирования с внешними источниками навигационной информации [5–8].

Для пилотируемых ЛА ИСУ должна быть выполнена по иерархическому принципу, предусматривающему возможность ее использования в трех режимах функционирования (в порядке убывания приоритета): автоматическом, директорном и ручном. Переход с высокого уровня управления на более низкий уровень должен происходить как вследствие возникновения отказов в ИСУ и ЛА, так и по решению экипажа.

Ручное управление должно служить последним резервом ИСУ для обеспечения безопасности полета ЛА, которая характеризуется вероятностью РБП окончания полета ЛА без опасных для здоровья экипажа и окружающей среды последствий:

При этом ИСУ должна обеспечивать возможность определения на борту программы управления полетом в заданный РП исходя из типа нештатной ситуации, момента ее возникновения, реальных условий полета и технического состояния ЛА.

Таким образом, для обеспечения требуемой точности и надежности выведения КА на заданную орбиту и приведения ОЧ в заданный РП при одновременном обеспечении наиболее полного использования энергетических возможностей и требуемого уровня безопасности ЛА по трассе полета и в РП его ОЧ с помощью алгоритмических средств могут быть использованы следующие способы:

- ввод поправок в алгоритмы управления на стабильные составляющие инструментальных погрешностей ИСУ, на результаты калибровки измерителей параметров движения центра масс ЛА и уточнения их начальной выставки в процессе предстартовой подготовки и полета ЛА;
- обеспечение решения навигационной задачи с требуемой точностью;
- решение задачи идентификации массово-энергетических характеристик ЛА и основных возмущающих факторов, действующих в полете; ввод соответствующих поправок в алгоритмы управления;
- решение на борту ЛА задачи оптимального по энергетике выведения КА на орбиту или приведения ЛА в заданные РП при штатных и нештатных режимах полета;
- обеспечение движения ЛА в плотных слоях атмосферы с допустимыми значениями нагрузок на конструкцию, температуры нагрева конструкции и перегрузок, действующих на экипаж;

- обеспечение совмещения моментов выключения ЖРД нижних ступеней СрВ по окончании компонентов топлива (ОКТ) с моментами набора функционалов, обеспечивающих попадание их ОЧ в заданные РП, при одновременном выполнении условий нормального (безаварийного) выключения ДУ ступеней;

- введение алгоритмической и информационной избыточности;

- обеспечение параметрической надежности ККП по результатам оценки и прогноза его технического состояния на время полета ЛА.

Алгоритмы управления целесообразно разрабатывать унифицированными, что позволит снизить затраты на создание программного обеспечения БЦВК и будет содействовать унификации структуры и аппаратуры ИСУ и упрощению эксплуатации ИСУ.

Для повышения безопасности на всех этапах эксплуатации ЛА по результатам контроля и диагностики его бортовой аппаратуры ИСУ должна обеспечивать решение задачи выбора эффективных мер по локализации аварийной ситуации путем перестройки структуры ИСУ с учетом имеющегося резерва аппаратурного состава и его программно-алгоритмического обеспечения [9–12] и принятия решения по полному или частичному выполнению программы полета либо по формированию рациональной циклограммы выхода ЛА из НПС, предусматривающей выбор наиболее безопасной трассы полета и района падения аварийного ЛА при невозможности приведения его в заданный РП.

## Литература

- [1] Жаков А.М. *Управление баллистическими ракетами и космическими объектами*. Москва, Военное издательство Министерства обороны СССР, 1974, 273 с.
- [2] Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Цибизова Т.Ю. *Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации*. Москва, Изд-во МГОУ, 2006, 220 с.
- [3] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Вайс Ю.Л., Шолохов Д.О. Формирование ансамбля критериев селекции компактного алгоритма самоорганизации. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 11, с. 14–16.
- [4] Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А. *Навигационный комплекс*. Пат. на изобретение RU 2016383 от 15.07.94 г.
- [5] Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В. Алгоритмические способы повышения точности автономных навигационных систем. *Тр. ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления*, 2010, № 3, с. 68–74.
- [6] Неусыпин К.А., Шелухина Н.А. Коррекция навигационной информации посредством нелинейного фильтра Калмана. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 4, с. 21–24.
- [7] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами. *Автоматизация и современные технологии*, 2014, № 6, с. 40–44.
- [8] Неусыпин К.А., Кэ Ф., Дзя Л.С. Управление и наведение ракет, основанное на теории дифференциальной геометрии. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 1, с. 16–20.
- [9] Неусыпин К.А. Системный синтез систем управления с интеллектуальной компонентой. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 3, с. 35–39.
- [10] Кэ Фан, Ким Чжэсу, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов. *Автоматизация и современные технологии. Машиностроение*, 2013, № 2, с. 30–34.
- [11] Неусыпин К.А., Фам С.Ф. Повышение степени управляемости летательного аппарата. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 2, с. 21–25.

- [12] Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А. Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2005, № 7, с. 11–15.
- [13] Неусыпин К.А., Мешков Н.А., Пишулин В.И. *Исследование систем управления*. Москва, Изд-во МГОУ, 2009, 124 с.
- [14] Неусыпин К.А., Муркина Н.В. Фрустрационная толерантность интеллектуальных систем летательных аппаратов. *Автоматизация и современные технологии*, 2004. № 1, с. 25–27.
- [15] Неусыпин К.А. Концептуальный синтез интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 6, с. 23–25.

УДК 681.513

## Синтез информационно-управляющей системы современной организации

© Лукьянова Наталья Викторовна, Кочешков Максим Александрович

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Разработана структура современной информационно-управляющей системы на основе даймонд-структуры, системы управления с эталонной моделью. Модель строится методом самоорганизации или реализуется процедура идентификации, результатом которой являются наборы оптимальных ядер Винера, определяемые взаимокорреляционным методом.*

**Ключевые слова:** *информационно-управляющая система, эталонная модель, самоорганизация, идентификация, ядра Винера.*

Современные информационно-управляющие системы (ИУС) предполагают использование различных алгоритмов обработки информации [1–4].

Наиболее сложным при реализации является блок синтеза цели. Реализация механизма мотивации возможна посредством ансамбля критериев, однако в практических приложениях такой подход часто приводит к существенному снижению точности информации, а иногда и к потере адекватности. С учетом этих особенностей современного этапа развития ИУС и необходимо осуществить выбор структуры системы. Обычно в крупных организациях используется простая иерархическая структура. Преимущества такой структуры — простота, универсальность. Недостатки заключаются в том, что требуются дополнительные усилия, структуризация для применения высоких технологий, интеллектуальных технологий. В связи с этим целесообразно использовать какую-либо промежуточную организационную структуру, позволяющую применять ИУС без специальных структурных изменений, но в то же время не требующую сложного информационного обеспечения и применения в полном объеме интеллектуальных технологий.

Возможно также использование других иерархических систем управления, например, даймонд-структуры [1].

Даймонд-структура осуществляет функцию ранжирования и имеет возможность разделения управляющих и информационных каналов на всех уровнях иерархии.

Даймонд-структура может быть использована для реализации системы динамического управления организацией. Именно в этом случае ярче всего проявятся ее преимущества, возможность ранжирования информации по значимости и на ее основе осуществления управления, а также применения алгоритмических методов и программного обеспечения ИУС.

Для функционирования ИУС необходима база данных. При построении прогнозирующей модели требуется информационная выборка. В зависимости от богатства статистической выборки получают модели различной точности.

Подход самоорганизации может быть использован в условиях минимального объема априорной информации, а также без учета некоторых существенных факторов. Использование подхода самоорганизации возможно в условиях превышения в несколько раз помех по сравнению с полезным сигналом.

Возможность прогнозирования без учета некоторых определяющих факторов объясняется тем, что в сложных системах факторы коррелированы между собой, следовательно, измерение одного фактора содержит информацию о других факторах, связанных с измеряемым.

Таким образом, исчерпывающая информация, необходимая для построения модели, характеризующая динамику исследуемого процесса, содержится в измерительной выборке, а также в ансамбле критериев селекции алгоритма построения моделей.

Преимуществом подхода самоорганизации является имеющаяся возможность построения математических моделей в условиях отсутствия априорного указания закономерностей исследуемого процесса.

При наличии «бедной» информационной выборки, когда измерения содержат скудную информацию, недостаточную для описания состояния организации, необходимо отдать предпочтение желаемому прогнозу, синтезируемому экспертом.

Предложенная методика может быть реализована в рамках выбранной структуры системы управления. На крупных предприятиях со сложными информационными потоками рекомендуется даймонд-структура системы динамического управления, хотя эта структура может быть использована и в других организациях. На каждом уровне даймонд-структуры реализуется отдельный алгоритм управления с эталонной моделью. Таким образом, возникает необходимость синтезировать столько эталонных моделей, сколько существует уровней в даймонд-структуре. Такой подход существенно упрощает синтез эталонной модели, поскольку позволяет разделить информацию по значимости, сократить объем информации, используемой для построения эталонной модели на каждом уровне, т. е. выполнить структурирование информации о состоянии организации в целом.

Применение даймонд-структуры в ИУС позволяет также разделить информацию по функциональному признаку, т. е. четко выделить информационные выборки и управленческие информационные потоки. Даймонд-структура системы динамического управления чрезвычайно удобна для применения формализованной информации. Эталонные модели при использовании этой структуры получаются компактными и простыми в отличие от эталонной модели функционирования всей организации. Следует отметить также особенность эталонных моделей, полученных методом самоорганизации, которая заключается в том, что параметры модели, как правило, не имеют физического смысла, но в целом модель адекватно отражает исследуемый процесс функционирования организации в каждый момент времени.

В случае когда необходимо проводить аналитические исследования, в системе управления приходится задавать структуру эталонной модели априори [5]. Подход

самоорганизации использовать не представляется возможным. Однако априорные модели имеют низкую точность и их использование нецелесообразно. Поэтому в системе управления задается модель, которая затем подлежит идентификации.

Задачу определения ядер Винера можно считать корректной, если на вход исследуемой системы подается идеальный белый шум [6–8]. Но поскольку практически такой процесс не реализуем, возникает проблема выбора оптимальных параметров тестирующего сигнала с тем, чтобы он воспринимался системой как белый шум. Для разрешения этой проблемы необходима информация о соответствующих характеристиках системы. Полученная информация определяет параметры процедуры идентификации.

Этап предварительных исследований реальной аппаратуры включает ряд операций.

*Операция 1.* Определение входов и выходов реальной аппаратуры и динамического диапазона сигналов.

Необходимо знать все входы, влияющие на изучаемую реакцию, определяемые предварительным тестом, а также динамический диапазон изменения амплитуды теста. Этот диапазон должен перекрывать наиболее информативный динамический диапазон входных сигналов исследуемой аппаратуры.

*Операция 2.* Проверка стационарности реальной аппаратуры в связи с тем, что метод белого шума применим только к таким системам. Поскольку входной сигнал — это стационарный случайный процесс, любые нестационарности ее аппаратуры приводят к нестационарности ее реакции.

*Операция 3.* Исследование источников шума с целью проведения соответствующей фильтрации реализаций до определения по ним ядер Винера.

Шум, не зависящий от тестирующего сигнала или реакции аппаратуры, обычно не принимается во внимание, поскольку взаимокорреляционный метод определения ядер Винера значительно снижает его влияние.

*Операция 4.* Ориентировочное определение полосы пропускания реальной аппаратуры для выбора частотного диапазона тестирующего сигнала.

Полоса пропускания определяет частотный диапазон, в котором исследуемая аппаратура реагирует на входное воздействие. Приближенно ее можно определить, тестируя систему с помощью синусоидальных сигналов, импульсных воздействий или широкополосного белого шума.

*Операция 5.* Выбор частотного диапазона тестирующего сигнала в виде широкополосного белого гауссова шума.

Для получения точных оценок характеристик исследуемой аппаратуры важно правильно выбрать частотный диапазон тестирующего сигнала, который определяется полосой пропускания аппаратуры [9, 10]. Но чтобы входной гауссов процесс для системы был белым шумом, частотный диапазон должен полностью перекрывать полосу пропускания системы, а он сам в пределах этой полосы должен обладать постоянной спектральной плотностью.

На исследуемую аппаратуру подается тестирующий сигнал с ограниченной постоянной спектральной плотностью. Нижнее ограничение связано с конечной продолжительностью эксперимента, а верхнее с тем, что с повышением частоты уровень амплитуды реакции системы понижается. Поэтому верхний диапазон определяется наивысшей частотой, при которой реакция системы может быть обнаружена на фоне шума.

Таким образом, задача выбора частотного диапазона тестирующего сигнала сводится к выбору таких параметров рекуррентного фильтра, при изменении которых дисперсия реакции модели практически не изменяется.

*Операция 6.* Определение интервала дискретности.

В задачах идентификации оперируют дискретными величинами. Точность дискретизации зависит от выбора интервала квантования по времени.

*Операция 7.* Определение памяти системы (времени затухания переходного процесса) с целью выбора диапазона временных задержек при вычислении ядер реальной аппаратуры и выбора времени эксперимента.

Ядра, рассчитанные на выбранном интервале, несут реальную информацию о системе (интервал определяется временем взаимной корреляции между входным воздействием и реакцией системы).

Поскольку в первом приближении дисперсия оценок ядер обратно пропорциональна длительности записи теста, предельная длительность определяется либо вычислительными возможностями, либо временем стационарности исследуемой аппаратуры. Но тогда получаем противоречивые требования. Для помехоустойчивости необходимо, чтобы длительность записи была большой. Вследствие существующей нестационарности аппаратуры интервал наблюдения лучше выбрать короче. На практике интервал наблюдения выбирают превышающим время затухания переходного процесса, так как малый интервал наблюдения не позволяет описать исследуемую аппаратуру статистическими методами и применим только при больших соотношениях сигнал/шум. Как правило, время наблюдения выбирают как сумму времени затухания переходного процесса в объекте и максимального времени корреляции входного сигнала.

### Литература

- [1] Неусыпин К.А., Мешков Н.А., Пищулин В.И. *Исследование систем управления*. Москва, Изд-во МГОУ, 2009, 124 с.
- [2] Неусыпин К.А. Системный синтез систем управления с интеллектуальной компонентой. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 3, с. 35–39.
- [3] Неусыпин К.А. Концептуальный синтез интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 6, с. 23.
- [4] Неусыпин К.А. Направления развития интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2002, № 12, с. 12.
- [5] Цибизова Т.Ю., Неусыпин К.А. Некоторые аспекты реструктуризации систем управления современными учебно-научными центрами. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 1, с. 30–34.
- [6] Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я. *Самоорганизация прогнозирующих моделей*. Киев, Техника, 1985, 375 с.
- [7] Цибизова Т.Ю. Методы идентификации нелинейных систем управления. *Современные проблемы науки и образования*, 2015, № 1. URL: <http://www.science-education.ru/121-1791>
- [8] Лукьянова Н.В., Кузнецов И.А. Идентификация нелинейных динамических систем на основе разложения функционалов методом Винера. Матер. конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах», Санкт-Петербург, 2014.
- [9] Лукьянова Н.В. Идентификация нелинейных систем на основе разложения функционалов Винера в системе LABVIEW. *Тр. Междунар. науч. конф. «Актуальные вопросы фундаментальных наук»*. Москва, 2014, с. 167–172.
- [10] Лукьянова Н.В. Требования, предъявляемые к процессу идентификации на основе разложения функционалов Винера. *Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Достижения Вузовской науки»*. Москва, 2014, с. 183–188.

УДК 681.5

## Применение метода многомерных тестовых объектов в задаче калибровки универсальных промышленных роботов

© Нестеров Дмитрий Владимирович, Нестеров Владимир Николаевич

Россия, г. Самара, ОАО «Самарский электромеханический завод»

[nesterovd163@gmail.com](mailto:nesterovd163@gmail.com)

*Актуальным направлением развития современного промышленного производства является применение передовых робототехнических технологий. Статья посвящена применению различных промышленных роботов в технологических операциях. Важным вопросом является калибровка универсального промышленного робота. Предложен метод многомерных тестовых объектов для калибровки робота-манипулятора.*

**Ключевые слова:** промышленные роботы, промышленное производство, промышленное оборудование, калибровка, робот-манипулятор.

Современное промышленное производство немислимо без применения передовых робототехнических технологий. К технологиям такого рода относятся различные промышленные роботы, широкое применение которых на современном производстве позволяет решить целый комплекс важнейших задач. В настоящее время на передовых производственных площадках различных стран мира задействуется все меньше и меньше рабочих, их труд заменяет автоматика. Основными преимуществами такого подхода является повышение производительности труда, повышение точности выполняемых операций снижение производственного брака и т. д.

Промышленные роботы подразделяются на специальные, специализированные и универсальные. Специальные роботы выполняют определенную технологическую операцию, специализированные — операции одного вида, например сварку, сборку, и обслуживают определенную группу моделей оборудования. Отдельно следует выделить класс универсальных промышленных роботов. Они являются наиболее усовершенствованными представителями промышленных роботов, служат для выполнения разных операций и функционируют с оборудованием различного назначения.

В Российской Федерации до последнего времени производство робототехнических комплексов различного назначения базировалось на использовании универсальных промышленных роботов западного производства и Японии. ОАО «АВТОВАЗ» также выпускает универсальные промышленные роботы, но 70 % ключевых комплектующих закупается за рубежом.

Проблема усугубляется тем, что, даже купив системы управления, невозможно превратить универсальный промышленный робот в технологически законченное оборудование, способное выполнять любые технологические операции, без операции калибровки универсального промышленного робота. Операция калибровки подразумевает коррекцию параметров математической модели конкретного робота в системе

управления в соответствии с высокоточными измерениями координат положения и углов Эйлера рабочей точки манипулятора, куда устанавливается инструмент, в любой точке пространства рабочей зоны манипулятора. Однако системы управления и системы калибровки промышленных роботов являются ноу-хау фирм-производителей такого рода оборудования и являются секретными. На сегодняшний день отечественная промышленность не располагает отлаженными алгоритмами калибровки промышленных манипуляторов, вследствие чего наблюдается зависимость от западных поставщиков оборудования и технологий.

Совершенно очевидно, что для достижения технологической независимости от иностранных фирм-производителей промышленного оборудования необходимо разрабатывать как отечественные конструкции манипуляторов, так и системы управления и калибровки.

Как правило, контактные методы калибровки позволяют осуществить проверку калибровки манипулятора только в одной точке рабочей области. Разработка бесконтактного метода и средств контроля траекторных составляющих перемещений конечного звена манипулятора универсального промышленного робота является необходимым условием выполнения операций калибровки в пределах всей рабочей зоны манипулятора.

Разработанный профессором В.Н. Нестеровым метод многомерных тестовых объектов, являясь фундаментальным, позволяет организовать сбор и обработку информации, получаемой по оптическому каналу. Метод построен на увеличении информационности системы посредством введения в нее тестового объекта с известными с высокой точностью параметрами. Для калибровки манипулятора используется специальный стенд, состоящий из приемника изображения и самого манипулятора, на рабочее звено которого закрепляется тестовый объект [1].

Применение аппарата математического моделирования дает возможность с высокой точностью восстановить координаты рабочего звена манипулятора по плоскому изображению тестового объекта, получаемому через приемник изображения (камеру). Такой подход к измерениям позволяет эффективно исследовать точность позиционирования рабочего инструмента во всей рабочей зоне робота. Без сомнения, развитие оптических методов калибровки — очень важная задача, решение которой позволит значительно снизить зависимость от западных технологий.

## **Литература**

- [1] Нестеров В.Н., Мухин В.М., Мещанов А.В. *Метод многомерных тестовых объектов в оптических измерительных системах*. Самара, Изд-во Самарского научного центра РАН, 2013, 224 с.



УДК 004.896:621.865

## Разработка алгоритмов динамической ходьбы на примере антропоморфного робота AP601

© Фадеев Андрей Юрьевич, Никитина Дарья Викторовна,  
Деваев Вячеслав Михайлович

Россия, Республика Татарстан, г. Казань, Казанский национальный  
исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева

[AndriuhaFad@yandex.ru](mailto:AndriuhaFad@yandex.ru), [daria.92rus@gmail.com](mailto:daria.92rus@gmail.com)

*Представлены результаты разработки алгоритмов динамической ходьбы на примере антропоморфного робота AP601. Антропоморфные роботы предназначены для работы в среде обитания человека: здания и сооружения, кабины машин. По сравнению с гусеничными и колесными роботами антропоморфные роботы имеют гораздо более высокую проходимость и способность преодолевать препятствия.*

**Ключевые слова:** динамическая ходьба, антропоморфные роботы, AP601.

Антропоморфные роботы должны работать со всеми видами существующих инструментов и устройств, приспособленных для людей. Недавние события на АЭС «Фукусима» (Япония) показали необходимость использования этих роботов для ликвидации последствий катастроф. В настоящее время Управлением перспективных исследовательских проектов Пентагона (США) объявлен конкурс (DAPRA Robotics Challenge) на лучший проект робота, способного передвигаться по неровной поверхности, подниматься по лестницам, пользоваться обычным и электрическим инструментом, управлять транспортными средствами. Это определяет высокие требования к устойчивости антропоморфных роботов при ходьбе, в том числе с грузами [1].

Создание шагающего аппарата — сложная задача, требующая решения многих взаимосвязанных проблем. К ним относятся и моделирование движения, так как антропоморфные шагающие механизмы имеют большое число степеней свободы и их движение описывается сложными уравнениями [2]. Целью работы является приведение сложного движения робота к набору простых шаблонов-паттернов, выделенных как набор стереотипных поведенческих реакций человека и последовательностей действий при ходьбе. В работе представлен паттерн переноса неопорной ноги по заданной траектории.

Для достижения данной цели задача была разделена на несколько подзадач.

Первая подзадача рассматривалась как перемещение ступни неопорной ноги антропоморфного робота на заданное расстояние по параболической траектории.

Предполагаем, что движение по параболе или траектория «брошенного камня» является наиболее приближенным к естественному шагу человека.

Рассматривается движение ноги в плоскости симметрии робота. Введем инерциальную систему отчета: ось  $Ox$  — направлена параллельно поверхности Земли в направлении движения робота, ось  $Oy$  — перпендикулярно оси  $Ox$  (рис. 1). Положение бедра ( $OA$ ) и голени ( $AB$ ) относительно  $xOy$  определяются углами  $\alpha$  и  $\beta$ . По координатам ступни (точка  $B$ ) необходимо в каждый момент времени найти углы  $\alpha$  и  $\beta$ .

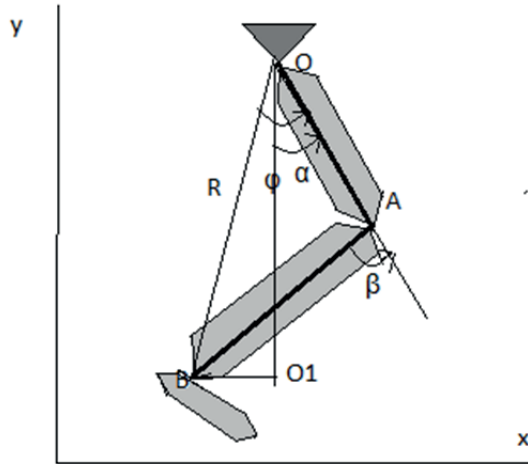


Рис. 1. Схема углов

Выводим уравнение параболы, по которой происходит перемещение ступни робота:

$$y = \frac{-4h}{L^2}x^2 + \frac{4h}{L}x,$$

где  $L$  — длина шага,  $h$  — высота шага.

Расстояния между бедром и коленом, а также между коленом и голенью равны ( $OA = l_1 = AB = l_2 = 280$  мм);

Из геометрической схемы, приведенной на рис. 1, находим

$$R = \sqrt{(X_A - X_O)^2 + (Y_A - Y_O)^2}.$$

Определим вспомогательный угол  $\varphi$  ( $\angle BOA$ ):

$$\varphi = \arccos\left(\frac{l_2^2 - l_1^2 + R^2}{2Rl_2}\right).$$

Теперь можем найти значения углов  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\alpha = \varphi - \arctg\left(\frac{OO_1}{O_1C}\right);$$

$$\beta = 180^\circ - 180^\circ - 2\varphi = -2\varphi.$$

Модель перемещения неопорной ноги из заданного положения была протестирована в МПО Octave [3].

Для отработки этого паттерна движения на роботе AP601, было написано программное обеспечение на языке Python. По заданным значениям длины шага  $L$ , высоты шага  $h$ , времени шага одной ногой  $T$ , количеству вычисляемых точек, лежащих на параболе шага  $N$ , построены траектории перемещения неопорной ноги робота (рис. 2, 3).

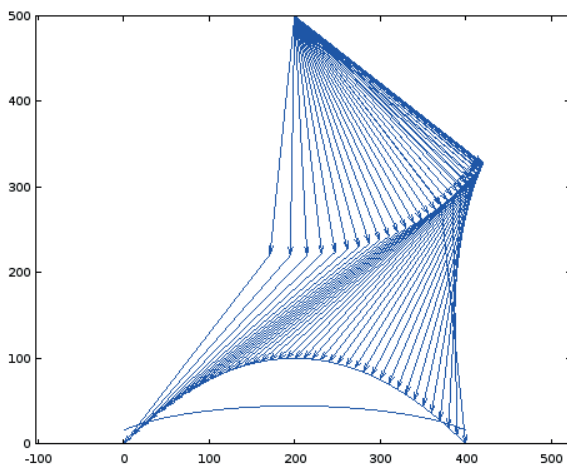


Рис. 2. Графическое изображение перемещения неопорной ноги робота по параболической траектории



Рис. 3. Перемещение неопорной ноги робота по параболической траектории

### Литература

- [1] URL: <http://www.darpa.mil/about-us/about-darpa>
- [2] Воронов А.В. *Имитационное биомеханическое моделирование как метод изучения двигательных действий человека*. Москва, Московский городской педагогический университет. URL: <http://lib.sportedu.ru/Press/TPFK/2004N2/p22-26,39-40.htm>
- [3] URL: <http://www.gnu.org/software/octave/>
- [4] Hirose M., Ogawa K. Honda Humanoid Robots Development. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2007, no 365, pp. 11–19.

**Разработка и внедрение на производство  
высокотехнологичного автоматизированного  
диагностического и лечебного комплекса  
поддержания жизнедеятельности человека «АНГЕЛ»**

© Октябрьская Лариса Владимировна, Макаровец Николай Александрович

Россия, г. Тула, ОАО «Научно-производственное объединение “Сплав”»

[Larsen.ok@yandex.ru](mailto:Larsen.ok@yandex.ru)

*Оценка параметров состояния пациента, особенно в критических ситуациях, нередко субъективна. Созданный комплекс позволит осуществить обработку значительного объема функциональных показателей больного, поступающих от приборов жизнеобеспечения, правильно и объективно интерпретировать и обобщить эту информацию, а также принять решение об индивидуальной терапии каждого конкретного пациента в зависимости от антропогенных характеристик и мониторируемых изменений функционального состояния.*

**Ключевые слова:** автоматизация оказания медицинской помощи, роботизированный мониторинг состояния и жизнеобеспечения пациента.

Комплексный проект по разработке комплекса «АНГЕЛ» выполняется в рамках Постановления Правительства № 218 от 9 апреля 2010 г. Инициатором проекта является ОАО «НПО “Сплав”» (г. Тула), головным исполнителем НИОКТР — ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ), соисполнителем — ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК).

В настоящее время значительное внимание уделяется автоматизации оказания медицинской помощи особенно на догоспитальном этапе и в период эвакуации. При этом крайне важно увеличить скорость и качество диагностического процесса. Как правило, от первичной диагностики и правильного оказания первой помощи зависит дальнейшее состояние пациента. Эти аспекты особенно актуальны в условиях нехватки медицинского персонала или его недостаточной подготовленности (например, техногенная авария, большое количество пострадавших (раненых), удаленность от мест более квалифицированного оказания помощи (ФАПы и мелкие амбулатории)). В связи с этим целесообразным является применение роботизированных средств (методов) диагностики и медикаментозного лечения.

Комплексный проект ОАО «НПО “Сплав”» и МГУ направлен на создание автоматизированной системы диагностики и лечения человека, которая позволит повысить эффективность оказания медицинской помощи в условиях нехватки медицинского персонала, таких как техногенная катастрофа, чрезвычайная ситуация, а также в условиях реанимации и при транспортировке больных при необходимости бдительного контроля состояния пациентов.

Создаваемый комплекс «АНГЕЛ» позволит проводить автоматическую диагностику, мониторинг состояния и поддержание жизнедеятельности пациентов 24 ч в сутки под

контролем специализированной программы управления комплексом с возможностью экстренного оповещения о необходимости вмешательства медицинского персонала.

Разрабатываемый комплекс предназначен для:

1) оказания инструментальной и консультативной помощи при первичной диагностике, автоматического контроля за жизненно важными функциями, инвазивного введения назначенных (предустановленных) препаратов по заданной программе помощи больным, получающим интенсивное лечение (комплекс в стационарном исполнении);

2) оказания помощи пострадавшим — на этапах эвакуации, в обычных средствах транспорта, во время техногенной аварий (комплекс в мобильном исполнении).

В настоящее время изготовлены различные модификации опытных образцов комплексов «АНГЕЛ», которые успешно прошли технические приемочные испытания, и проходят клинические испытания на человеке. Разработанная в составе комплекса уникальная система поддержки принятия решений при назначении лечения позволит повысить точность диагностики, эффективность медикаментозного лечения и таким образом снизить частоту врачебных ошибок.

Алгоритмы диагностики и медикаментозного лечения разработаны на базе детерминированного подхода, что позволило провести их разработку и статистическую верификацию профильными медицинскими специалистами. Такой подход позволяет быстро проводить модификацию алгоритмов при изменении стандартов лечения, введения в практику новых препаратов, методик диагностики и т. д.

Широкое применение Комплекса в реанимационных отделениях медицинских учреждений позволит повысить производительность труда медицинского персонала за счет обеспечения автоматизированного выполнения части функций. Комплекс фиксирует все отклонения в состоянии больного и управляет системой шприцевых насосов по заданному алгоритму, анализирует полученную информацию и непрерывно адаптирует введение препаратов пациенту по результатам обработки показаний датчиков блока сбора информации.

При успешном завершении государственной регистрации в Росздравнадзоре РФ стационарных и мобильных комплексов «АНГЕЛ» планируется начать их серийное производство с 2016 г.

УДК 004.93

## **Постановка задачи повышения эффективности распознавания препятствий и их картографирования для системы технического зрения мобильной платформы**

© Карпунин Александр Александрович, Пак Александр

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

[alekspak@icloud.com](mailto:alekspak@icloud.com), [ksans@yandex.ru](mailto:ksans@yandex.ru)

*Рассмотрена постановка задачи повышения эффективности распознавания препятствий на основе использования системы технического зрения. Изложен перечень вопросов, подлежащих решению в процессе проектирования системы. Пере-*

числены критерии проектирования системы, позволяющие получить эффективное решение. Рассмотрены вопросы распознавания системы меток. Представлено решение задачи обеспечения траекторной безопасности в процессе управления мобильной платформой.

**Ключевые слова:** распознавание препятствий, мобильная платформа, критерии качества, постановка задачи, система технического зрения, повышение эффективности.

**Введение.** Задача распознавания препятствий возникает при управлении мобильными платформами любого типа. Препятствием считается любой объект на пути следования мобильной платформы, который не позволяет продолжить движение.

Границы препятствий можно распознавать с различной степенью точности. Необходимая точность выбирается, исходя из требований к мобильной платформе. Стоимость системы распознавания препятствий растет пропорционально точности.

В качестве объекта исследования данной работы выбрана реализация системы машинного зрения с функцией распознавания известных препятствий на основе использования системы меток с применением сенсора Kinect 2. Данный сенсор позволяет получить карту глубины, изображение в инфракрасном спектре, а также цветное изображение. При этом возможно реализовать бюджетный вариант системы технического зрения, однако самым затратным при этом становится разработка алгоритмов и написание программного кода.

**Постановка задачи.** Целью является повышение эффективности распознавания препятствий и динамическое построение карты окружающей среды для решения задачи построения маршрута мобильной платформы с системой машинного зрения.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- определить дальность до препятствий на основе карты глубины, полученной с системы машинного зрения;
- осуществить обзор существующих подходов распознавания меток на основе машинного зрения и сравнение их эффективности (дальность, вычислительная сложность, память);
- реализовать алгоритм распознавания известных препятствий на основе использования системы меток;
- построить макет мобильной платформы с системой машинного зрения;
- построить карту окружающей среды на основе карты глубины с реализацией на платформе .NET.

Теоретическую основу работы составляют труды зарубежных ученых, таких как А. Кошан, В. Родехорст, Ф. Улупинар, Б. Розенхан и др.

В первую очередь от системы распознавания препятствий требуется знать расстояние до препятствия в общепринятых единицах измерения. В большинстве систем это достигается путем отправки импульса и замера времени до его возврата к сенсору. Также возможно определить расстояние до объектов, используя систему стереозрения. В этом случае используются изображения с двух расположенных рядом откалиброванных видеокамер. Более продвинутые системы также могут определять границы всех видимых препятствий, что позволяет более точно построить маршрут в случае использования системы на мобильной платформе.

Совмещая информацию о дальности до препятствия с алгоритмами распознавания известных препятствий, можно предсказать невидимые в данный момент границы препятствия.

В задаче распознавания препятствия можно применить два разных подхода:

- пытаться распознать препятствие полностью. Данный подход очень ресурсоемкий, так как требуется иметь систему, обученную распознавать объекты с любых ракурсов и при любом освещении;

- использовать метки, навешиваемые на объекты. В этом случае необходимо знать положение метки на объекте и габариты самой метки. Также метки зачастую выполняются в черно-белом цвете, что позволяет меньше зависеть от освещенности.

Для увеличения информации об окружающей среде есть возможность разместить сенсор на крутящемся механизме в целях увеличения обзора без необходимости двигать саму мобильную платформу.

При проектировании системы необходимо решить ряд задач:

- выбрать механизм получения информации о дальности до объекта;
- выбрать механизм получения информации о границах объекта;
- разработать макет мобильной платформы;
- разработать механизм вращения сенсора;
- выбрать алгоритм распознавания известных препятствий;
- реализовать протокол общения между программным и аппаратным обеспечением;
- реализовать программное обеспечение, передающее цветное изображение из сенсора в алгоритм распознавания известных препятствий;
- реализовать программное обеспечение, контролирующее вращение сенсора;
- реализовать алгоритм распознавания известных препятствий на цветном изображении;
- реализовать совмещение информации о дальности до объектов с цветным изображением объектов;
- реализовать построение карты препятствий, используя информацию о дальности до объектов, их границах и информации о габаритах известных препятствий;
- фильтровать на карте препятствий объекты, не мешающие движению платформы, на основе данных о габаритах платформы и информации о местоположении препятствий;
- динамически перестраивать карту препятствий с учетом вращения сенсора;
- обеспечить траекторную безопасность.

**Обзор вариантов решения задачи распознавания меток.** В машинном зрении и робототехнике есть класс задач: обнаружение заранее известных меток. Сюда можно отнести QR-коды, дополненную реальность, задачи позиционирования объектов, детектирование объектов по меткам, классификацию объектов в робототехнике (например, при автоматической сортировке), помощь автоматическим системам в позиционировании (роботизированные захваты), трекинг объектов и т. д. [1].

Алгоритмы различаются по дальности работы, по информации, которую они могут считать с метки, и по информации о расположении метки в пространстве, которая доступна как результат работы алгоритма.

Большинство алгоритмов на первом шаге осуществляет бинаризацию изображения в целях упрощения работы с данными. По этой причине большинство меток выполняются в черно-белом цвете или любых других контрастных цветах относительно друг друга. Также бинаризация изображения позволяет сократить объем информации, который необходимо обработать.

Следующий типичный шаг в работе алгоритма — выявление границ объектов на изображении. Для простоты работы многие типы меток имеют прямые линии в своей основе. Выявление границ позволяет быстро понять, где вероятно находится метка на изображении и присутствует ли она вообще.

Исключая оптимизацию и различные дополнительные обработки, в итоге осуществляется сопоставление с образцом. В случае если на изображении найдена метка, то с нее считывается информация, определяется ее местоположение и ориентация в пространстве, а следовательно, и объекта, на котором размещена метка.

**Критерии проектирования комплекса.** Для проектируемого аппаратно-программного комплекса приоритетными являются следующие критерии качества:

- 1) распознавание известных меток в условиях различной освещенности;
- 2) распознавание известных меток в условиях движения сенсора;
- 3) расстояние распознавания известных меток;
- 4) скорость отработки полного цикла обработки изображений, поступающих с сенсора;
- 5) поддерживаемость кода программной части;
- 6) ремонтпригодность аппаратной части.

Очевидно, что рассматриваемая задача является многокритериальной и для ее решения требуется привлекать комплексный подход для построения структурно-сложной системы и ее оптимизации [2].

Одним из важнейших свойств аппаратно-программного комплекса является способность работать в условиях различной освещенности. Эксплуатация системы машинного зрения должна быть возможна даже при плохой видимости. Иначе сильно сужается спектр возможных решаемых задач.

Данный аппаратно-программный комплекс подразумевает установку на мобильную платформу. Также для увеличения обзора системы машинного зрения сенсор находится постоянно во вращении. По этим двум причинам необходимо обеспечить возможность распознавания известных меток даже в условиях постоянного движения и частой смены положения сенсора.

Следующим немаловажным критерием является расстояние, на котором возможна работа алгоритма распознавания препятствий. Необходимо иметь достаточно времени для принятия решения о последующем маршруте. По этой причине необходимо обеспечить достаточную дальность распознавания препятствий.

Сенсор находится постоянно в движении. В дополнении к этому необходимо иметь время на принятие решения о движении мобильной платформы. Из этого вытекает необходимость проводить весь необходимый цикл обработки изображений от получения от сенсора следующего кадра до построения карты препятствий в соответствии с этим кадром в короткий промежуток времени.

Важным требованием, предъявляемым к современным программным комплексам, является качество кода и его поддерживаемость. В условиях постоянно изменяющегося мира зачастую приходится вносить изменения в существующий код. В случае трудно поддерживаемого кода цена внесения изменения может быть слишком высокой, так что в некоторых случаях даже дешевле написать все с начала.

Так как сенсор находится постоянно в движении, происходит постоянный износ аппаратной части комплекса. Следовательно, необходимо обеспечить достаточный уровень ремонтпригодности комплекса для возможности постоянной эксплуатации.

**Решение задачи обеспечения траекторной безопасности.** В процессе управления мобильной платформой при наличии знаний о расположении препятствий в окружающем пространстве одной из проблематичных является задача обеспечения траекторной безопасности в процессе движения. Для этого необходимо иметь математическую модель, описывающую движение мобильной платформы. Наличие такой модели позволяет оценивать области достижимости аппарата [3], формировать структуры ее управления, а также оценивать опасность препятствий для обеспечения



маневра тележкой, выявлять диапазоны опасных для движения траекторий, строить границу зоны возможного отворота от препятствия [4, 5]. Особенностью задачи является ее динамичность, поскольку любой маневр платформы приводит к изменению как зоны возможного отворота, так и зоны опасных траекторий.

**Заключение.** Исходя из требований, предъявляемых к системам машинного зрения, в данной работе был определен спектр задач, необходимых для решения.

Анализ предметной области и сравнение аналогов показали, что есть несколько возможных вариантов решения задачи определения расстояния до препятствий.

Анализ возможных алгоритмов распознавания меток выделил наиболее подходящие решения, к которым относятся методы средней зоны. Из всех возможных вариантов алгоритмов выделены приемлемые в условиях обработки изображений в реальном времени.

На основании требований к системе были введены критерии качества и необходимый для решения спектр задач.

Рассмотрена задача обеспечения траекторной безопасности мобильной платформы.

### Литература

- [1] *Автоматическое выделение меток.* URL: <http://habrahabr.ru/post/224339/> (дата обращения 26.05.2015).
- [2] Воронов Е.М., Карпунин А.А., Ванин А.В. Оптимизация управления структурно сложными системами. *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2013, № 10, с. 11. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1080.html> (дата обращения 23.05.2015)
- [3] Воронов Е.М., Карпунин А.А. Алгоритм оценки границ области достижимости летательного аппарата с учетом тяги. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2007, № 4, с. 81–99.
- [4] Воронов Е.М., Карпунин А.А. Обеспечение траекторной безопасности в задаче облета динамической круговой зоны. *Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана*, 2011, № 12, с. 12. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/280873.html> (дата обращения 23.05.2015).
- [5] Воронов Е.М., Карпунин А.А. Обеспечение траекторной безопасности в задаче облета статичной круговой зоны. *Вестник Российского университета дружбы народов. Инженерные исследования.* 2012, № 1, с. 58–70.

УДК 681.513

## Информационная система оценки знаний студентов лингвистических специальностей

© Пью Си Тху

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

*Информационная система разработана для обучения школьников и студентов на факультетах лингвистики. Работа посвящена созданию оценочной информационной системы для изучения иностранного языка в области лингвистики и тестирования*

*знаний обучающихся. Разработана информационная система оценки лингвистических знаний, отличающаяся простотой реализации, универсальностью и легкостью настройки.*

**Ключевые слова:** лингвистика, оценка уровня знаний, тестирование, информационная система.

Интенсивные информационные технологии при обучении в школах и университетах используются в рамках различных педагогических концепций [1–3]. Для освоения иностранного языка применяются многообразные информационные системы, которые, однако, обладают помимо неоспоримых преимуществ также и недостатками. Одним из существенных недостатков таких систем — это большая сложность в эксплуатации, селекция результатов тестирования обучающихся с различным априорным уровнем подготовки. Описание различных уровней владения иностранным языком и создание соответствующей системы, которая позволила бы взять на себя функции оценки знаний по каждому уровню, является актуальной задачей. Существующие аналоги дают возможность тренировать, изучать и тестировать только грамматику, но не позволяют тестировать все части языка по уровням владения языком. Данная система позволит тестировать по уровням, и обучающиеся смогут узнать объективную оценку своих лингвистических знаний [4].

Цель данной работы состоит в объективном оценивании тестовых знаний обучающихся на изучаемом языке и в выдаче актуальных результатов обучающимся.

В связи с указанными особенностями спроектирована и реализована Система оценки лингвистических знаний (СОЛЗ). Эта система помогает в варианте тестирования получить среднее и высшее образование. С помощью системы можно оценивать уровень знания любого иностранного языка.

В части проектирования системы разработаны логические модели системы и логическая модель модуля оценки лингвистических знаний. Для структурного подхода определена структура системы, особо для модуля оценки восприятия речевых сигналов. Для представления знаний были разработаны модели для модуля оценки восприятия речи. В разделе объектного подхода были разработаны некоторые диаграммы, которые нужны в части реализации. После этого разработана структура баз данных системы и определены объекты баз данных системы.

Были реализованы формы интерфейса для тестирования в виде восприятия речи и формы интерфейса баз данных системы. Потом включено тестирование системы вида оценки восприятия речи. Далее рассмотрены экономическая часть и перспективы системы.

В итоге исследования сформированы окончательные выводы с помощью информационной семантической системы (ИСС), предложены процедурная фреймовая модель для представления знаний в виде оценки восприятия речи, а также приложение для обучающихся, которое направлено на тестирование в виде оценки восприятия речи, и приложение для управления данными обучающихся, направленное для использования лингвистом.

Сформированы инструкции к выполнению заданий и реализации режима тестирования, были определены структура ИСС, логические модели для общей системы и вида оценки восприятия речи, спроектирована процедурная фреймовая модель со служебными процедурами и демонами. Для объектного подхода были определены диаграмма вариантов использования, диаграмма классов, контекстная диаграмма, детализирующая диаграмма потоков данных и т. д. В итоге были реализованы ин-

терфейсы для обучающихся в виде оценки восприятия речи, которые использованы для определения плана тестирования, формирования параметров тестирования, ответа тестирования, просмотра результатов и оценки тестирования.

На современном этапе ИСС является одним из приоритетных направлений в области искусственного интеллекта, синтеза различных интеллектуальных систем [5–7]. Вместе с развитием ИСС в системе будет получена полная оценка освоения иностранного языка для каждого вида оценки знаний.

### Литература

- [1] Александров А.А., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Шарков А.А. Концепция комплексного непрерывного обучения с использованием инновационных информационных технологий. *Научное обозрение: гуманитарные исследования*, 2012, № 4, с. 38–42.
- [2] Неусыпин К.А. Исследование направлений модернизации образовательного комплекса России. *European Social Science Journal*, 2013, No 9-1 (36), с. 50–54.
- [3] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Особенности использования современных информационных технологий в образовании. *European Social Science Journal*, 2014, no 1-1 (40), с. 63–65.
- [4] Соломатин Н.М. *Информационные семантические системы*. Москва, Высшая школа, 1989, 127 с.
- [5] Неусыпин К.А. Системный синтез систем управления с интеллектуальной компонентой. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 3, с. 35–39.
- [6] Неусыпин К.А. Концептуальный синтез интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 6, с. 23–25.
- [7] Неусыпин К.А. Направления развития интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2002, № 12, с. 12–16.

УДК 681.513

## Разработка навигационного комплекса с интеллектуальной компонентой

© Неусыпин Константин Авенирович, Селезнева Мария Сергеевна

Россия, г. Москва, Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана

*Исследован измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой, в качестве которой применен акцептор действия в соответствии с теорией функциональных систем Анохина. В алгоритмическом обеспечении комплекса использован критерий степени наблюдаемости и алгоритм самоорганизации для построения прогнозирующих моделей погрешностей базовой системы.*

**Ключевые слова:** летательный аппарат, измерительный комплекс, интеллектуальный компонент, самоорганизация, прогноз.

Одним из перспективных направлений синтеза ИС является синтез систем с использованием теории функциональных систем П.К. Анохина.

Система разрабатывается как функциональная система с присущим ей приспособительным эффектом, который реализуется на основе принципа саморегуляции и обладает специфическими узловыми механизмами, в частности акцептором действия. Акцептор действия включает алгоритм построения модели исследуемых параметров, прогноз и сравнение текущих измерений с прогнозом. Акцептор действия является интеллектуальной компонентой, так же как механизм синтеза цели функционирования системы и динамическая экспертная система. Структура измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой (ИК) представлена на рис. 1.

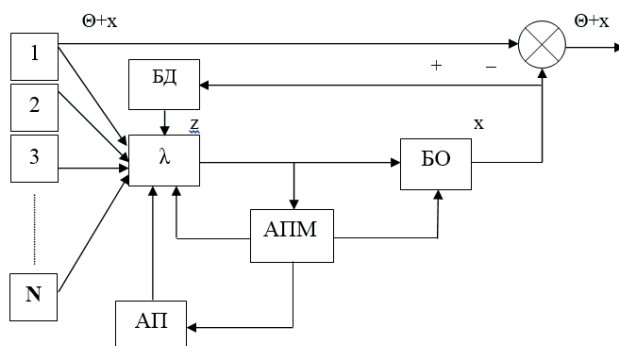


Рис. 1. Структура измерительного комплекса с интеллектуальным компонентом

На рис. 1. введены следующие обозначения: 1 — базовая навигационная система, обычно инерциальная навигационная система (ИНС); 2, ..., N — датчики и измерительные системы внешней информации; λ — блок определения степеней наблюдаемости и формирования измерений  $z$ ; БО — блок оценивания; БД — динамическая база данных; АПМ — алгоритм построения модели; АП — алгоритм прогноза;  $\Theta$  — истинная навигационная информация;  $x$  — погрешности ИНС.

В блоке λ помимо определения степеней наблюдаемости и формирования измерений проводится сравнение апостериорной информации с результатом прогноза.

Полученная на основе проведенных измерений математическая модель используется в алгоритме оценивания для определения состояния исследуемой системы и в численном критерии селекции измерительных сигналов. С помощью математической модели осуществляется прогноз состояния системы на некотором интервале времени, который выбирается из практических соображений в соответствии с режимом функционирования ЛА.

На основании результатов прогноза определяется состав ИК. В процессе функционирования комплекса проводятся измерения, и вычисляется оценка состояния системы и с помощью численного критерия селекции определяется оптимальная структура ИК, которая будет использована на этом интервале функционирования.

ИК предусматривает реализацию алгоритма определения степеней наблюдаемости, алгоритма формирования измерений, алгоритма оценивания, алгоритма самоорганизации для вычисления модели оптимальной сложности, алгоритма прогноза, используемого для предсказания состояния системы, динамической базы данных, состоящей из предсказанных характеристик погрешностей базовой измерительной системы, а также алгоритма сравнения действительной апостериорной информации с прогнозом.

С помощью построенной нелинейной модели осуществляется прогнозирование погрешностей ИНС.

Полученная методом самоорганизации прогнозирующая модель используется в алгоритме оценивания для определения состояния исследуемой системы, а также в численном критерии селекции измерительных сигналов.

С помощью прогнозирующей модели осуществляется прогноз состояния системы на некотором интервале времени, который выбирается из практических соображений в соответствии с режимом функционирования объекта.

На основании результатов прогноза определяется состав измерительного комплекса. В процессе функционирования ИС на основании проведенных измерений вычисляется оценка состояния системы и с помощью численного критерия селекции определяется оптимальная структура измерительного комплекса, которая должна быть использована на этом интервале функционирования. Идентичность прогноза и сигналов, выбранных апостериорной структурой, подтверждает правильность выбора структуры комплекса, которая используется на следующем этапе функционирования динамического объекта.

Если сигнал, полученный с помощью априорной структуры комплекса, и сигнал измерительного комплекса с апостериорной структурой отличаются, то необходимо заняться поиском математической модели оптимальной сложности с помощью алгоритма самоорганизации с использованием вновь поступивших измерений. Параметры новой модели применяются в критерии селекции, и процесс обработки информации повторяется.

Таким образом, в условиях маневрирования ЛА предложено использовать ИК, в котором в критерии степени наблюдаемости использован прогноз значений, полученный с помощью самоорганизующейся прогнозирующей модели.

Результат моделирования продемонстрировал высокую эффективность исследованных алгоритмов навигационного комплекса.

## Литература

- [1] Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В. Алгоритмические способы повышения точности автономных навигационных систем. *Тр. ФГУП «НППЦАП». Системы и приборы управления*, 2010, № 3, с. 68–74.
- [2] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами. *Автоматизация и современные технологии*, 2014, № 6, с. 40–44.
- [3] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Вайс Ю.Л., Шолохов Д.О. Формирование ансамбля критериев селекции компактного алгоритма самоорганизации. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 11, с. 14–16.
- [4] Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А. *Навигационный комплекс*. Пат. на изобретение RU 2016383.
- [5] Неусыпин К.А., Кэ Ф., Дзя Л.С. Управление и наведение ракет, основанное на теории дифференциальной геометрии. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 1, с. 16–20.
- [6] Неусыпин К.А. Системный синтез систем управления с интеллектуальной компонентой. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 3, с. 35–39.
- [7] Неусыпин К.А., Шелухина Н.А. Коррекция навигационной информации посредством нелинейного фильтра Калмана. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 4, с. 21–23.
- [8] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Кэ Фан, Ким Чжэсу. Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов. *Автоматизация и современные технологии*, 2013, № 2, с. 30–34.

- [9] Неусыпин К.А., Фам С.Ф. Повышение степени управляемости летательного аппарата. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 2, с. 21–25.
- [10] Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А. Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2005, № 7, с. 11–15.
- [11] Неусыпин К.А. Концептуальный синтез интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 6, с. 23–25.
- [12] Неусыпин К.А. Направления развития интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2002, № 12, с. 12–16.

УДК 004.89

## **Дешифрация данных аэрофотосъемки, полученной от беспилотного летательного аппарата, с применением сверточной нейронной сети ЛеКуна**

© Соколова Александра Владимировна, Акинин Максим Викторович

Россия, г. Рязань, АО «Государственный Рязанский приборный завод»

[alexandra.sokolova00@mail.ru](mailto:alexandra.sokolova00@mail.ru)

*Освещены вопросы, связанные с обработкой данных, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата. В качестве алгоритма дешифрации кадра аэрофотосъемки описан метод, основанный на применении сверточной нейронной сети ЛеКуна. Рассмотрен алгоритм дешифрации, а также подробно описаны структура, принцип работы и обучения нейронной сети ЛеКуна, эксперимент и результаты работы алгоритма, которые подтверждают возможность использования предложенного алгоритма на практике, а именно для картографирования и построения трехмерных моделей местности.*

**Ключевые слова:** аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, дешифрация изображений, сверточная нейронная сеть ЛеКуна.

**Постановка задачи.** Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является одним из популярнейших способов картографирования местности, построения трехмерных моделей местности, построения трехмерных моделей помещений.

Одна из задач обработки данных, получаемых от БПЛА, — это задача тематического дешифрирования данных съемки местности в видимых спектральных каналах, а также в прочих спектральных каналах (ближних и средних инфракрасных и т. д.). По результатам тематического дешифрирования могут быть созданы как двухмерные тематические карты местности, так и текстуры для трехмерных моделей местности.

В основе процесса тематического дешифрирования предлагается использовать сверточную нейронную сеть ЛеКуна.

Пусть имеется изображение

$$B = \{b_{ij}\}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad b_{ij} = \{b_{ijk}\}, \quad k = \overline{1, K}, \quad I, J, K \in N,$$

где  $b_{ij}$  — пиксель изображения, расположенный в  $i$ -й строке и  $j$ -м столбце изображения размером  $I$  строк на  $J$  столбцов;  $b_{ijk}$  — яркость пикселя в  $k$ -м спектральном канале (всего спектральных каналов  $K$ ).

Задача тематического дешифрирования заключается в построении проекции  $B \rightarrow P$ , где  $P = \{P_m\}, m = \overline{1, M}, P_m \subset B, B = \bigcup P_m$  — множество объектов таких, что  $P_m \cap P_n = \emptyset, m \neq n$ . При этом  $P \rightarrow C$ , где  $C = \{c_q\}, q = \overline{1, Q}$  — множество индексов классов,  $c_q \in N$ . То есть дешифрирование суть есть разбиение  $B$  на совокупность сегментов, каждый из которых подвергается классификации.

Дешифрирование состоит из следующих этапов.

1. Сегментация изображения  $B$  с получением на выходе множества  $P$ .
2. Классификация множества  $P$  — построение проекции  $P \rightarrow C$ .

Для сегментации изображения была использована многомерная нейронная карта Кохонена [1].

Для классификации множества  $P$  была использована сверточная нейронная сеть ЛеКуна.

**Теоретическая часть.** Сверточная нейронная сеть ЛеКуна — архитектура искусственных нейронных сетей прямого распространения, предложенная Яном ЛеКуном [2]. Структура сверточной нейронной сети прямого распространения приведена на рис. 1. Нейронная сеть включает следующие элементы:

- дерево двухмерных слоев «свертка/прореживание»;
- несколько одномерных слоев.

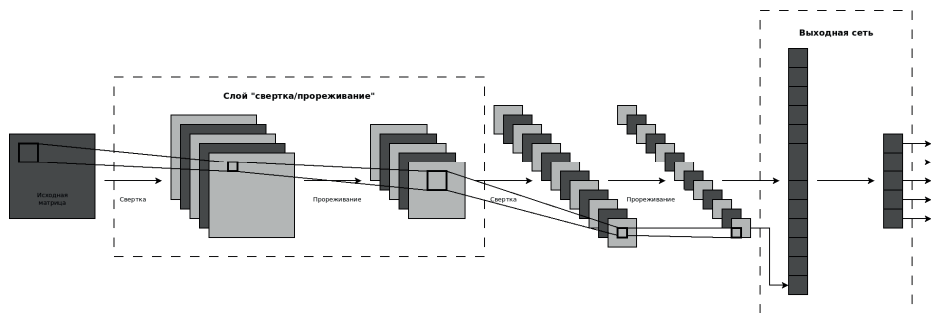


Рис. 1. Структура сверточной нейронной сети ЛеКуна

Дерево двухмерных слоев состоит из пар слоев «свертка/прореживание». Каждая пара слоев получает на свой вход входную матрицу (верхушкой дерева является входное изображение, все сверточные слои второго уровня дерева получают на свой вход одинаковую входную матрицу).

Каждая пара слоев содержит следующие слои:

- сверточный слой, выполняющий свертку исходной матрицы с помощью пространственного фильтра, настраиваемого в процессе обучения сети;
- прореживающий слой, осуществляющий усреднение матрицы — результата свертки в целях получения матрицы меньшей по размеру.

Таким образом, результатом прохождения дерева двухмерных слоев станет вектор, каждый элемент которого является единственным выходным значением соответствующего прореживающего слоя — стока дерева.

Вектор — результат прохождения дерева двухмерных слоев — подается на вход первого одномерного слоя. Набор одномерных слоев работает по принципу многослойного перцептрона.

Результат работы сети — вектор, содержащий вероятности отнесения входной матрицы к соответствующим классам.

Важным достоинством сверточной нейронной сети ЛеКуна является более высокий уровень обобщения информации по сравнению с многослойным перцептроном.

Обучение сверточной нейронной сети ЛеКуна выполняется методом градиентного спуска с применением алгоритма обратного распространения ошибки для расчета градиента функционала ошибки.

**Эксперимент.** Экспериментальные исследования были проведены в контексте составления детализированной двухмерной карты местности по данным, полученным от телевизионных камер, установленных на БПЛА вертолетного типа (гексакоптер).

Для проверки качества дешифрации была выполнена ручная дешифрация нескольких кадров аэрофотосъемки, содержащих изображения различных сцен. Предложенный метод дешифрации показал точность в 87 % правильно распознанных объектов при временных затратах в среднем в 0,032 секунды на обработку кадра, что соответствует 31 FPS.

**Выводы.** Предложенный алгоритм дешифрации данных аэрофотосъемки, полученной с помощью БПЛА, продемонстрировал высокую вычислительную эффективность и точность дешифрации, достаточную для применения алгоритма на практике.

### Литература

- [1] Акинин М.В. *Модели и алгоритмы моделирования интеллектуальной системы автоматического совмещения данных дистанционного зондирования Земли и цифровых карт местности*. Рязань, 2014.
- [2] Акинина Н.В., Клочков А.Я., Бычкова Н.А. Нейросетевые методы анализа главных компонент в задачах обработки данных дистанционного зондирования Земли. *Изв. Юго-Западного гос. ун-та*, 2013, № 6 (51), ч. 2. С. 69–76.
- [3] Mathieu M., Henaff M., LeCunY. Fast Training of Convolutional Networks through FFTs. arXiv:1312.5851, vol. 5 [cs.CV], 6.03.2014.

УДК: 62-598.3

## Моделирование автоматической системы экстренного торможения автомобиля

© Струков Владислав Олегович, Бузников Сергей Евгеньевич

Россия, г. Москва, Научно-исследовательский автомобильный  
и автомоторный институт

[pimp200@yandex.ru](mailto:pimp200@yandex.ru)

*Статья посвящена проблеме предотвращения столкновений транспортных средств. Проведен анализ структурированного множества типовых столкновений, в резуль-*



тате выявлена необходимость использования автоматической системы экстренного торможения для предотвращения столкновений с неподвижными, попутными и встречными препятствиями. Описан принцип действия систем АЕВ (автономная система экстренного торможения) и FCW (система предупреждения о лобовом столкновении) и приведены результаты моделирования функционирования данных систем для случаев неподвижного, попутного и встречного препятствий.

**Ключевые слова:** АЕВ, FCW, автономная система экстренного торможения, система предупреждения о лобовом столкновении, предотвращение столкновений, дистанция, управляющее воздействие.

Одним из перспективных направлений современной робототехники является создание и практическая эксплуатация беспилотных транспортных средств гражданского и военного назначения. Ведущие зарубежные автомобильные фирмы Европы и Америки проводят масштабные работы в этой области.

Если судить о достигнутых результатах по рекламным материалам СМИ, то может сложиться впечатление о скором и успешном финале — появлении на улицах городов и на дорогах массы автономно управляемых беспилотных автомобилей. Оптимизм сторонников прогресса основывается и на том факте, что в авиации более 70 лет используют автопилоты, а управление самолетом в трехмерном пространстве гораздо сложнее, чем автомобилем на двухмерной поверхности.

Однако в действительности эти задачи управления существенно отличаются тем, что для автомобилей актуально предотвращение столкновений, а для самолетов эта задача является второстепенной.

В отсутствие полноценного решения задачи предотвращения столкновений серьезное обсуждение проблемы построения беспилотных транспортных средств лишено смысла.

Анализ структурированного множества типовых столкновений [1] показывает, что для предотвращения столкновений с неподвижными, попутными и встречными препятствиями необходимо использование автоматических систем экстренного торможения.

Принцип действия [2] известных систем АЕВ (автономная система экстренного торможения) и FCW (система предупреждения о лобовом столкновении) основан на измерении расстояния до ближайшего препятствия на полосе с помощью радаров, лидаров и телекамер и его сравнении с граничной безопасной дистанцией:

$$\Delta L_{dтp} = \max[\Delta L_{dтp1}, \Delta L_{dтp2}],$$

где  $\Delta L_{dтp1} = 0,5\hat{a}_{np}\tau_m^2$ ;  $\Delta L_{dтp2} = V_m\tau_m + 0,5V_m^2\hat{a}_т^{-1} - 0,5V_m^2\hat{a}_{np}^{-1}$ ;  $\hat{a}_{np}$  — оценка величины замедления препятствия при его торможении;  $\hat{a}_т$  — оценка величины замедления управляемого автомобиля;  $\tau_m$  — время запаздывания срабатывания тормозной системы управляемого автомобиля;  $V_m$  и  $V_{np}$  — скорость управляемого автомобиля и препятствия.

Тормозное замедление определяется из условия равенства  $\Delta L = \Delta L_{dтp2}$  при идентифицируемых  $V_{np}$  и  $a_{np}$ :

$$a_{\tau} = 0, 5V_m^2 (\Delta L - V_m \tau_m + 0, 5 \operatorname{sgn} [V_{\text{пр}}] V_{\text{пр}}^2 a_{\text{пр}}^{-1})^{-1}.$$

Если  $a_{\tau} \geq a_{\tau, \text{гр}}$ , то управляющее воздействие на тормозную систему  $U_3 = P_{\tau} P_{\tau \text{max}}^{-1}$  определяется из уравнения

$$U_3 = \begin{cases} \hat{a}_1 m_0 \left( \sum_{i=1}^4 k_{3i} \right)^{-1}, & \text{если } U_3 \leq U_{3\text{гр}}; \\ U_{3\text{гр}}, & \text{если } U_3 > U_{3\text{гр}}, \end{cases}$$

где  $k_{3i}$ ,  $1 \leq i \leq 4$  — коэффициенты усилия тормозов;  $U_{3\text{гр}}$  — граничное значение тормозного воздействия.

В докладе приведены результаты моделирования функционирования автоматической системы экстренного торможения для случаев неподвижного, попутного и встречного препятствий.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о работоспособности разрабатываемых алгоритмов и возможности их практического использования в системе управления беспилотным транспортным средством.

### Литература

- [1] Бузников С. Е., Современное состояние и перспективы развития автомобильных систем активной безопасности. *Тр. XV Междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем»*, ч. 2, Москва, РГГУ, 2007, с. 207–211.
- [2] *Euro NCAP AEB Test Protocol v1.0 from January 2014*. URL: <http://www.euroncap.com/ru/для-инженеров/protocols/safety-assist/>
- [3] Красовский А.А., ред. *Справочник по теории автоматического управления*. Москва, Наука, 1987, 712 с.

УДК 004.032.6:655.33

## Интеллектуальный мультимедийный продукт с адаптивным растриванием для ризографической печати

© Сулим Павел Евгеньевич, Юденков Виктор Степанович

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный технологический университет

[poll\\_83@mail.ru](mailto:poll_83@mail.ru)

*Рассмотрено повышение качества ризографической печати на основе математической модели ризографа в среде MatLab с использованием специализированных algo-*

ритмов и функций пакета Image Processing Toolbox. Использование модели трафаретной печати в среде MatLab для ризографа позволяет повысить качество оттисков путем адаптации профиля ризографа к конкретному виду и типу цифровых изображений. Предлагаемая технология дает возможность уменьшить расход мастер-пленки и краски за счет исключения печати контрольных оттисков, а также снизить временные затраты на печать.

**Ключевые слова:** ризограф, растривание, IPT MatLab, цифровая печать, мастер-пленка.

Задачей исследования является разработка интеллектуальной мультимедийной модели ризографической печати в среде MatLab на основе функций пакета IPT с последующим автоматизированным выбором растривания профиля печати ризографа. Для получения стабильного характера растровых точек на ризографе с последующим выбором типов растривания был разработан интеллектуальный мультимедийный продукт с адаптивным растриванием для ризографической печати. Для обучения новичка-оператора предусмотрено мультимедийное обучение и ознакомление с ризографом в виде видеоматериала, что позволяет снизить денежные и временные затраты при обучении на курсах и поиске в интернете необходимой информации. Для сохранения подготовленного изображения, к которому в будущем надо будет обратиться, предусмотрено сохранение файла с параметрами изображения [1–2].

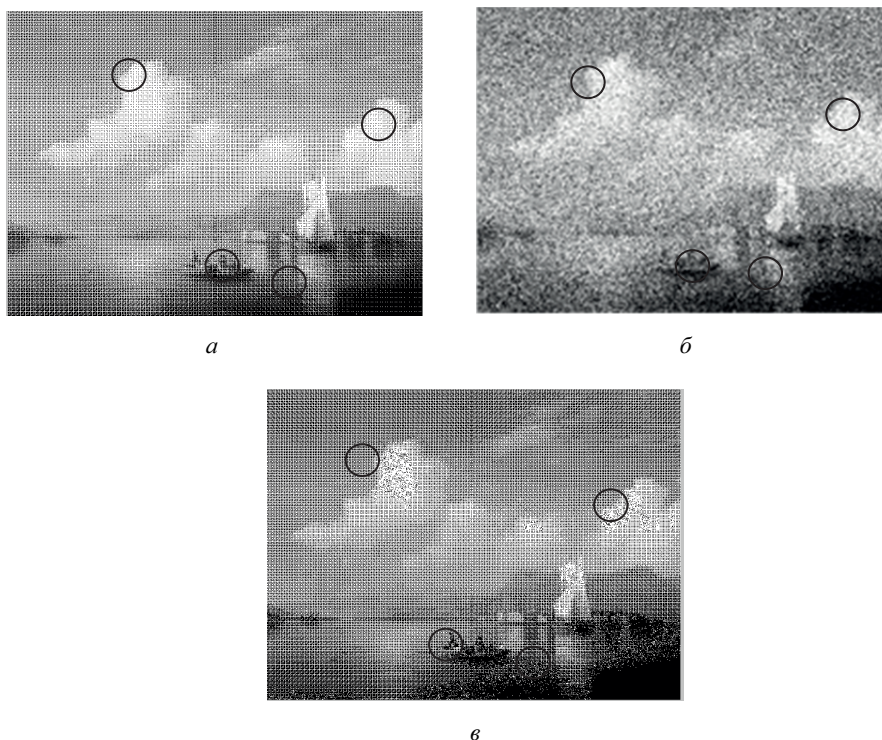
Проведен эксперимент печати оригинала изображения на лазерном принтере DocuPrint P8 (рис. 1) и печати на ризографе (рис. 2).



Рис. 1. Печать оригинала изображения на лазерном принтере

На рис. 2 представлены результаты обработки изображения предлагаемым программным продуктом с различными типами растривания (периодический, непериодический и гибридный).

На рисунке 2 видно, что наилучший результат изображения получен с использованием гибридного типа растривания (рис. 2, в), так как в области облаков и краев границ лучше прорисовка изображения, по сравнению с оригиналом и другими типами растра. Гибридное растривание объединяет периодическое и непериодическое растривание, которые применяются в зависимости от сюжета содержания оригинала. Непериодический растр в гибридном растривании используется для воспроизведения светов и теней, а периодический растр для воспроизведения полутонов.



**Рис. 2.** Результаты изображения с различными типами растривания:  
а — периодический; б — непериодический; в — гибридный

Готовое изображение получено с применением гибридного растривания с помощью интеллектуального продукта в автоматическом режиме со следующими действиями: загружено цветное изображение в формате .tiff; произведено конвертирование его в полутоновое изображение; определен тип изображения и его параметры; использован фильтр Laplacian; к типу изображения «photo» применен гибридный тип растривания; выведен результат подготовленного изображения для дальнейшей печати на ризографе.

Адаптивное растривание дает возможность повысить качество печати оттисков для ризографов путем адаптации профиля печати ризографа (обработка фильтрами и функциями библиотеки IPT MatLab) к конкретному типу цифрового изображения. Модель максимально упрощает изготовление тиража: дает возможность обработать изображение и текст для получения наилучшего результата печати на ризографе [3–4].

## Литература

- [1] Sulim P., Yudenkov V. Hardware and Software of the Risograph Printing Intelligent Module on the Basis of Model Operation. *Proceeding of the 5th International Scientific Conference «Printing Future Days 2013»*, Chemnitz, Germany, 2013, pp. 355–366.
- [2] Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. *Цифровая обработка изображений в среде MATLAB*. Москва, Техносфера, 2006, 616 с.

- [3] Сулим П. Е., Юденков В. С. Компьютерное моделирование и повышение качества ризографической печати. *Системный анализ и прикладная информатика*, 2014, № 4, с.49–53.
- [4] Сулим П. Е., Юденков В.С. Интеллектуальный модуль для ризографического оборудования. Будущее машиностроения России: Сб. тр. Седьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, 24–27 сентября 2014 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, с. 451–453.

УДК 536.2+519.6

## **Валидация модели горения ЛОГОС — Аэрогидромеханика на примере задачи истекания многокомпонентной газовой смеси из сопла твердотопливного ракетного двигателя**

© Танненберг Илья Дмитриевич, Чирков Алексей Юрьевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, филиал ПАО «Компания “Сухой” “ОКБ Сухого”»

[ilya.berg@gmail.com](mailto:ilya.berg@gmail.com)

*В работе приведены результаты расчета истечения химически реагирующего многокомпонентного газа из упрощенного сопла, проведенного на отечественном программном продукте ЛОГОС — Аэрогидромеханика методами вычислительной газодинамики. Параметры газовой смеси, а также геометрические размеры сопла взяты из работ зарубежных исследователей [1, 2]. Выполнено сравнение результатов расчета отечественного кода с результатами расчета на коммерческих программах.*

**Ключевые слова:** *сверхзвуковое горение, модель горения EBU — Eddy Break Up, модель горения EDC — Eddy Dissipation Concept, вычислительная газодинамика и теплофизика, валидация.*

Расчет физических процессов, происходящих при работе твердотопливного ракетного двигателя, обычно проводят без моделирования процесса истекания реактивной струи в пространство. Это объясняется общей сложностью расчета сверхзвукового догорания двухфазной смеси в окружающей атмосфере. Скорость потока в струе продуктов сгорания может достигать гиперзвуковых значений, что крайне отрицательно сказывается на устойчивости расчета. Однако такой расчет позволил бы получить исчерпывающую информацию о воздействии струи на внешние тела, например, на поверхность планера боевого самолета при использовании оружия или о воздействии струи на поверхность пусковой платформы.

Зарубежные вычислительные коды обладают возможностями по расчету химии горения, что подтверждается опубликованными результатами. Последняя версия отечественного программного продукта ЛОГОС — Аэрогидромеханика также позволяет рассчитывать химические процессы горения. Модуль ЛОГОС — Аэрогидромеханика предназначен для расчета несжимаемых и сжимаемых течений вязкого газа, а также

для расчета переноса теплоты в твердом теле. Для успешного внедрения отечественного программного обеспечения в эксплуатацию обязательно необходимо провести валидацию, т. е. убедиться в способности вычислительной модели качественно и количественно верно описывать физические процессы.

В данной работе представлено сравнение результатов расчета догорания однофазной многокомпонентной газовой смеси в атмосферном пространстве, проведенного с использованием в отечественном программном продукте ЛОГОС — Аэрогидромеханика и его коммерческих аналогов.

Работа основана на постановке задачи, изложенной в статьях [1]. На рис. 1 приведена упрощенная геометрия ТТРД, которая использовалась авторами статей [1, 2].

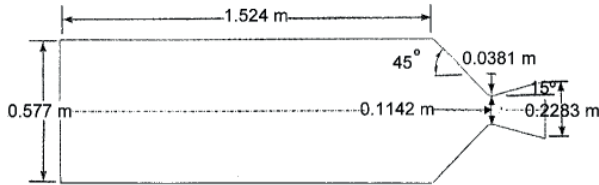


Рис. 1. Геометрия ТТРД

Была построена неструктурированная гексагональная сеточная модель сопла с областью истекания (рис. 2), для которой было проведено адаптивное сгущение в области пространства, в котором присутствует сверхзвуковой поток.

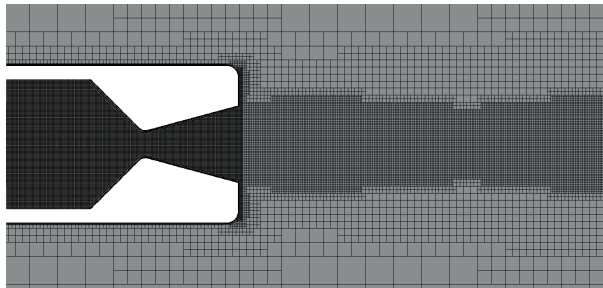


Рис. 2. Сеточная модель сопла с областью истекания

В работе проведено моделирование многокомпонентного истекания с химическими превращениями (рис. 3). Для моделирования химических превращений использована одноступенчатая реакция горения водорода:

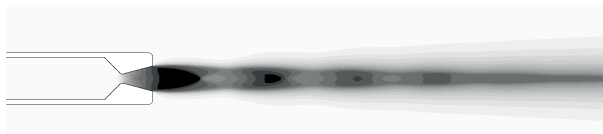
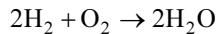


Рис. 3. Поле истечения реактивной струи ТТРД

## Литература

- [1] *Numerical Simulation of Distributed Combustion in Solid Rocket Motors with Metalized Propellant*, Jayant S. Sabnis, Pratt and Whitney, United Technologies Corporation, East Hartford, Connecticut.
- [2] *Mechanical Erosion of Graphite Nozzle in Solid-Propellant Rocket Motor*, Piyush Thakre, Georgia Institute of Technology, 2013.
- [3] Thakre P., Yang V. Chemical Erosion of Carbon–Carbon/Graphite Nozzles in Solid-Propellant Rocket Motors. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, vol. 24, no 4.

УДК: 004.896

## **Бортовая информационно-измерительная и управляющая система беспилотного летательного аппарата, предназначенного для монтажа устройств мониторинга высоковольтной воздушной линии электропередачи**

© Ургапов Владимир Александрович, Жулев Владимир Иванович

Россия, г. Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет

[vurgapov@yandex.ru](mailto:vurgapov@yandex.ru)

*Рассмотрена функциональная схема бортовой информационно-измерительной и управляющей системы беспилотного летательного аппарата, предназначенного для монтажа устройств мониторинга высоковольтной воздушной линии электропередачи, основное назначение которой — обеспечение полуавтоматического монтажа мультикоптером датчиков на линию электропередачи. Данная система позволяет решить задачу энергосбережения и энергоэффективности, является актуальной, практически реализуемой и коммерциализуемой в краткосрочной перспективе.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат (БПЛА), линия электропередачи, монтаж, устройство мониторинга, полетный контроллер.

Под беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) понимается любой летательный аппарат без экипажа на борту.

Беспилотный летательный аппарат может быть использован, когда необходимо за ограниченное время провести монтаж малоразмерных объектов, например, электронных датчиков с автономным питанием и беспроводным каналом связи, в условиях труднодоступности или повышенной опасности. За рубежом активно применяют автономные устройства мониторинга высоковольтных линий электропередачи, которые устанавливаются непосредственно на провод и позволяют с высокой точностью определить реальную пропускную способность ЛЭП и использовать ее скрытые резервы. В России опытную систему мониторинга ЛЭП эксплуатировал холдинг «МРСК». В рамках этой пилотной программы в различных регионах России было установлено несколько десятков устройств мониторинга [1].

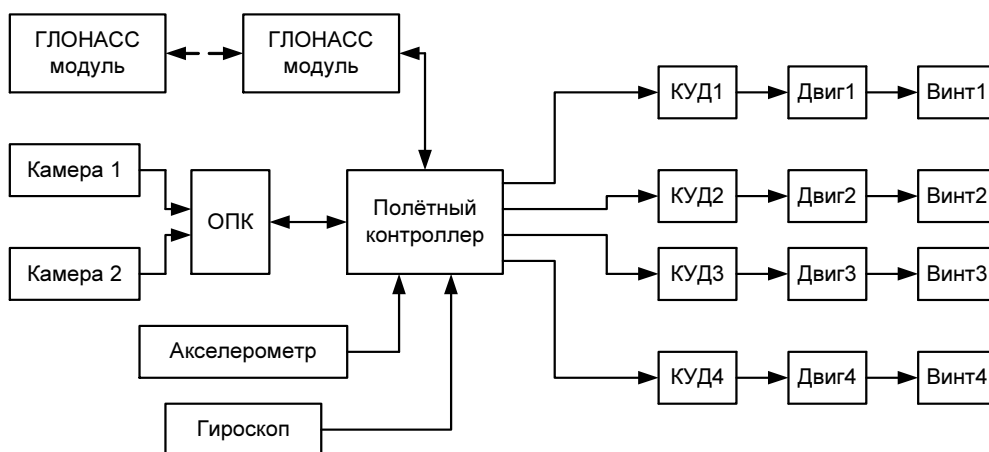
До настоящего момента монтаж таких устройств на ЛЭП производится человеком вручную. Монтажник доставляется к линии автоподъемником или вертолетом. В качестве альтернативы целесообразно использовать БПЛА, в этом случае задача доставки и монтажа датчиков может быть решена:

- дешевле (экономический эффект по сравнению с ручным монтажом с использованием автовышки и вертолета составляет десятки миллионов рублей);
- безопаснее (в случае если необходимо работать с ЛЭП без ее предварительного отключения, для человека — монтажника это представляет собой смертельную опасность);
- в более труднодоступных местах (например, где автоподъемник не поместится или его будет невозможно устойчиво установить) [2].

Наиболее подходящий для решения подобной задачи тип БПЛА — мультикоптер с 4–6 винтами (квадрокоптер или гексакоптер), который должен уметь выполнять следующие действия:

- полет с закрепленным устройством мониторинга ЛЭП от места запуска до провода;
- распознавание провода и посадка на него путем стыковки;
- достижение стабильного положения на проводе;
- монтаж устройства;
- расстыковка с проводом, возвращение в точку старта.

На рис. 1 представлена функциональная схема бортовой информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера, предназначенного для монтажа устройств мониторинга высоковольтной воздушной линии электропередачи.



**Рис. 1.** Функциональная схема бортовой информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера:

ОПК — одноплатный компьютер; КУД — контроллер управления двигателями; Двиг — двигатель

Центральным узлом БПЛА является полетный контроллер, который анализирует показания различных датчиков и, в зависимости от этих показаний выдает команды управления двигателям, которые вращают винты квадрокоптера. Контроллеры управления двигателями — промежуточные (интерфейсные) звенья системы, основное назначение которых состоит в преобразовании сигналов полетного контроллера в форму, воспринимаемую двигателями.



Для выполнения задачи монтажа устройств мониторинга на ЛЭП квадрокоптеру достаточно иметь следующие датчики:

- гироскоп;
- акселерометр;
- два модуля ГЛОНАСС (аналог — GPRS) — бортовой и наземный;
- две камеры — полетная и монтажная.

Беспилотный летательный аппарат имеет шесть степеней свободы, и его положение в пространстве в некоторый момент времени полностью описывается шестью величинами — тремя декартовыми координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и тремя углами Эйлера — Крылова  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  [3].

Гироскоп оценивает линейные ускорения, а акселерометр — угловые ускорения квадрокоптера. Линейные ускорения являются вторыми производными декартовых координат, а угловые — вторыми производными углов Крылова. Таким образом, дважды проинтегрировав показания этих датчиков, полученные в некоторый момент времени, можно полностью описать положение квадрокоптера в пространстве в этот момент времени.

Бортовой и наземный ГЛОНАСС — модули представляют собой приемники и передатчики ГЛОНАСС, которые позволяют квадрокоптеру сообщать земной станции управления свое текущее местоположение и в случае необходимости ручной коррективы полета получать координаты следующей точки назначения.

Для решения поставленной задачи (монтаж датчиков на ЛЭП) БПЛА недостаточно датчиков, определяющих его местоположение в пространстве. Дополнительно в бортовую систему управления добавляются две камеры, одна из которых — «полетная», предназначенная для того, чтобы издалека «увидеть» линию электропередачи и сблизиться с ней, а другая — «монтажная», позволяющая зрительно контролировать процесс установки устройства на провод.

Для обработки цифровых изображений обеих камер на борту БПЛА в реальном времени необходимо дополнительное мощное вычислительное устройство. Это может быть ПЛИС, цифровой сигнальный процессор, одноплатный компьютер и т. п. Преимущество одноплатного компьютера — наличие встроенной операционной системы Linux (или Windows Compact Edition) и, как следствие, удобство работы с мощной библиотекой компьютерного зрения OpenCV. В качестве примера конкретного ОПК можно привести Raspberry Pi 2.

К основным практическим трудностям, возникающим при реализации данного проекта относятся:

- необходимость защиты БПЛА от коронных разрядов при работе на линии в режиме «live line» (без отключения);
- разработка быстродействующего зажима для крепления устройства на проводе;
- разработка унифицированного корпуса для устройств мониторинга различных типов;
- увеличение времени полета БПЛА без подзарядки/смены бортовых аккумуляторов.

## Литература

- [1] Самарин А.В., Рыгалин Д.Б., Шкляев А.А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП. *Естественные и технические науки*, 2012, № 1, 2.
- [2] URL: <http://ibusiness.ru/special/Croc/drone/member-19> (дата обращения 01.04.2015).
- [3] Гуриянов А.Е. Моделирование управления квадрокоптером. *Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014, № 8.

## Экспертная система диагностики бортовых вычислительных средств

© Чжо Зин Хтут

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

*Диагностическая экспертная система предназначена для определения неисправностей бортовой цифровой вычислительной машины летательного аппарата. Рассматриваются технологии разработки диагностической экспертной систем на основе модели представления знаний, которая объединяет взаимодополняющие друг друга методы и средства представления и обработки знаний следующих моделей: фреймовой и продукционной. Фрейм-продукция позволяет добиться эффективной реализации динамической экспертной системы летательного аппарата.*

**Ключевые слова:** диагностика, динамическая экспертная система, неисправности аппаратных и программных средств, цифровая вычислительная машина, фреймовая модель.

Реализация алгоритмического обеспечения систем управления летательным аппаратом (ЛА) осуществляется в спецвычислителях и бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) Целью данной работы является создание прототипа диагностической экспертной системы определения неисправности БЦВМ — ДЭСОНБЦВМ [1–4].

При разработке ДЭСОНБЦВМ использованы методы структурного и объектного программирования, методы представления знаний, методы извлечения знаний, положения теории информационных семантических систем и методы баз данных.

Результатом работы стал прототип системы ДЭСОНБЦВМ, предназначенной для применения в ЛА для поиска неисправности, а также для анализа функционирования БЦВМ в целях повышения эффективности работы. Системы ДЭСОНБЦВМ позволит уменьшить временные затраты при поиске неисправности и повысить качество работы вычислительных машин.

Жизнеспособность и развитие информационных технологий объясняется тем, что современный ЛА крайне чувствителен к ошибкам в управлении. Ошибки и сбой в работе алгоритмического обеспечения приводят к снижению качества функционирования систем управления и могут привести к фатальным результатам.

Чрезвычайно важно понять, что точно вышло из строя в системе управления ЛА и как быстрее устранить неисправность. Иногда полезно выполнить и профилактическую диагностику техники, когда работает она, на первый взгляд, нормально, но есть подозрения на какие-то скрытые неполадки. Тем самым можно избежать серьезных неприятностей и дорогостоящего ремонта [1].

Возникающие проблемы можно устранить с помощью оболочки экспертной системы с возможностью накапливать знания в области диагностики вычислительной техники.

Быстро увеличивается число ЭВМ, находящихся в эксплуатации, и возрастает их сложность. Увеличение надежности систем приводит к тому, что поиск неисправных

элементов проводится сравнительно редко. Поэтому наряду с повышением надежности систем наблюдается тенденция потери эксплуатационным персоналом определенных навыков отыскания и устранения неисправностей. Таким образом, возникает проблема обслуживания непрерывно усложняющихся вычислительных машин и систем в условиях, когда не хватает персонала высокой квалификации. В условиях полета функции контроля реализуются с помощью экспертной системы.

Система ДЭСОНВМ решает эту проблему путем создания систем автоматического диагностирования неисправностей. Система автоматического диагностирования представляет собой комплекс программных и аппаратурных средств.

Введем некоторые определения, которые потребуются в дальнейшем при описании различных систем автоматического диагностирования. Различают системы определения и функционального диагностирования. В системах тестового диагностирования воздействия на диагностируемое устройство (ДУ) поступают от средств диагностирования (СД). В системах функционального диагностирования воздействия, поступающие на ДУ, заданы рабочим алгоритмом функционирования. Для выбора метода диагностики и определения первичных и вторичных симптомов неисправности необходимо уметь классифицировать неисправность, так как первичный отказ часто вызывает целый спектр отказов вторичных, являющихся следствием первичного и затеняющих причину неисправности.

#### Литература

- [1] Платонов Ю.М., Уткин Ю.Г. *Диагностика зависания и неисправностей компьютера*. Руководство пользователя, 2001, 320 с.
- [2] Неусыпин К.А. Системный синтез систем управления с интеллектуальной компонентой. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 3, с. 35–39.
- [3] Неусыпин К.А. Концептуальный синтез интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 6, с. 23–25.
- [4] Неусыпин К.А. Направления развития интеллектуальных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2002, № 12, с. 12–16.

УДК 681.513

## Исследование погрешностей инерциальных навигационных систем

© Чон Нгок Хьонг, Нгуен Динь Тхай

Социалистическая Республика Вьетнам, Ханойский государственный университет имени Ле Куи Дон, Ханойский технический институт

*Рассмотрены инерциальные навигационные системы летательных аппаратов, исследованы погрешности и причины их возникновения. Для построения высокоточных моделей погрешностей предложено использовать генетический алгоритм. Эффективность генетического алгоритма продемонстрирована с помощью данных лабо-*

*раторного эксперимента. Проведено сравнение генетического алгоритма, линейного тренда и алгоритма самоорганизации.*

**Ключевые слова:** *навигационная система, модель погрешностей, генетический алгоритм.*

Успешное решение задач управления сложными техническими системами во многом определяется уровнем развития измерительной техники. Эксплуатационные характеристики летательных аппаратов (ЛА) в большой степени определяются совершенством бортового оборудования, в частности, качеством информационно-измерительных сигналов, используемых для управления. Источником информационно-измерительных сигналов о местоположении, ориентации, скорости и других параметрах движения являются различные навигационные системы и комплексы [1–3].

Измерительные сигналы этих систем имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Повышение точности измерительной информации предполагает исследование причин возникновения погрешностей и последующую их компенсацию алгоритмическим путем [4, 5].

Для осуществления длительных полетов в непосредственной близости от поверхности Земли широкое распространение получили инерциальные навигационные системы (ИНС). Главным преимуществом автономных ИНС является их инвариантность к горизонтальным ускорениям. Однако погрешности автономных ИНС, обусловленные дрейфом гироскопов, акселерометров, а также другими возмущающими факторами, достигают значительных величин.

Наиболее распространенными являются ИНС, построенные по полуаналитической схеме. Комбинация чувствительных элементов позволяет получить ИНС с различными свойствами, имеющие разнообразные качественные характеристики. Грубые ИНС отличаются низкой точностью, относительно невысокой стоимостью и хорошо технологически отработаны. При необходимости повышение точности грубых ИНС обычно осуществляется путем привлечения дополнительной внешней информации от других измерительных систем.

Доминирующее влияние на суммарную погрешность ИНС в определении пройденного пути оказывает скорость дрейфа гироскопов. Систематическая скорость дрейфа гироскопов вызывает нарастающую со временем составляющую погрешности ИНС, а также колебательную составляющую с периодом Шулера.

Нарастающая с течением времени скорость дрейфа обуславливает появление погрешности ИНС, которую также можно представить в виде двух составляющих. Первая составляющая изменяется пропорционально квадрату времени функционирования ИНС, а вторая составляющая совершает колебания с периодом Шулера.

Погрешность ИНС, обусловленная неточностью выставки гиросtabilизированной платформы (ГСП) относительно плоскости горизонта, представляет собой синусоидальные колебания с периодом Шулера.

Суммарная погрешность ИНС в определении местоположения ЛА, обусловленная вышеперечисленными факторами, нарастает с течением времени.

Уравнения погрешностей автономной ИНС представляют собой уравнения погрешностей ориентации и уравнения погрешностей горизонтальных акселерометров [1].

На практике для разработки алгоритмического обеспечения, как правило, используются упрощенные уравнения погрешностей автономных ИНС [1].

Пренебрегая перекрестными связями, можно записать уравнения ошибок ИНС отдельно для каждого информационного канала.

Уравнение ошибок ИНС в этом случае для одного из горизонтальных информационных каналов будет иметь вид

$$x_k = \Phi x_{k-1} + G W_{k-1},$$

где

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \Phi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 - \mu T \end{bmatrix};$$

$$W_{k-1} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & AT\sqrt{2\beta} \end{bmatrix}.$$

Таким образом, получены уравнения ошибок ИНС в дискретной форме, которые используются при разработке алгоритмов [6–9].

Инструментальные погрешности можно разделить на погрешности акселерометров, интеграторов, гироскопов и ошибки выставки ГСП.

При функционировании ИНС на достаточно длительных интервалах времени погрешности могут достигать недопустимо больших величин. Поэтому необходимо корректировать ИНС посредством различных источников внешней навигационной информации либо компенсировать погрешности с использованием внутренних связей системы.

Алгоритмы компенсации погрешностей автономных ИНС за счет внутренних связей системы широко известны, применяются и детально разработаны [1–5]. Инерциальные навигационные системы, снабженные подобными алгоритмами, имеют остаточные погрешности, вызванные различными возмущающими факторами, соизмеримые с погрешностями, которые обусловлены динамическим дрейфом ГСП.

Для повышения точности ИНС эти погрешности необходимо компенсировать алгоритмическим путем.

Наиболее полно учесть все особенности характера изменения погрешностей ИНС, в частности конкретной ИНС со специфическими особенностями, с учетом особенностей полетного задания ЛА и его реализации, можно с помощью построения модели методом самоорганизации, нейронных сетей или генетического алгоритма (ГА) [10].

Генетические алгоритмы применяются при синтезе алгоритмического обеспечения высокоточных ИНС, так как позволяют построить наиболее точные модели исследуемого процесса изменения погрешностей конкретной ИНС.

Принцип функционирования ГА состоит в следующем: генерируется начальная популяция особей, отбираются несколько пар моделей случайным образом, реализуется кроссингвер, результат этого процесса составляет популяцию нового поколения.

Генетический алгоритм реализует основной принцип естественного отбора: чем лучше приспособлен индивидуум, тем с большей вероятностью он будет участвовать в скрещивании [11].

Следующий этап — моделирование мутации и формирование новой популяции. Затем цикл повторяется. При реализации ГА на борту ЛА популяция каждого следующего поколения содержит одинаковое количество особей, однако приспособленность в ней в среднем выше вследствие постоянного отбора. Операции отбора, скре-

щивания и мутации повторяются до тех пор, пока не будут достигнуты значения оптимального решения задачи в пределах заданной точности.

Полученная с помощью ГА модель применяется в качестве прогнозирующей модели в схеме коррекции ИНС при отключении внешнего источника информации [5–9].

В используемом ГА каждая хромосома состоит из двух частей, структурной и параметрической. Для создания новых хромосом отбираем случайно две хромосомы и скрещиваем их. После скрещивания двух хромосом получаем четыре новых хромосомы. Две хромосомы получаем скрещиванием только параметрических частей отобранных хромосом, а структурные части не меняем. Две другие новые хромосомы получаем после скрещивания и структурных, и параметрических частей отобранных хромосом.

При краткосрочном прогнозе классический тренд Демарка может определить тенденцию исследуемого процесса на минимальном интервале с удовлетворительной точностью, т. е. результаты, прогнозируемые с помощью линейного тренда и модифицированного тренда, совпадают по критерию точности. С возрастанием длительности прогноза использование линейного тренда в чистом виде не представляется возможным. Линейные тренды постоянного модифицируются нелинейной комбинацией, подобранной методом самоорганизации. Особенно на участках, где появляются существенно нелинейные характеристики в процессе функционирования исследуемого объекта. Путем модификации методом самоорганизации точность прогноза повышается и вычислительные затраты по времени и машинной памяти БЦВМ увеличиваются незначительно в связи с тем, что при селекции нелинейной комбинации используется скудный набор базисных функций.

В итоге погрешности, прогнозируемые модифицированным алгоритмом, являются самыми близкими к истинным величинам.

Для краткосрочного прогноза погрешности практически не отличаются, но время, затраченное на отбор нелинейной поправки, в 7 раз больше времени, затраченного на построение линейной модели. В долгосрочном прогнозе модифицированный тренд Демарка дает результаты в 2 раза точнее, чем линейный тренд в чистом виде.

Результаты моделирования подтверждают эффективность применения алгоритма самоорганизации и ГА для построения прогнозирующих моделей.

Таким образом, в случае, когда исчезает сигнал от внешнего по отношению к ИНС источника информации, с помощью линейного тренда, алгоритма самоорганизации и ГА осуществляется построение математической модели, которая используется в схеме коррекции ИНС в выходном сигнале [11, 12].

## Литература

- [1] Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В. Алгоритмические способы повышения точности автономных навигационных систем. *Тр. ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления*, 2010. № 3, с. 68–74.
- [2] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Оценка точности построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами. *Автоматизация и современные технологии*, 2014, № 6, с. 40–44.
- [3] Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А. *Навигационный комплекс*. Пат. на изобретение RUS 2016383 от 15.07.94 г.
- [4] Неусыпин К.А., Кэ Ф., Дзя Л.С. Управление и наведение ракет, основанное на теории дифференциальной геометрии. *Автоматизация и современные технологии*, 2012, № 1, с. 16–20.

- [5] Неусыпин К.А. Системный синтез систем управления с интеллектуальной компонентой. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 3, с. 35–39.
- [6] Неусыпин К.А., Шелухина Н.А. Коррекция навигационной информации посредством нелинейного фильтра Калмана. *Автоматизация и современные технологии*, 2000, № 4, с. 21–23.
- [7] Кэ Фан, Ким Чжэсу, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов. *Автоматизация и современные технологии*, 2013, № 2, с. 30.
- [8] Неусыпин К.А., Фам С.Ф. Повышение степени управляемости летательного аппарата. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 2, с. 21–25.
- [9] Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А. Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2005, № 7, с. 11–15.
- [10] Лукьянова Н.В. Требования, предъявляемые к процессу идентификации на основе разложения функционалов Винера. *Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Достижения вузовской науки»*. Москва, 2014, с. 183–188.
- [11] Чан Н.Х., Селезнева М.С. Разработка алгоритмов коррекции навигационных систем. *Актуальные вопросы фундаментальных наук. Тр. Междунар. науч. конф.* Москва, 2014, с. 155–158.
- [12] Кабакова А.С., Высокова М.С., Чан Н.Х. Методы коррекции навигационных систем легательных аппаратов. *Молодежный научно-технический вестник*, 2015, № 2, с. 18.

УДК 681.513

## **Использование моделей с повышенными степенями наблюдаемости для коррекции навигационных систем**

© Шарков Антон Анатольевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

*Представлен способ коррекции инерциальных навигационных систем с применением математических моделей погрешностей. В моделях погрешностей навигационных систем параметры модифицированы с помощью критерия степени наблюдаемости. Новые свойства моделей позволяют повысить точность компенсации погрешностей навигационных определений.*

**Ключевые слова:** инерциальная навигационная система (ИНС), компенсация погрешностей, скалярная модель погрешностей, степень наблюдаемости.

Ошибки в определении навигационных параметров с течением времени работы прибора нарастают и достигают неприемлемых величин. Поэтому для повышения точности ИНС используется дополнительный датчик информации, например, приемник ГЛОНАСС [1, 2].

Прототип навигационного комплекса (НК), включающий: ИНС (Компанав-2), приемник ГЛОНАСС, сигнал которого поступает в сумматор, где вычитается из сигнала с ИНС, с выхода сумматора сигнал, пропорциональный сумме ошибок ИНС и ГЛОНАСС, поступает во второй сумматор, где алгебраически вычитается из сигнала ИНС, пропорционального истинной информации о навигационных параметрах с

ошибкой ИНС. На выходе второго сумматора сигнал равен истинной навигационной информации с ошибкой ГЛОНАСС. Ошибка ИНС с течением времени нарастает, а ошибка ГЛОНАСС имеет постоянный уровень.

Но приемник ГЛОНАСС периодически отключается из-за активных и пассивных помех. На интервалах, когда ГЛОНАСС отключен, целесообразно прогнозировать компенсационный сигнал с выхода первого сумматора.

Для этого предлагается использовать априорную скалярную модель с высокой степенью наблюдаемости.

Пусть объект описывается уравнением вида

$$x_k = \Phi x_{k-1} + G w_{k-1},$$

где  $x_{k-1}$  — вектор состояния;  $w_{k-1}$  — вектор входного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием;  $\Phi$  —  $(n \times n)$ -матрица системы;  $G$  —  $(n \times 1)$ -матрица входного шума.

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_k = H x_k + v_k,$$

где  $z_k$  —  $m$ -мерный вектор измерений;  $H$  —  $(m \times n)$ -матрица измерений;  $v_k$  —  $m$ -мерный вектор измерительного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием, причем  $v$  и  $w$  некоррелированы между собой (т. е.  $M[v_j w_k]^T = 0$ ).

Скалярные алгоритмы представляют собой формулы с переменными коэффициентами, позволяющие проводить оценку отдельно каждой компоненты вектора состояния. Для синтеза скалярных алгоритмов оценивания необходимо сформировать скалярное уравнение модели для интересующей компоненты вектора состояния и приведенные измерения [3].

Сформированный вектор измерений  $z^*$  позволяет непосредственно измерять весь вектор состояния. Однако измерять весь вектор состояния возможно лишь после набора  $n$  измерений.

При отключении ГЛОНАСС ошибки автономной ИНС предлагается компенсировать путем прогноза угла отклонения гиросtabilизированной платформы (ГСП) и последующей компенсации в выходном сигнале ИНС. Для получения прогноза надо сформировать модель [1].

Уменьшить приведенный измерительный шум можно путем изменения коэффициентов при измерительных сигналах  $z$ .

Коэффициенты в уравнении измерений это элементы матрицы наблюдаемости  $S$ , представляющие собой комбинации элементов матриц  $H$  и  $\Phi$ . Обычно матрица измерений жестко задана, а матрица системы содержит параметры, которыми можно варьировать, например, период дискретизации. Вес, с которым измерительный шум присутствует в уравнении, определяется коэффициентами вида:

$$S_{11} = \frac{A_{11}}{\det S}, \dots, S_{mm} = \frac{A_{mm}}{\det S},$$

где  $A_{11}, \dots, A_{mm}$  — алгебраические дополнения соответствующих элементов матрицы наблюдаемости.

Увеличение детерминанта матрицы  $S$  приводит к уменьшению приведенного измерительного шума, а следовательно, к повышению точности определения вектора состояния [3, 4].



Известен критерий оптимизации в виде [3]

$$I_k = [\det S]^2 \rightarrow \max.$$

Для построения моделей погрешностей ИНС в автономном режиме функционирования (если автономному режиму предшествовал режим, корректируемый от внешних измерителей) использован подход самоорганизации [5]. В алгоритме самоорганизации в ансамбль критериев селекции включен критерий степени наблюдаемости. Предлагаемый подход заключается в формировании модели изменения угла отклонения ГСП для прогноза и увеличения периода дискретизации (шага вычислений  $T$ ) в модели в целях повышения ее точности.

### Литература

- [1] Джанджгава Г.И., Герасимов Г.И., Бабиченко А.В., Орехов М.И. Развитие методов и алгоритмов комплексной обработки информации бортового радиоэлектронного оборудования. *Авиакосмическое приборостроение*, 2015, № 8.
- [2] Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И. *Задача коррекции в инерциальной навигации*. Москва, Изд-во Моск. ун-та, 1982, 287 с.
- [3] Салычев О.С. *Скалярное оценивание многомерных динамических систем*. Москва, Машиностроение. 1987, 220 с.
- [4] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами. *Автоматизация и современные технологии*, 2014, № 6, с. 40–44.
- [5] Неусыпин К.А. Исследование критериев степени управляемости и наблюдаемости навигационных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2008, № 9, с. 18–22.

УДК 681.513

## Исследование качества наблюдения погрешностей грубой навигационной системы летательного аппарата

© Бабиченко Андрей Викторович, Неусыпин Константин Авенирович,  
Шарков Антон Анатольевич

Россия, г. Москва, Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

*Рассмотрен алгоритмический способ коррекции навигационных систем. Представлен численный критерий степени наблюдаемости погрешностей инерциальной навигационной системы. Проведен расчет численных значений степеней наблюдаемости угла отклонения гиростабилизированной платформы относительно сопровождающего трехгранника и скорости дрейфа платформы грубой инерциальной навигационной системы.*

**Ключевые слова:** алгоритмическая коррекция, степень наблюдаемости, погрешности навигационной системы.

Требования по надежности и точности, предъявляемые к измерительным системам летательного аппарата (ЛА), постоянно возрастают. Обеспечение требуемых качественных характеристик целесообразно осуществлять алгоритмическим способом, позволяющим достичь требуемого результата за короткое время с минимальными финансовыми затратами. Навигационные комплексы (НК) имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Компенсация погрешностей проводится с помощью алгоритмов оценивания, управления, прогнозирования и комплексирования, включающих математические модели, которые обладают различными свойствами. Придание желаемых свойств используемым моделям в схемах коррекции НК и навигационных систем является важной задачей при обеспечении их высокой точности и надежности.

При функционировании НК в режиме коррекции от внешних измерительных систем используется компенсация погрешностей с помощью комплексирования ИНС и внешнего источника навигационной информации. Навигационный комплекс включает: грубую инерциальную навигационную систему (ИНС) Ц-060; приемник ГЛОНАСС — модуль GloTOP 2,5G; новый блок формирования измерений, имеющих максимальную степень наблюдаемости. В новом блоке для формирования измерений использован известный скалярный способ, но коэффициенты в каждой скалярной модели измерений определены оригинальным образом [1]. Для определения коэффициентов проводится вычисление матрицы наблюдаемости  $S$ , операция обращения этой матрицы и вычисление степеней наблюдаемости по оригинальному критерию. В критерий входят коэффициенты модели погрешностей ИНС (модель описывает динамику погрешностей ИНС), которые можно изменять в целях повышения степени наблюдаемости приведенных измерений (приведенных к каждой компоненте вектора состояния, включающего погрешности ИНС: ошибки в определении скорости, углы отклонения гиросtabilизированной платформы (ГСП) от плоскости горизонта и дрейфы ГСП). Например, в формулах предложено увеличить период дискретизации  $T$ , что приведет к увеличению степеней наблюдаемости угла отклонения ГСП и дрейфа.

Критерий степени наблюдаемости использован в схемах коррекции навигационных систем [2–4].

Уравнения ошибок системы инерциальной навигации имеют вид

$$\begin{aligned}\delta V_k &= \delta V_{k-1} - gT\varphi_{k-1}; \\ \varphi_k &= \varphi_{k-1} - \frac{T}{R}\delta V_{k-1} + T\varepsilon_{k-1}; \\ \varepsilon_k &= T\varepsilon_{k-1},\end{aligned}$$

где  $\delta V_k$  — ошибка ИНС в определении скорости;  $\varepsilon_k$  — скорость дрейфа ГСП;  $\varphi_k$  — угол отклонения ГСП относительно сопровождающего трехгранника.

Определим дисперсию измерительного шума, приведенного к углу отклонения ГСП относительно сопровождающего трехгранника:

$$r_2^* = \frac{2}{g^2 T^2} r,$$

где  $r$  — дисперсия ошибки в измерении скорости, которая подлежит непосредственному измерению с помощью внешней информации.

Определим степень наблюдаемости угла отклонения ГСП относительно сопровождающего трехгранника:

$$\lambda_2 = \frac{M[\varphi^2]gT^2}{M[\delta V^2]2}.$$

Степень наблюдаемости скорости дрейфа ГСП определяется аналогично:

$$\lambda_3 = \frac{M[\varepsilon^2]}{M[\delta V^2] \left[ \frac{5}{g^2 T^4} + \left( \frac{1}{gT^2} + \frac{1}{R} \right)^2 \right]}.$$

Подставим числовые значения параметров, полученные в результате полунатурного эксперимента с реальной системой Ц-060 разработки Раменского приборостроительного конструкторского бюро (РПКБ). Ошибка ИНС в определении скорости равна 60 м/мин, угол отклонения платформы относительного сопровождающего трехгранника —  $2,10^{-4}$  рад, скорость дрейфа —  $10^{-5}$  рад/мин, период дискретизации выбран равным 1 мин. В результате получим, что степень наблюдаемости угла отклонения ГСП относительно сопровождающего трехгранника равна 0,01, а степень наблюдаемости скорости дрейфа гиросtabilизированной платформы — 0,0001.

Критерий степени наблюдаемости позволяет определить количественную оценку наблюдаемости каждой компоненты вектора состояния систем, что в практических приложениях дает возможность выбрать оптимальные параметры приведенных измерений в НК.

## Литература

- [1] Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Оценка точности алгоритма построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами. *Автоматизация и современные технологии*, 2014, № 6, с. 40–44.
- [2] Неусыпин К.А., Фам С.Ф. Повышение степени управляемости летательного аппарата. *Автоматизация и современные технологии*, 2007, № 2, с. 21–25.
- [3] Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А. Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем. *Автоматизация и современные технологии*, 2005, № 7, с. 11–15.
- [4] Чан Н.Х., Селезнева М.С. Разработка алгоритмов коррекции навигационных систем. *Актуальные вопросы фундаментальных наук. Тр. Междунар. науч. конф.* Москва, 2014, с. 155–158.

# Содержание

---

## Секция А. Машиностроительные технологии

### А1. Металлорежущие станки

<i>Бочкова Д.Е., Бобков М.Н.</i> Расчет параметров станочного зацепления при формообразовании круговых зубьев шестерни цилиндрической передачи .....	3
<i>Исаченко А.С., Казимиров Д.Ю.</i> Быстрая переналадка станков с ЧПУ на авиазаводах .....	8
<i>Кострюков А.А., Смолкина Т.В., Косарев И.В., Щедрин А.В.</i> Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки .....	13
<i>Фаттахов Х.И., Стяжкин М.Н, Мухутдинов А.Р.</i> Применение методов Lean Production при проектировании производственных линий как фактор повышения эффективности производства машиностроительного предприятия .....	14

### А2. Инструментальная техника и технологии

<i>Акинъшин Р.Н.</i> Снижение технологической себестоимости и обеспечение высотных параметров шероховатости поверхности при токарной обработке .....	20
<i>Ардашев Д.В.</i> Прогнозирование размера площадки затупления абразивного зерна для различных технологических условий .....	24
<i>Леквешвили М.А., Оленин Л.Д.</i> К разработке методики расчета силовых параметров фрезерования на основе аналитической модели косоугольного резания .....	27
<i>Новичков А.А., Савин И.А.</i> Проектирование угловой фрезерной головки .....	29
<i>Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н., Емельянов С.Г.</i> Анализ зависимостей параметров постоянных магнитов и их установки на усилие вибрации при сверлении с наложением осевых колебаний .....	34
<i>Шкарупа М.И., Рогов В.А.</i> Основные направления развития алмазных и нитридных инструментов для обработки конструкционной керамики .....	38

### А3. Технологии машиностроения

<i>Агаповичев А.В., Сотов А.В., Смелов В.Г.</i> Применение технологии селективного лазерного плавления при производстве деталей малоразмерных газотурбинных двигателей .....	43
<i>Акинъшин Р.Н.</i> Группирование деталей на основе оценок подобия маршрутных технологических процессов их изготовления для формирования поддетально-специализированных участков в цехе .....	46
<i>Аль-Шахейти Ареф Мохаммед Ахмед, Евдокимов Ю.К.</i> Электромагнитный подшипник, активный магнитный подвес .....	50
<i>Арзыбаев А.М., Базров Б.М.</i> Поиск системы технологической оснастки .....	51
<i>Афонин А.В., Носова Е.А.</i> Экспериментальное исследование температурного поля в очаге резания при фрезеровании сплава ВТ-6 .....	53
<i>Власов А.М., Полетаев В.А.</i> Исследование изменения температуры в рабочем зазоре магнитожидкостных герметизаторов с применением программы ANSYS .....	56
<i>Гальченко К.В., Лукиенко Л.В.</i> К вопросу определения положения выходного звена шатного манипулятора с учетом внецентренного приложения нагрузки .....	58
<i>Горбунов А.С., Макаров В.Ф.</i> Современные методы исследования наследственной природы технологических остаточных напряжений зубьев спирально-конических шестерен .....	60

<i>Золотарев А.В., Кондаков А.И.</i> Реализация алгоритма вариативно-ситуационного формирования маршрутных процессов ремонта деталей .....	65
<i>Клевцова Е.М., Клеветов Д.В., Гаврилова В.С.</i> Повышение эффективности современных машиностроительных предприятий по программе технического перевооружения (на примере АО «ВНИИ “Сигнал”»).....	67
<i>Кротов А.О., Печенкин М.В.</i> Особенности формообразования зубьев зубчатых колес на заготовке вида однополостной гиперboloид вращения .....	72
<i>Курочкин А.А.</i> Оптимизация процессов механической обработки молибдена .....	74
<i>Нгуен Ван Хуан, Зайдес С.А.</i> Влияние внутреннего трения на изгибную жесткость длинномерных валов .....	78
<i>Носов М.В., Кондаков А.И.</i> Коррекция положения инструмента при обеспечении качества изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ.....	82
<i>Полуглазкова Н.В., Волков Д.И.</i> Моделирование тепловых процессов при профильном глубинном шлифовании .....	88
<i>Попова А.В., Переверзев П.П.</i> Проектирование оптимальных циклов внутришлифовальной обработки в многомерном пространстве управляющих параметров .....	91
<i>Степанов А.А., Хаймович А.И.</i> Управление параметрами механической обработки на основе нейросетевых моделей .....	96
<i>Чугуевская С.В., Безъязычный В.Ф.</i> Определение натяга в прессовых соединениях узлов ГТД с одновременным учетом шероховатости и степени наклепа поверхностей соединяемых деталей .....	99
<i>Шамсрахманов Т.М., Печенкин М.В.</i> Особенности геометрического моделирования зубчатых колес на заготовке вида однополостной гиперboloид вращения .....	103
<i>Шустов А.И., Солер Я.И.</i> Влияние твердости высокопористых нитридных кругов на шероховатость пластин Р9М4К8 при маятниковом шлифовании .....	106

#### **А4. Метрология и взаимозаменяемость**

<i>Богомолова С.А., Лукашов Ю.Е.</i> Разработка методики оценки показателей достоверности при проведении измерительного контроля тонкопленочных фотозлектрических модулей .....	111
<i>Ермаков К.С., Тумакова Е.В.</i> Система для измерения параметров электродвигателя .....	115
<i>Коленкин А.В.</i> Об оптимизации выбора схем базирования обеспечивающих точность измерений на координатно-измерительных машинах .....	116
<i>Комшин А.С.</i> Эффективность и техническое регулирование информационно-метрологического обеспечения объектов машиностроения.....	118
<i>Крансуцкая А.А., Тумакова Е.В.</i> Применение методов зондовой микроскопии для исследования объектов машиностроения .....	122
<i>Масленникова Е.В., Тумакова Е.В., Комшин А.С.</i> О возможности применения измерительного контроля адгезивных соединений электрорезистивными, емкостными и акустическими методами .....	125
<i>Мисюра Я.Э., Комшин А.С.</i> Разработка методики исследования параметров сигнала с первичного преобразователя фазохронометрической системы .....	130
<i>Ружицкая Д.Д., Комшин А.С.</i> Обзор возможностей программы Gwyddion на примере исследования искусственного опада .....	133
<i>Сырицкий А.Б., Комшин А.С.</i> Изучение процесса изнашивания токарного инструмента в фазохронометрическом представлении .....	135
<i>Тумакова Е.В., Комшин А.С.</i> Перспективы развития и основные проблемы в области диагностики электромеханических систем .....	137
<i>Умманова О.В., Киселев М.И.</i> Частотный метод регистрации образования трещин на валопроводе.....	140
<i>Хохолоков А.А., Марков Б.Н.</i> Разработка спектра трехмерных бесконтактных измерительных систем на базе фотограмметрии с применением новых подходов для объектов в ближней зоне.....	143

**А5. Литейные технологии**

*Блохин А.В., Лось А.М., Бельский С.Е.* Анализ факторов, влияющих на характеристики усталости литейных алюминиевых сплавов, изготовленных с использованием вторичного сырья ..... 145

*Варфоломеев М.С., Моисеев В.С.* Исследование алюмоорганического связующего в литье по выплавляемым моделям ..... 149

*Верзюх С.С., Знаменский Л.Г.* Применение алюмоборфосфатного концентрата при изготовлении термостойкой оснастки для высокотемпературного оборудования ..... 150

*Иванова Л.А., Кузнецов С.А.* Изменение зависимости прочности жидкостекольных стержней за счет введения инновационного модификатора ..... 154

*Карпенко Д.Н., Вербицкий В.И.* Построение расширенной механики зернистых сред для моделирования процессов виброуплотнения при литье по газифицируемым моделям ..... 156

*Ларичев Н.С., Коротченко А.Ю.* Исследование влияния двуслойной деформации на образование пористости ..... 161

*Шляпцева А.Д., Петров И.А., Ряховский А.П.* Исследование влияния комплексного модифицирующего флюса на микроструктуру силуминов ..... 163

*Озерова Е.С., Романов М.С., Коротченко А.Ю.* Факторы, влияющие на процесс выгорания глин в разовых песчано-глинистых формах ..... 166

*Савохина О.М., Коротченко А.Ю.* Сравнение методов критериальной оценки образования усадочной пористости для отливок из алюминиевых сплавов ..... 168

**А6. Технологии обработки давлением**

*Алимов А.И., Евсюков С.А.* Совершенствование технологического процесса горячей раскатки колец из сплава ВТ6 ..... 170

*Алимов А.И., Шитиков А.А., Евсюков С.А.* Определение кривых текучести сплава ВТ6 с помощью инверсного анализа ..... 172

*Аленов М. Г., Белоуров О.А.* Моделирование технологического процесса поперечно-клиновой прокатки заготовки для горячей объемной штамповки коленчатого вала ..... 174

*Виноградов А.И., Шибиков В.Г.* Анализ разделительных операций листовой штамповки и автоматизированная оценка характеристик металла ..... 178

*Кашапова Л.Р., Утяганов Р.Ф., Панкратов Д.Л.* Управление надежностью технологического процесса холодной листовой штамповки на базе интеллектуальной системы ..... 182

*Милевская Т.В., Семенов Е.И.* Изотермическое деформирование колеса самолета ..... 185

*Рыжов П.А., Евсюков С.А.* Вывод аналитических зависимостей для краевого расширения при обжиме трубчатых заготовок в коническую матрицу с выходом в цилиндрическую часть ..... 188

*Серёжкин М.А., Мельников Э.Л.* Влияние финишного антифрикционного безабразивного покрытия на усилие формоизменения при вытяжке деталей из сплава АМГ6БМ ..... 189

*Сомкина А.С., Власов А.В.* Модели износа для прогнозирования стойкости инструмента для горячей штамповки ..... 192

*Ступников В.В., Евсюков С.А.* Математическое моделирование складкообразования в процессе однопереходной вытяжки в программном комплексе AutoForm ..... 194

*Толкушкин А.О., Керимов Р.Р., Лежнев С.Н.* Изучение влияния циклического деформирования в ступенчато-клиновых бойках на характер разрушения деформируемого металла ..... 198

*Шитиков А.А., Власов А.В.* Использование инверсного анализа для определения параметров реологической модели материала для расчета процессов сферопластической формовки ..... 202

*Яковлева Е.О., Евсюков С.А.* Способы получения конических переходников ..... 205

## **A7. Технологии сварки и диагностики**

<i>Баранов А.А., Люшинский А.В.</i> Применение сварки трением с перемешиванием для получения неразъемных соединений алюминиевых сплавов .....	209
<i>Бокарев Д.И.</i> Методы контроля качества сварных соединений полупроводниковых изделий .....	212
<i>Вашин С.А., Коретин Г.Ф.</i> Опыт применения современного оборудования для пайки в среде водорода узлов электровакуумных приборов .....	216
<i>Гуркин С.В., Коберник Н.В.</i> Особенности формирования антифрикционных покрытий на базе сплавов баббита при плазменно-порошковой наплавке.....	220
<i>Заец Н.П., Rogov Н.В., Чижов И.А.</i> Тепловизионный контроль многослойных конструкций .....	221
<i>Линник А.А., Коберник Н.В.</i> Модифицирование металла шва с помощью дополнительной горячей присадки, содержащей наноразмерные тугоплавкие частицы .....	224
<i>Панкратов А.С., Коберник Н.В.</i> Модифицирование металла шва ультрадисперсными тугоплавкими частицами .....	226
<i>Пицык В.С., Муравьев В.И.</i> Состав, структура и свойства диффузионных соединений, полученных прессовой посадкой, деталей из титановых сплавов авиационного назначения.....	227

## **A8. Материаловедение**

<i>Барамыкина М.В., Титова Ю.В.</i> Модель реакции СВС-Аз (на примере получения нанопорошка нитрида алюминия).....	230
<i>Белова Г.С., Титова Ю.В.</i> Получение нитрида кремния по азидной технологии СВС .....	232
<i>Власова Д.В., Плохих А.И.</i> Влияние параметров ламинарной структуры на хладостойкость многослойных материалов.....	235
<i>Горшенин А.С.</i> Моделирование конвективного теплообмена при струйном нагреве алюминиевого рулона горячим воздухом.....	237
<i>Гуляев А.М., Гавзе А.Л.</i> Исследование влияния состава и режимов термической обработки на свойства высоколегированных титановых сплавов со структурой механически стабильной бета-фазы .....	241
<i>Дильмиева Э.Т., Крапошин В.С., Коледов В.В.</i> In-situ-исследования мартенситного перехода в сплаве Гейслера $Ni_{2,16}Mn_{0,84}Ga$ в оптическом микроскопе в сильных магнитных полях до 14 Тл .....	243
<i>Дин Кай Цзянь, Семенов М.Ю.</i> Влияние легирующих добавок на повышение эксплуатационных свойств жаропрочных никелевых сплавов (состояние проблемы) .....	245
<i>Логачева А.И., Жукова Т.Г., Курганова Ю.А.</i> Формирование заданного комплекса свойств из гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП.....	249
<i>Ионов М.К., Латухин Е.И.</i> Получение композита Al-TiC в расплаве при пониженной температуре.....	251
<i>Коваленко Д.А., Петров В.В.</i> Исследование морфологии поверхности пленок цирконата-титаната свинца, сформированных на кремниевых подложках.....	253
<i>Ковальчук А.В., Константинов В.М.</i> Инженерия поверхности стальных деталей с использованием химико-термической обработки и вакуумных ионно-плазменных технологий .....	256
<i>Ковальчук А.В., Константинов В.М.</i> Исследование микротвердости поверхности армо-железа после диффузионного борирования и нанесения покрытия $TiAlN$ .....	260
<i>Костенко Ю.В., Унчикова М.В., Базылева О.А.</i> Повышение длительной прочности интерметаллидного сплава ВКНА-1В после высокотемпературного отжига .....	264
<i>Лопатина Ю.А., Курганова Ю.А.</i> Фрактографическое исследование изломов дисперсно-упрочненного алюмоматричного композиционного материала .....	266
<i>Маркова Е.В., Фомичева Н.Б.</i> Влияние пористости на мультифрактальные характеристики наплавочных материалов .....	269

<i>Мартынюк А.М., Муравьев В.И.</i> Влияние фазового наклепа на структуру и свойства конструкционных сталей.....	271
<i>Минаков А.А., Плохих А.И.</i> Изучение влияния углерода на положение критических точек в многослойных стальных материалах.....	274
<i>Носова Е.А., Гречников Ф.В.</i> Применение термодинамического анализа к расчету размера зерна в сплаве АМгб.....	278
<i>Путырский С.В., Плохих А.И.</i> Исследование механизма разрушения многослойных металлических материалов в условиях одноосного растяжения.....	281
<i>Раку А.А., Муравьев В.И., Бахматов П.В., Мазур С.П.</i> Исследование влияния параметров технологического процесса сварки алюминиевого трубопровода в целях снижения уровня дефектности сварных соединений.....	284
<i>Суслина А.А., Пугачева Т.М.</i> Экспертиза разрушения ниппельной части замка бурильной трубы.....	288
<i>Фам Хонг Фу, Пучков Ю.А.</i> Прогнозирование коррозионных свойств изделий из термически упрочняемых алюминиевых сплавов.....	291
<i>Хисамутдинова А.В., Титова Ю.В.</i> Анализ методов получения нанопорошка нитрида алюминия.....	293
<i>Хусаинова Т.Н., Бичуров Г.В.</i> Получение композиции нанопорошков AlN-TiN в режиме СВС-АЗ.....	296
<i>Шкляр Н.Е., Смирнов А.Е.</i> Технологические аспекты процесса жидкостного борирования сталей и чугунов.....	301
<i>Шоломова А.В., Бичуров Г.В.</i> Получение нитрида алюминия по азидной технологии СВС.....	307

**A9. Промышленный дизайн**

<i>Барсукова Е.М., Синельников М.А.</i> Индивидуальное гусеничное транспортное средство.....	312
<i>Брекалов В.Г.</i> Выбор метода оптимизации ресурсов вуза с целью обеспечения физического моделирования при реализации опытно-конструкторских работ и учебного процесса.....	317
<i>Закревская Т.И., Михеева М.М.</i> Многофункциональный сегмент жилой зоны орбитальной станции.....	319
<i>Козырева М.А., Синельников М.А.</i> Спортивно-игровая пространственная система «Рета».....	324
<i>Кулазина Г.В., Синельников А.С.</i> Дизайн-проект тренажера для реабилитации пациентов с ограниченной подвижностью рук.....	329
<i>Михеева М.М.</i> Зачем нужен дизайн в техническом вузе.....	333
<i>Спаская Д.Д., Терехова Н.Ю.</i> Интеграция методов системного дизайн-проектирования в научно-исследовательские работы.....	335
<i>Шайманова Е.Н.</i> Дизайн-исследования предметно-пространственного компонента образовательной среды.....	339

**A10. Оборудование и технологии прокатки**

<i>Берестнев С.А., Соколова О.В.</i> Разработка инновационного способа изготовления заготовок для инъекционных анкерov.....	342
<i>Дронов А.И., Комкова Т.Ю.</i> Методика расчета калибровки рабочих валков при поперечно-винтовой прокатке ребристых труб.....	344
<i>Елин А.Ю., Соколова О.В.</i> Типы калибровки инструментов формовочных станov для производства прямошовных труб.....	348
<i>Комков А.Е., Миронова М.О., Соколова О.В.</i> Повышение качества особотонкостенных труб, полученных методом холодной периодической прокатки.....	349
<i>Лагошина Е.В., Соколова О.В.</i> Экспериментальное исследование осевых усилий в станах холодной периодической прокатки труб.....	350



Солдатов Е.А., Мунтин А.В., Червонный А.В., Науменко В.В. Разработка и освоение технологии производства хладостойкого проката для электросварных труб в условиях литейно-прокатного комплекса АО «ОМК-Сталь» .....	352
--	-----

### **А11. Электронные технологии в машиностроении**

Евдокимов Г.М., Аваева Л.Г., Ревзин Г.Г., Тетеревятников А.С. Fab lab технология прототипирования изделий электронной техники с использованием фотолитографии.....	358
Адамова А.А., Адамов А.П. Автоматизация формирования показателей для оценки технологичности изделий .....	362
Алексеев М.А., Арабов Д.И. Линейные модели распознавания в системах машинного зрения .....	366
Бабурин А.С., Макарова М.В., Мартыненко М.А., Моисеев К.М. Монтаж и запуск жидкофазного магнетрона НМСА-52 на установке МВТУ-11-1 .....	370
Васильев Д.Д., Малеванная Е.И., Моисеев К.М. Сравнение типов вращения подложки при нанесении покрытий методом магнетронного распыления .....	374
Васильев Д.Д., Макарова Ю.С., Моисеев К.М. Исследование влияния различных растворов при жидкостной очистке на чистоту подложки и адгезионную прочность покрытий .....	378
Макарова Ю.С., Васильев Д.Д., Моисеев К.М. Технология формирования никелевых тонкопленочных электродов на стеклянных подложках методом магнетронного распыления через металлический трафарет .....	381
Глушко А.А. Применение оптимизации при калибровке моделей в системе приборно-технологического моделирования TCAD Sentaurus .....	385
Горелов Д.В., Власов А.И. Современные системы распознавания регистрационных знаков транспортных средств .....	389
Дебелов В.В., Козловский В.Н. Моделирование электротехнических систем легкового автомобиля .....	395
Долгин П.А., Базиников А.М. Моделирование методом конечных элементов магнитной системы магнитореологического дросселя гидравлического привода для прецизионного вакуумного оборудования .....	399
Журавлева Л.В., Аверьянихин А.Е. Обеспечение теплоотвода в гибридно-пленочных интегральных схемах с помощью тонких пленок .....	404
Журков А.П., Демин А.А., Силаев В.М. Адаптер для передачи адреса и данных из общей шины в Q-шину аппаратуры радиопеленгационной системы .....	408
Карпунин А.А., Лавров А.В., Макушина Н.В. Интегральная методика оценки показателей технологичности конструкций электронной аппаратуры при реализации синхронных технологий управления проектами .....	411
Колесников М.А., Юдин А.В., Кузнецов В.Е. Организация управления автоматизированным инструментом персонального цифрового производства .....	415
Саченко Е.А., Кузьменко А.В. Разработка стенда диагностики электрооборудования вагонов-цистерн .....	420
Саченко Е.А., Андриянов А.И. Математическое моделирование активных выпрямителей напряжения в режиме рекуперации .....	424
Семенов С.Г., Байкина Л.Р., Демин А.А., Шахнов В.А. Методы моделирования акустических передаточных функций для систем активного гашения шума .....	428
Демин А.А., Семенов С.Г., Силаев В.М., Власов А.И. Экспериментальное исследование обучающей системы формирования навыков каллиграфии .....	433

### **А12. Лазерные технологии в машиностроении**

Баранов Д.А., Якимова М.А., Мельников Д.М. Методика бесконтактной лазерной очистки стеклянных поверхностей .....	439
Баранов Д.А., Якимова М.А., Мельников Д.М., Шиганов И.Н. Фотометрический экспресс-анализ содержания взвешенных частиц в полидисперсных средах .....	440

<i>Быков А.А., Ставертий А.Я., Колчанов Д.С.</i> Разработка экспериментальной установки для изготовления деталей из металлических порошков .....	442
<i>Дубровин Г.Н., Герасимова Е.С., Шупенев А.Е.</i> Расчет тонкопленочного термоэлектрического модуля, изготавливаемого методом импульсного лазерного осаждения .....	445
<i>Егоров А.П., Гаврилова В.С., Воронов С.А.</i> Формирование поверхностей пар трения гидрообъемных передач с применением технологии лазерного термоупорчнения .....	449
<i>Кулиш А.М., Лукьянов М.В., Третьяков Р.С.</i> Изучение технологических особенностей выращивания заготовок на пятикоординатном комплексе.....	451
<i>Макаренко К.И., Ставертий А.Я., Третьяков Р.С.</i> Особенности газопорошковой лазерной наплавки покрытий лучом прямоугольного сечения .....	457
<i>Мельникова М.А., Якимова М.А., Мельников Д.М.</i> Методика контроля механических примесей в маслах при помощи лазерного излучения.....	462
<i>Нигай А.Р., Ощепков Д.С., Ставертий А.Я.</i> Исследование структуры и механических свойств тонкостенных объектов, полученных многослойной лазерной наплавкой.....	466
<i>Савкин А.Н., Сидоровичина Т.Ю., Тимошенко В.А., Голубенко Ю.В.</i> Импульсная лазерная абляция в жидкости фемто- и нано-секундными источниками. Особенности процесса ....	469

### **А13. Реновационные технологии в машиностроении**

<i>Валяйчиков А.В., Есов В.Б.</i> Модернизация системы охлаждения зоны резания токарного станка с ЧПУ 16К20Ф3 .....	474
<i>Кирейнов А.В., Есов В.Б.</i> Анализ современных СОТС и присадок, используемых при резании труднообрабатываемых материалов .....	476
<i>Смолкина Т.В., Косарев И.В., Сергеев Е.С., Щедрин А.В.</i> Формирование очагов деформации при комбинированной обработке в условиях применения металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие «эффект безызносности при трении Гаркунова — Крагельского» .....	479
<i>Никифоров И.А., Есов В.Б.</i> Оценка перспектив модернизации токарного станка с ЧПУ 16К20Ф3 .....	480
<i>Серёжкин М.А., Мельников Э.Л.</i> Влияние финишного антифрикционного безабразивного покрытия усилие формоизменения при вытяжке деталей из сплава АМг-6БМ .....	484
<i>Смаль Е.Г., Есов В.Б.</i> Оценка влияния ионизированного воздуха на водорастворимые смазочно-охлаждающие технологические средства .....	486
<i>Козлов А.Ю., Смолкина Т.В., Щедрин А.В.</i> Теоретико-экспериментальное исследование охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях противодавления металлоплакирующих смазок .....	488
<i>Смолкина Т.В., Медвинская Н.С., Щедрин А.В.</i> Комплексное решение проблем повышения эффективности и импортозамещения в волочильном производстве на основе реализации фундаментального научного открытия «эффект безызносности при трении» .....	490
<i>Ступников В.В., Евсюков С.А.</i> Исследование технологического процесса обжима в сферическую матрицу и вытяжки сферическим пуансоном при изготовлении донной части баллонов высокого давления .....	492

## **Секция Б. Энергомашиностроение**

### **Б1. Теплофизика энергоустановок двигателей**

<i>Гильфанов Р.Н., Каримова А.Г., Дезидерьев С.Г.</i> Тепловая защита вдувом воздуха через перфорированный экран .....	494
<i>Гимбицкий А.В., Каримова А.Г., Дезидерьев С.Г.</i> Результаты исследования тепловой защиты при свободной конвекции и вдуве воздуха через пористый экран .....	499

Кулаков В.В., Каськов С.И. Исследование эффективности тепловой изоляции кожухотрубного теплообменного аппарата.....	504
Любимова М.А., Кузенов В.В., Рыжков С.В. Исследование тепловых способов защиты от образования барьерного льда на воздухозаборниках летательных аппаратов .....	506
Полозова Т.Н., Рыжков С.В., Кузенов В.В. Перспективные космические двигатели на основе геликонного разряда.....	508
Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Попович С.С., Стронгин М.М., Леонтьев А.И. Исследование воздействия ударных волн на температурный перепад в устройстве безмашинного энергоразделения потоков .....	511
Скрытник А.Н., Щелчков А.В., Попов И.А. Исследование гидравлического сопротивления труб с винтовой накаткой, полученной методом деформирующего резания .....	515
Хакимзянов Р.Р., Щелчков А.В. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении различных жидкостей на микродеформированных поверхностях в условиях свободной конвекции .....	520

## **Б2. Энергетические и транспортные установки и двигатели**

Беляев А.Н., Лысов Д.С., Флегентов И.В. Энерго- и ресурсосбережение при водоподготовке плавательных бассейнов .....	525
Гордеев А.В., Хайруллин А.Х., Хасанов Р.Р., Гуреев В.М., Никишин В.Н. Исследование влияния количества топлива в предварительных порциях на экономические и экологические показатели автомобильного дизеля .....	528
Гордеев А.В., Хайруллин А.Х., Хасанов Р.Р., Гуреев В.М., Никишин В.Н. Снижение выбросов оксидов азота с отработавшими газами дизеля за счет применения системы рециркуляции отработавших газов .....	533
Дерячев А.Д., Шайкин А.П. Разработка эмпирической модели расчета концентрации оксидов азота при сгорании бензоводородовоздушной смеси в двигателе с искровым зажиганием .....	535
Дерячев А.Д., Шайкин А.П. Ширина зоны турбулентного горения и скорость распространения пламени в камере сгорания бензинового двигателя с добавками водорода .....	540
Зайцев А.Н., Куксенова Л.И. Определение оптимальной толщины электроизоляционных покрытий в изделиях бланкета ИТЭР .....	544
Зарипов Р.Э., Кадышев В.Г. Обоснование выбора системы рециркуляции отработавших газов для газовых двигателей КАМАЗ .....	547
Кизеев И.С., Эзрохи Ю.А., Дрыгин А.Се. Анализ схемных решений и расчет возможностей повышения топливной экономичности ТРДД с помощью применения технологий «третьего контура» .....	551
Немтырева И.А., Заваркин В.Н., Карпов Ф.В. Реверсивный узел двухконтурной силовой турбины .....	553
Нигматуллин Р.Р., Еришов А.С. Формирование облика силовой установки сверхзвукового административного самолета с крейсерским числом $M = 3,0 \dots 4,0$ .....	557
Новиков Р.А., Киселев С.А. Исследование напряженного состояния БКШМ с помощью объемной тензометрической модели .....	560
Новиков М.А., Киселев С.А. Усовершенствованная система газораспределения модели двигателя с БКШМ .....	563
Рахманкулов Д.Я., Захарченко В.С., Сунцов П.С. Комплексная математическая модель формирования облика ТВГТД в системе вертолета .....	565
Скирта С.М., Пиралишвили Ш.А. Анализ причин возникновения и мероприятия по устранению дефекта рабочей лопатки турбины ГТД-110.....	569
Стариков А.И., Лукьянов А.С., Дмитриева Л.А. Конструктивные изменения в силовой установке мотовездехода, позволяющие определить основные параметры и качественные характеристики работы клиноременного вариатора .....	573
Субботенко Д.И., Обозов А.А. Топливный аккумулятор регулируемого объема аккумуляторной системы подачи топлива дизеля .....	578

<i>Тимиргалеев Ш.Р., Такмовцев В.В.</i> Исследование причин разрушения лопаток статора компрессора высокого давления приводного ГТД.....	580
<i>Третьяков С.А., Хвостов В.А.</i> Энергоэффективная модернизация и автоматизация котельных .....	582
<i>Филинов Е.П., Остаюк Я.А., Крупенич И.Н.</i> Исследование и прогнозирование теоретической максимальной эффективности ГТД традиционных схем на основе методов численного моделирования .....	586
<i>Филькин Е.М., Гайтова Т.Б.</i> Разработка гибридного мотоцикла .....	590
<i>Фокин Д.Б., Исянов А.М.</i> Оптимизация облика двигателя в составе силовой установки истребителя «легкого» класса.....	593

### **Б3. Холодильная техника, компрессорные, вакуумные и гидравлические машины**

<i>Аксапов Р.А., Щелчков А.В., Попов И.А.</i> Исследование интенсификации теплоотдачи и гидросопротивления структурированных поверхностей полученных методом деформирующего резания .....	596
<i>Борисов Ю.А., Чернышев А.В.</i> Определение толщины зоны градиента концентрации и ее влияния на скорость испарения жидкости .....	599
<i>Васильева В.А., Борисов Ю.А.</i> Применение численных методов для расчета рабочих процессов в пневмогидравлических устройствах .....	602
<i>Городилов А.А., Беренгартен М.Г.</i> Особенности контактного теплообмена в щелевых каналах поперечноточных градилен.....	606
<i>Зеленов М.С., Чернышев А.В.</i> Разработка математической модели позиционного электропневматического привода.....	609
<i>Левчук М.А., Зеленов М.С., Чернышев А.В.</i> Исследование термогидродинамических процессов при термостатировании биологических объектов .....	611
<i>Макаров А.Н., Макарова Л.А.</i> Кондиционер транспортного средства.....	613
<i>Никулин А.В., Меркулов В.И.</i> Формирование требований к электроприводному компрессору системы кондиционирования воздуха полностью электрического самолета .....	615
<i>Очков А.А., Демихов К.Е.</i> Метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса с комбинированной проточной частью в широком диапазоне давлений .....	618
<i>Пугачук А.С., Чернышев А.В.</i> Разработка высокоэффективной мобильной установки для выделения ДНК .....	620
<i>Подчуфаров А.А., Стриженев Е.М.</i> Разработка блока высокого давления для осуществления многоступенчатой заправки адсорбционной системы аккумуляирования природного газа .....	623
<i>Ткачев И.С., Пешти Ю.В.</i> Результаты исследовательских испытаний нового типа привода, основанного на использовании эффекта «предельного пневмомолота» в радиальном газостатическом подшипнике .....	624
<i>Усс А.Ю., Стародубцев А.А., Чернышев А.В.</i> Разработка вихревого регулятора .....	627

### **Б4. Промышленная и экологическая безопасность**

<i>Алексеева Е.И., Романовский В.Л.</i> Компоненты объектов историко-культурного наследия как индикатор уровня экологической и техногенной безопасности города Казани.....	630
<i>Антонова Е.С., Ксенофонтов Б.С.</i> Исследование процесса очистки сточной воды в лабораторной установке с оригинальной эжекционной системой аэрации .....	635
<i>Беляев А.Н., Лысов Д.С., Флегентов И.В.</i> Актуализация проблемы обескремнивания воды в промышленных технологиях и пути ее решения.....	639
<i>Бикбулатов Р.Р., Нафикова Э.В., Белозерова Е.А., Красногорская Н.Н.</i> Альтернативная энергетика — путь к рациональному природопользованию .....	642
<i>Варнавский А.Н., Мусолин А.К.</i> Моделирование вероятности возникновения производственно-обусловленных заболеваний работника.....	646

<i>Волков С.С., Стройкина О.В., Николайкин Н.И.</i> Особенности и проблемы утилизации электротехнического мусора в гражданской авиации и влияние на окружающую среду .....	650
<i>Галимова А.И., Романовский В.Л.</i> Внедрение инновационных средств противопожарной защиты в казанский учебно-исследовательский и методический центр для людей с ограниченными возможностями здоровья (по слуху) .....	652
<i>Галышев А.Б., Трофименко Ю.В.</i> Повышение эффективности и экологической безопасности транспортных систем крупных городов за счет развития велосипедного движения .....	656
<i>Гусева Т.А., Шевченко С.М.</i> Современные требования к проектированию безопасности и экологичности нового производства.....	660
<i>Денисова А.А., Кустикова М.А.</i> Математическое моделирование теплообменных и массообменных процессов при хранении нефти и нефтепродуктов.....	662
<i>Ефремочкина М.С., Пономарёв В.М.</i> Экология города .....	667
<i>Желовицкая А.В.</i> Перспективные окислительные процессы как эффективные методы очистки сточных вод, содержащих трудноокисляемые органические соединения .....	670
<i>Желовицкая А.В.</i> Очистка металлосодержащих сточных вод способом электрохимического перексоокисления .....	673
<i>Китнис М.А., Козьяков В.В.</i> Повышение безопасности эксплуатации ГеоЭС с помощью водоподготовки геотермального теплоносителя .....	675
<i>Кириченко П.А., Пашинин В.А., Коваленко М.А., Павлов А.В.</i> Устройство экспресс-обнаружения загрязненности воды нефтепродуктами .....	677
<i>Кирсанов А.А., Симицын В.В.</i> Повышение оперативности принятия управленческих решений на ликвидацию последствий аварии с опасным грузом на основе спутниковых и информационных технологий .....	682
<i>Кожин Д.Г., Новиков В.К.</i> Научно-методический подход к оценке безопасности перевозки нефти водным транспортом для окружающей среды и путей ее повышения.....	686
<i>Коломойцева И.Е., Пашинин В.А.</i> Обеспечение экологической безопасности при работе промышленной котельной.....	690
<i>Семчук Н.Н., Кузьмин А.И.</i> Антропогенный прессинг на экосистемы.....	692
<i>Маюрова А.С., Кустикова М.А.</i> Поиск энергоэффективных решений для освещения мостового перехода через керченский пролив.....	696
<i>Митин А.К., Николайкина Н.Е.</i> Метод биологической очистки воздуха от летучих органических соединений .....	700
<i>Муйкич Эмин, Татаринов В.В.</i> Разработка путей эвакуации населения, проживающего в крупном населенном пункте, средствами ГИС .....	704
<i>Мусина С.А., Красногорская Н.Н.</i> Сравнительный анализ сорбентов в процессах очистки металлосодержащих сточных вод .....	707
<i>Невская Е.Е., Мартынюк В.Ф.</i> Экспресс-метод определения частоты аварийных ситуаций на объектах, осуществляющих деятельность с использованием пожаровзрывоопасных веществ (на примере складов ГСМ ОАО «РЖД») .....	710
<i>Николаева Н.И., Семчук Н.Н., Гладких С.Н., Минина Е.С., Минин И.Л., Зверькова А.</i> Проблемы подготовки выпускников вуза в области промышленной безопасности .....	714
<i>Потапченко Т.Д., Трофименко Ю.В.</i> Повышение экологической безопасности и энергоэффективности транспортной системы региона (на примере Крымского федерального округа).....	718
<i>Свирипова М.С., Плуготаренко Н.К.</i> Исследование теоретических основ пожарной безопасности автогазозаправочных станций.....	721
<i>Скураатовский Н.И., Сомов М.В.</i> Актуальные вопросы безопасности жизнедеятельности инженерно-технического состава авиатранспортных предприятий.....	723
<i>Старков Е.Ю., Климов П.И., Николайкин Н.И.</i> Снижение воздействия на почву нефтепродуктов на месте падения воздушного судна.....	726
<i>Султанов С.А.</i> Экологические проблемы добычи и использования сланцевого газа.....	730
<i>Тарасова М.О., Козодаев А.С.</i> Исследование эффективности фильтрующего материала для очистки сточных вод от взвешенных веществ .....	734

<i>Цесь Ю.В., Кустиков Ю.А.</i> Разработка методики измерений массовой концентрации табачной пыли в организованных источниках выбросов предприятий табачной отрасли .....	738
<i>Чудакова О.Г.</i> Двухступенчатый проточный флотатор для локальной очистки промстоков малого предприятия .....	740
<i>Чудакова О.Г., Гаязова З.И.</i> Проектирование метантенка для очистных сооружений с получением биогаза.....	744
<i>Черепецкой А.В., Шитулин Ю.А., Николайкин Н.И.</i> Анализ и совершенствование системы очистных сооружений сточных вод аэропорта .....	746
<i>Ямаева Э.Г., Фомина Е.Е.</i> Особенности оценки риска объектов газораспределения на этапе проектирования .....	748

## Секция В. Специальное машиностроение

### **В1. Ракетно-космическая техника**

<i>Гоцелюк О.Б., Новиков Е.С., Кудрявцев И.В.</i> Нагрев волноводов в космических аппаратах связи при передаче СВЧ-сигналов на орбите .....	754
<i>Демьянов К.А., Плеханов П.Г.</i> Новые параметры исследования Солнечной системы космическими аппаратами .....	758
<i>Епихин А.С., Калугин В.Т.</i> Исследование методов снижения динамических нагрузок в задаче обтекания летательного аппарата с установленным тормозным щитком .....	761
<i>Корянов В.В., Топорков А.Г., Казаков В.П.</i> Методика расчета условий попадания космического аппарата в тень от земли в процессе его выведения на заданную орбиту.....	763
<i>Куксова Н.В., Петров И.В., Нестеров С.Б.</i> Выбор режима работы криогенных экранов для имитаторов космического пространства больших объемов .....	766
<i>Луковкин Р.О., Щеглов Г.А.</i> Оценка работоспособности посадочного устройства с краш-опорами при посадке возвращаемого аппарата на жесткий грунт .....	768
<i>Попельнюк И.А., Гареев А.М.</i> Разработка методики оценки состояния гидравлических приводов летательных аппаратов с применением технологий упреждающего обслуживания .....	770
<i>Попов А.С., Ефремов Д.И.</i> Стратосферный технологический летательный аппарат для отработки реактивного двигателя .....	773
<i>Середин В.И., Лепихин А.М.</i> Экспериментальная оценка механических характеристик прочности металлокомпозитного бака высокого давления .....	776
<i>Скоробогатский С.В., Тищенко Д.В., Слободчиков В.Н.</i> Исследование статистических характеристик ошибок БИНС на базе микромеханических датчиков в составе малогабаритных управляемых ракет .....	778
<i>Тынченко В.С., Лаптенков В.Д.</i> Автоматизированная система индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов .....	783
<i>Хожателев В.В., Плеханов П.Г.</i> О необходимости запуска космического аппарата на расстояние 100–800 а.е. от Солнца .....	788
<i>Щелоков Е.А., Бадюков С.А., Данилин А.И.</i> Применение лазерных технологий в ракетно-космической технике .....	790

### **В2. Вооружение и военная техника**

<i>Афанасьев Н.А., Агаев З.Н.</i> Определение функционального состояния лопасти несущего винта вертолета при выполнении боевого задания .....	792
<i>Быльдин А.Ю., Жураковский В.Н.</i> Разработка алгоритма управления приводами наведения антенного поста системы управления корабельным артиллерийским комплексом.....	794

<i>Валиев М.Ш., Файзыбаев Ш.С.</i> Оценка технического состояния тепловозного дизеля в эксплуатации.....	796
<i>Волошин В.А., Верещиков Д.В.</i> К вопросу о создании математической модели динамики самолета.....	799
<i>Горбатенко А.А., Кобылкин И.Ф.</i> Изучение действия противоккумулятивных устройств.....	802
<i>Губский П.М., Оркин Б.Д.</i> Влияние точности измерения начальной скорости снарядов с управляемым дистанционным взрывателем на их эффективность .....	804
<i>Еременков А.И., Жураковский В.Н.</i> Применение спектрального анализа при обнаружении сигналов.....	810
<i>Загрядцкий Ф.С., Бабкин А.В.</i> Влияние срабатывания реакционных материалов на действие кумулятивных боеприпасов.....	812
<i>Камалов Р.К., Агаев Р.Н.</i> Разработка оперативно-тактического беспилотного самолета разведывательного назначения.....	813
<i>Косолобов Д.В., Глазков К.М.</i> Компенсация негативного влияния детонации лидирующего заряда и динамической защиты в тандемных кумулятивных боевых частях.....	816
<i>Круцкевич М.А., Бабкин А.В.</i> Градиентное растяжение кумулятивной струи из композитного материала.....	818
<i>Кузнецов А.Д.</i> Оценка эффективности пилотирования военно-транспортного самолета при сбросе моногруза.....	821
<i>Кореньков В.В., Лежнин С.И., Селиванов В.В.</i> Влияние разброса начальной скорости гранаты на вероятность попадания в цель.....	824
<i>Логвиненко А.С., Жураковский В.Н.</i> Особенности создания имитатора цифровой обработки сигналов в составе модели обзорной РЛС .....	829
<i>Павлов Я.О., Знаменский Е.А., Кэрт Б.Э., Крацов В.О.</i> Внутрибаллистическая модель телескопического выстрела.....	831
<i>Павлов Я.О., Знаменский Е.А., Кэрт Б.Э.</i> Оценка могущества действия малокалиберных артиллерийских боеприпасов с учетом пространственного положения в момент подрыва .....	837
<i>Павлова И.А., Петюков А.В., Кобылкин И.Ф.</i> Исследование влияния формы ударника и условий его взаимодействия с преградой на инициирование зарядов взрывчатых веществ в прочной оболочке .....	842
<i>Петюков А.В., Орленко Л.П.</i> Численное моделирование взаимодействия фугасных зарядов с прочными преградами .....	844
<i>Попов Ю.В., Пусев В.И.</i> Исследование поражающего и ударно-проникающего действия одномоторных поршневых самолетов по боевым надводным кораблям .....	846
<i>Попов Ю.В., Пусев В.И.</i> Расчет амортизирующих характеристик по диаграммам деформирования блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов.....	848
<i>Сафонов П.Е., Левакова Н.М.</i> Разработка структуры арамидной ткани с повышенной противоосколочной стойкостью.....	852
<i>Стадников Е.А., Агаев З.Н.</i> Способ увеличения тяги несущего винта вертолета .....	855
<i>Терешин А.Н., Оськин С.П.</i> Метод размерности при решении задач физического моделирования для решения задач пассивной инфракрасной локации.....	857
<i>Фархетдинов Р.Р., Писарев С.А.</i> О перспективах развития автоматического оружия (на примере автоматов).....	862
<i>Федорова Н.А., Федоров С.В.</i> Инженерная методика оценки проникающего действия ударников с энерговыделяющим наполнителем при взаимодействии с металлическими преградами .....	866
<i>Цыганов Е.А.</i> Гидропривод мобильных РЛС с LS-управлением.....	871
<i>Шигин И.А., Гаврилкин В.К., Горячев О.В.</i> Анализ способов пуска асинхронного трехфазного двигателя в условиях ограниченной мощности системы электропитания наземного подвижного объекта.....	873
<i>Шубин В.С., Верещиков Д.В.</i> Методика формирования имитационных моделей информационно-управляющего поля кабин летательных аппаратов .....	877

### **В3. Робототехнические системы**

<i>Бословяк П.В., Лагерев А.В.</i> Влияние длины конвейера с подвесной лентой на распределение масс основных конструктивных узлов его металлоконструкции.....	882
<i>Овсянкин Г.И., Рушьева Д.В., Бошляков А.А.</i> Активная система трехмерной стабилизации оптических приборов для летательных аппаратов.....	885
<i>Толкачев Е.Н., Лагерев А.В.</i> Моделирование динамики конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом .....	886

### **В4. Транспортные системы**

<i>Лагерев И.А.</i> Методика анализа динамического взаимодействия манипуляционной установки и базового шасси.....	891
<i>Новиков Д.С.</i> Доводка конструкции коробки передач по результатам тест-драйва автомобиля.....	893
<i>Сторчилова Т.А., Балакина Е.В., Зотов Н.М.</i> Анализ продольного сноса нормальной реакции твердой плоской опоры на эластичное колесо.....	895
<i>Тюкина Л.В., Мочалин С.М.</i> Классификация транспортных систем с применением логистического подхода .....	899
<i>Федоткин Р.С., Крючков В.А.</i> Перспективы применения резиноармированных гусениц на транспортных и тяговых машинах различного назначения.....	903
<i>Царева В.А., Гапоненков И.А., Федорова О.А.</i> Экологическая безопасность источников децентрализованного водоснабжения Мурманска.....	906

### **В5. Технологии специального машиностроения**

<i>Баскаков П.А., Кувалдин А.Б.</i> Исследование нагрева локализатора с переменной толщиной стенок с учетом естественной конвекции .....	909
<i>Баимур К.А., Терасмес К.С., Петровский Э.А.</i> Адаптивный регулятор продольных колебаний низа буровой колонны .....	915
<i>Гоцелюк О.Б., Кудрявцев И.В.</i> Особенности напряженно-деформированного состояния тонкостенных волноводов при пластическом изгибе .....	917
<i>Гусев И.А., Ольховский И.А., Плосконосов А.В., Двоенко О.В., Алешков М.В.</i> Обоснование необходимости создания аварийно-спасательного автомобиля в климатическом исполнении ХЛ.....	922
<i>Абашин М.И., Кислов Н.В.</i> Перспективные методы повышения достоверности оценки параметров качества материала изделий ракетно-космической техники.....	925
<i>Ковалев А.В., Сальников В.С.</i> Прогноз износа промышленного оборудования на основе ПИД-регулятора.....	927
<i>Проваторов А.С., Галиновский А.Л.</i> Разработка методики ультразвуковой диагностики качества наноструктурированных покрытий.....	930
<i>Рубашкин В.В., Бабкин А.В.</i> Анализ возможного технического решения перфорационной системы с наддувом легким газом.....	933
<i>Спиридонов А.Ю., Пшеницын А.А.</i> Об эффективности применения вибродемпфирующих покрытий.....	938
<i>Хабаров А.А., Альтин А.Я.</i> Создание высокоскоростного и высоконагруженного автономного подшипника жидкостного трения с охлаждением и циркуляцией смазки в слое .....	943

### **В6. Композиционные материалы**

<i>Битюцких А.С., Хордилов А.Э., Суменков А.Л.</i> Слипаяемость наноструктурных материалов .....	946
<i>Богданов С.И., Шапаев И.И.</i> Особенности промышленного проектирования производственных мощностей для изготовления силовых конструкций из полимерных	



композиционных материалов для перспективных российских пассажирских самолетов МС-21 .....	948
<i>Вахитова С.М., Шаехова И.Ф., Ганиев М.М.</i> Исследование вибропоглощающих и звукопоглощающих свойств матричных и наполненных композиционных материалов на основе модифицированной полиуретановой матрицы .....	952
<i>Гаврилова В.С., Воронов С.А.</i> Анализ факторов, влияющих на выбор поверхностного слоя материала сопряженных деталей пар трения .....	956
<i>Карлова П.В., Скидченко В.Ю., Нелюб В.А.</i> Разработка технологии получения нанокompозита и исследование его свойств .....	961
<i>Крылов В.Д., Курганова Ю.А.</i> Межслоевая трещиностойкость полимерных композиционных материалов .....	963
<i>Пье Пху Маунг, Марычева А.Н., Малышева Г.В.</i> Особенности процесса пропитывания при изготовлении деталей двойной кривизны из полимерных композиционных материалов .....	966
<i>Рогов Н.В., Сафин А.М.</i> Экспериментальные исследования лопастей ЛБВ 1 на стойкость к повреждениям при низких температурах .....	968
<i>Пье Пху Маунг, Тумасова М.С., Малышева Г.В.</i> Исследование формообразующих свойств углеродных и стеклянных тканей .....	971
<i>Чичурин В.Е., Болгов В.В., Тайгин В.Б., Патраев Е.В., Данилов В.Е., Михнев М.М.</i> Прецизионный оболочечный рефлектор .....	973
<i>Шмина Ю.Ю., Малышева Г.В.</i> Исследование микроструктуры и свойств гетерогенной матрицы на основе полисульфона и эпоксидного олигомера .....	976

## Секция Г. Робототехника и комплексная автоматизация

### **Г1. Системы 3D-моделирования, прототипирования, графический дизайн**

<i>Бадмаев А.В., Буздаев Ф.В.</i> Технология проектирования механообрабатывающих цехов и применение систем 3D-моделирования в современных условиях развития рынка .....	979
<i>Лесков А.Г., Бажинова К.В.</i> Решение задачи управления системой «рука — кисть — объект» с учетом структуры и свойств матриц захвата .....	981
<i>Дубовик Н.Н., Ногин О.А., Туманов В.М., Власов А.И.</i> Информационно-навигационная система HOME GIS .....	984
<i>Феоктистова Е.В., Лесков А.Г.</i> Алгоритм определения пересечения произвольных полигональных моделей для нахождения коллектора контакта, нормалей и глубины проникновения при планировании и моделировании захвата деформируемого объекта .....	988

### **Г2. Конструкторско-технологические решения в современной технике**

<i>Гудков М.А., Попов Е.В.</i> Выбор силовой схемы и расчет на прочность балки пилона самолета .....	993
<i>Метелкин В.Н.</i> Схема защиты усилительного прибора передатчика .....	995
<i>Нигметзянов А.А., Савинков А.С., Поляков Д.В., Хабибуллин Р.Г.</i> Влияние гидравлического оборудования на потребительские свойства автомобилей-самосвалов .....	999
<i>Приходько А.А., Смелягин А.И.</i> Синтез и исследование приводного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства .....	1002
<i>Цыганков А.И., Недорезов В.Г.</i> Прецизионные потенциометры. Возможности создания и перспективы .....	1007

**Г3. Современные методы инженерных расчетов**

*Валеев Б.М., Евдокимов Ю.К.* Способ автоматического определения несущей частоты амплитудно-манипулированного колебания, демодуляции, декодирования и восстановления исходных данных..... 1010

*Зайцев И.А., Медведев А.В.* Моделирование переходного процесса пластинчатого насоса ..... 1012

*Измеров М.А., Тихомиров В.П.* Контактная жесткость шероховатых поверхностей на основе 3D-моделирования ..... 1017

*Коротеев А.Ю., Попов Е.В.* Моделирование воздействия стекла на конструкцию рамы фонаря при расчете на прочность ..... 1022

*Макаров И.К., Салтыков С.Н.* Учет влияния интерференционных сил от АСП при решении деформационных задач для крыла сверхзвукового самолета ..... 1023

*Персова М.Г., Вагин Д.В., Епанчинцева Т.Б., Кошкина Ю.И., Соловейчик Ю.Г.* Программное обеспечение для 3D-моделирования обтекателей гиперзвуковых летательных аппаратов ..... 1026

*Федосеев В.И., Попов Е.В.* Моделирование предварительной геометрической крутки створки ТНУ при расчете на прочность ..... 1030

*Полоник Е.Н., Суренский Е.А., Федотов А.А., Хазин Л.М.* Автоматизация расчетов усталостной долговечности элементов конструкции самолета МС-21 ..... 1033

**Г4. Системы автоматизированного проектирования и поддержка жизненного цикла продукции**

*Андриевский-Герберг С.Н., Новосельцев В.В., Гогин Е.Н.* Разработка интерактивной системы поиска и устранения неисправностей двигателей семейства ЯМЗ-530 ..... 1038

*Аравин Д.Д., Лукьянов С.В.* Система мониторинга высокопроизводительного оборудования ..... 1041

*Будрин П.К., Жадовский А.А.* Внедрение интерактивных руководств по эксплуатации на заказах основного производства ..... 1043

*Варнавский А.Н., Мусолин А.К.* Модель работы системы электронного обучения с учетом психофизиологического состояния обучаемого ..... 1048

*Гладких А.А., Шахнов В.А.* Система автоматизированного проектирования Optolithium для моделирования процесса проекционной литографии ..... 1051

*Гринюк О.Н., Лукиенко Л.В.* Автоматизация технологических расчетов при изготовлении изделий из металлопроката ..... 1056

*Журбенко П.А., Гузнецов В.Н.* Проектирование в САПР ..... 1060

*Комкова А.Р., Ляхович Д.Г.* Рейтинговая оценка логистических организаций ..... 1062

*Низамов Р.А., Хайруллина Г.С., Шакирзянова Н.Ш.* Специализированное программное обеспечение автоматизированного проектирования электротехнических комплексов транспортных средств ..... 1065

*Остапок Я.А., Ткаченко А.Ю., Филинов Е.П., Кузьмичев В.С.* Сравнительный анализ автоматизированных систем проектирования газотурбинных двигателей ..... 1068

*Пономарев С.И., Ереско С.П., Ереско Т.Т.* Автоматизированное проектирование технологического процесса изготовления металлокерамических узлов аэрокосмического производства ..... 1070

*Слепцова К.А., Кузовлев В.И.* Автоматизированная база данных для микрофинансовой организации ..... 1073

*Федоров Е.Ю., Терещук В.С.* Логическая схема процесса проектирования электротехнических комплексов транспортных средств ..... 1075

**Г5. Робототехнические и интеллектуальные системы в современном производстве и технике**

*Шитик А.М., Другак А.В., Якута Е.А., Гринюк Д.А.* Проблемы использования фильтра Калмана в промышленных контроллерах ..... 1080

*Бабиченко А.В., Земляный Е.С.* Демонстрационный макет экспертной системы интеллектуальной поддержки экипажа при решении пилотажно-навигационных задач ..... 1084

## Содержание

<i>Кай Шэнь</i> Формирование алгоритмического обеспечения современных систем летательных аппаратов.....	1087
<i>Камалов А.Р., Никитина Д.В., Сиразетдинов Р.Т.</i> Разработка системы управления руки-манипулятора антропоморфного робота AR601.....	1089
<i>Клеветов Д.В., Симаков А.Л.</i> Разработка инновационного импортозамещающего комплекса для поверхностного монтажа.....	1091
<i>Кочешков М.А., Пролетарский А.В.</i> Особенности эксплуатации перспективных средств выведения.....	1095
<i>Лукиянова Н.В., Кочешков М.А.</i> Синтез информационно-управляющей системы современной организации.....	1099
<i>Нестеров Д.В., Нестеров В.Н.</i> Применение метода многомерных тестовых объектов в задаче калибровки универсальных промышленных роботов.....	1103
<i>Фадеев А.Ю., Никитина Д.В., Деваев В.М.</i> Разработка алгоритмов динамической ходьбы на примере антропоморфного робота AP601.....	1105
<i>Октябрьская Л.В., Макаровец Н.А.</i> Разработка и внедрение на производство высокотехнологичного автоматизированного диагностического и лечебного комплекса поддержания жизнедеятельности человека «АНГЕЛ».....	1108
<i>Карпунин А.А., Пак Александр.</i> Постановка задачи повышения эффективности распознавания препятствий и их картографирования для системы технического зрения мобильной платформы.....	1109
<i>Пью Си Тху.</i> Информационная система оценки знаний студентов лингвистических специальностей.....	1113
<i>Неусытин К.А., Селезнева М.С.</i> Разработка навигационного комплекса с интеллектуальной компонентой.....	1115
<i>Соколова А.В., Акинин М.В.</i> Дешифрация данных аэрофотосъемки, полученной от беспилотного летательного аппарата, с применением сверточной нейронной сети ЛеКуна.....	1118
<i>Струков В.О., Бузников С.Е.</i> Моделирование автоматической системы экстренного торможения автомобиля.....	1120
<i>Сулим П.Е., Юденков В.С.</i> Интеллектуальный мультимедийный продукт с адаптивным растриванием для ризографической печати.....	1122
<i>Танненберг И.Д., Чирков А.Ю.</i> Валидация модели горения ЛОГОС — Аэрогидромеханика на примере задачи истекания многокомпонентной газовой смеси из сопла твердотопливного ракетного двигателя.....	1125
<i>Урганов В.А., Жулев В.И.</i> Бортовая информационно-измерительная и управляющая система беспилотного летательного аппарата, предназначенного для монтажа устройств мониторинга высоковольтной воздушной линии электропередачи.....	1127
<i>Чжоу Зин Хтут.</i> Экспертная система диагностики бортовых вычислительных средств.....	1130
<i>Чон Нгок Хыонг, Нгуен Динь Тхай.</i> Исследование погрешностей инерциальных навигационных систем.....	1131
<i>Шарков А.А.</i> Использование моделей с повышенными степенями наблюдаемости для коррекции навигационных систем.....	1135
<i>Бабиченко А.В., Неусытин К.А., Шарков А.А.</i> Исследование качества наблюдения погрешностей грубой навигационной системы летательного аппарата.....	1137

*Научное издание*

**Восьмая Всероссийская конференция  
молодых ученых и специалистов**

**«БУДУЩЕЕ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ  
РОССИИ»**

Сборник докладов

Редакторы *О.М. Королёва, Н.Е. Овчеренко*  
Художник *А.С. Ключева*  
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

В оформлении использованы шрифты  
Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 10.12.2015. Формат 70×100/16.  
Усл. печ. л. 72,5. Тираж 500 экз. Заказ .

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)  
[www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)

Отпечатано в типографии ГУП РМ  
«Республиканская типография “Красный Октябрь”»  
430000, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, д. 55а.  
[book@miris.ru](mailto:book@miris.ru)

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана**  
вышло в свет учебное пособие  
Д. Н. Попова, С. С. Панайотти, М. В. Рябинина  
**«Гидромеханика» (3-е издание)**



Изложены основы механики жидкости и газа, а также их приложения в расчетах машин, приводов и других технических устройств. Наряду с традиционными разделами курса гидромеханики рассмотрены актуальные вопросы неустановившегося движения.

Содержание книги соответствует разделам дисциплин, преподаваемых авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана и его калужском филиале.

Для студентов машиностроительных вузов; может быть полезно аспирантам и специалистам, решающим прикладные задачи гидромеханики.

**Год издания:** 2014

**Тип издания:** учебное  
пособие

**Объем:** 320 стр. / 20 п.л.

**Формат:** 60x90/16

**ISBN:** 978-5-7038-3920-1

---

Информацию о других новых книгах можно получить  
на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышел в свет учебник  
под ред. О. А. Ряховского  
«Детали машин» (4-е издание)**



Изложены основы теории, расчета и принципы конструирования деталей и узлов машин общего назначения: разъемных и неразъемных соединений, передач зацеплением и трением, подшипников скольжения и качения, валов и муфт приводов. В четвертое издание (третье — в 2007 г.) внесены исправления и дополнения.

Содержание учебника соответствует программе и курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов, обучающихся по программам специалиста, магистра, бакалавра. В зависимости от программы обучения и направления подготовки студенты могут использовать необходимые разделы учебника. Может быть полезен аспирантам и преподавателям, а также специалистам в области машиностроения.

**Год издания:** 2014  
**Тип издания:** учебник  
**Объем:** 472 стр. / 29 п.л.  
**Формат:** 60x90/16  
**ISBN:** 978-5-7038-3939-3

---

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана  
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:  
телефон: 8 499 263-60-45;  
факс: 8 499 261-45-97  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)

**В Издательстве МГТУ им. Н. Э. Баумана**  
вышел в свет учебник  
**И. Ф. Кобылкина, В. В. Селиванова**  
**«Материалы и структуры легкой бронезащиты»**



Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с баллистической стойкостью материалов и защитных структур, предназначенных для индивидуальной и локальной бронезащиты от воздействия высокоскоростных пуль и осколков. Приведены физические и математические модели процессов высокоскоростного взаимодействия пуль и осколков с различными типами бронепреград. Изложены современные представления о механизмах заброневого действия баллистического удара пуль.

Для студентов и аспирантов технических университетов и машиностроительных вузов. Может быть полезна научным работникам, инженерам и военным специалистам, которые занимаются разработкой средств индивидуальной и локальной бронезащиты.

**Год издания:** 2014

**Тип издания:** Учебник

**Объем:** 192 стр. / 15.6 п.л.

**Формат:** 70x100/16

**ISBN:** 978-5-7038-4001-6

---

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н. Э. Баумана

**[www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)**

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла в свет монография  
Э.Л. Макарова, Б.Ф. Якушина  
«Теория свариваемости сталей и сплавов»**



**Год издания:** 2014  
**Тип издания:** монография  
**Объем:** 448 стр. / 30,5 п.л.  
**Формат:** 60x90/16  
**ISBN:** 978-5-7038-3938-6

В монографии рассмотрены теоретические и практические аспекты свариваемости конструкционных сталей и сплавов. Приведены экспериментальные методы оценки показателей свариваемости с помощью сварочных технологических проб и специализированных машинных испытаний. Показана возможность применения расчетных методов, реализуемых с помощью компьютерных технологий с использованием специализированного программного обеспечения. На основании анализа металлургических процессов в сварочной ванне, кристаллизации металла шва, фазовых и структурных превращений в твердом металле в условиях сварочного термического цикла трактуются результаты оценки свариваемости. Приведены принципиальные металлургические, технологические и конструктивные способы обеспечения достаточной свариваемости сталей и сплавов.

Изложенные в монографии сведения будут полезны разработчикам свариваемых материалов, технологам при проектировании технологии сварки конструкций, студентам и аспирантам, изучающим курс теории сварочных процессов.

---

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана  
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:  
телефон: 8 499 263-60-45;  
факс: 8 499 261-45-97  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)