

ЭНЕРГЕТИКА  
ENERGETICS

**Анисимов Г. Н., Колесова А. В., Саттаров Р. Р.**  
**G. N. Anisimov, A. V. Kolesova, R. R. Sattarov**

**ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ  
ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

**THE INFLUENCE OF VARIABLE MAGNETIC FIELDS ON SUPERCONDUCTING  
ELECTRIC MACHINE WINDING**

**Анисимов Геннадий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург).

**Mr. Gennady N. Anisimov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical foundations of electrical engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg).

**Колесова Анна Владимировна** – старший преподаватель кафедры «Электромеханические комплексы и системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург).

**Ms. Anna V. Kolesova** – senior lecturer, Electromechanical complexes and systems Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg).

**Саттаров Ринат Рашитович** – заведующий лабораторией кафедры «Электромеханические комплексы и системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург).

**Mr. Renat R. Sattarov** – head of laboratory, Electromechanical complexes and systems Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg).

**Аннотация.** Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований потерь мощности в сверхпроводящих обмотках возбуждения (СПОВ) электрических машин от воздействия пульсирующего и вращающегося магнитных полей. Описываются методики расчета потерь в сверхпроводниках и методика определения допустимых электромагнитных воздействий на сверхпроводящие обмотки в динамичных режимах. Приводятся основные расчетные соотношения для определения потерь энергии в сверхпроводящих обмотках путем суммирования гистерезисных, вихревых и кооперативных потерь в элементах объема СПОВ с учётом распределения магнитного поля по ее сечению. Рассматриваются вопросы устойчивости работы СПОВ с учетом допустимых уровней индукции переменного магнитного поля, воздействующего на СПОВ в широком диапазоне частот. Приводятся результаты экспериментального исследования СПОВ, изготовленных из промышленных ниобий-титановых и ниобий-оловянных проводников, при изменении частоты воздействующего поля и значений рабочего тока. Проводится теоретический анализ процессов диссипации энергии при воздействии на СПОВ вращающегося с частотой 50 Гц магнитного поля при наличии постоянного поля подмагничивания с индукцией до 2 Тл.

**Summary.** The results of theoretical and experimental studies of power losses in superconducting excitation windings of (SPOV) electrical machines from the effects of pulsating and rotating magnetic fields are presented in the article. The authors describe the methods of loss calculation in superconductors as well as the method of determining allowable electromagnetic radiation on a superconducting winding in dynamic modes. The article provides basic design calculations to determine the energy losses in the superconducting windings by summing the hysteresis, eddy and co-operative losses in the elements of volume SPOV taking into account the distribution of the magnetic field in its cross-section. The stability of the SPOV concerning acceptable levels of induction of an alternating magnetic field acting on the SCEW in a wide range of frequencies is focused on. The results of experimental studies SPOV made with the help of industrial niobium-titanium and niobium-tin conductors at change of incident field frequency and values of operating current are given. The authors present a theoretical analysis of the processes of energy dissipation when exposed to SPOV rotating with a frequency of 50 Hz magnetic field with a permanent bias field with induction up to 2 T.

**Ключевые слова:** сверхпроводящая обмотка, пульсирующее магнитное поле, вращающееся магнитное поле, температура, частота, потери на вихревые токи, потери на гистерезис, кооперативные потери.

**Key words:** superconducting winding, a pulsing magnetic field, rotating magnetic field, temperature, frequency, eddy currents losses, hysteresis losses, cooperative losses.

УДК 533.9

### Введение

Эксплуатация электрической машины переменного тока со сверхпроводящей обмоткой возбуждения (СПОВ), а также в СПОВ, использующихся в высокоскоростных транспортных системах с тяговым линейным синхронным двигателем и магнитным подвесом экипажа [1 – 3] и в системах специального назначения [4; 5], предполагает возникновение переходных процессов, сопровождающихся возникновением экстратов в контурах машины. В современных сверхпроводящих материалах, используемых при создании электромашинных обмоток возбуждения, под воздействием изменяющихся (пульсирующих, вращающихся) магнитных полей возникают потери энергии, которые выливаются в тепловыделение, которое способно при определенных условиях вызвать переход сверхпроводника в нормальное состояние. Особенности электрической машины с СПОВ определяют специфические требования к характеру протекания переходных процессов: величина и скорость изменения тока возбуждения и магнитного поля, воздействующего на СПОВ стороны статора, не должны превышать критические значения для данного сверхпроводника. Так как критический ток сверхпроводника весьма зависит от температуры, при выборе критериев допустимой скорости и величины изменения поля в области СПОВ требуется учитывать количество тепловой энергии, выделившейся в результате возникновения переходного процесса, и связанное с ним увеличение температуры сверхпроводника. К наиболее часто встречающимся ситуациям, связанным с изменениями тока и поля возбуждения, относятся короткие замыкания в цепи якоря, сброс и наброс нагрузки, режимное регулирование. Также следует учитывать случаи, когда на СПОВ воздействует постоянно изменяющееся магнитное поле из-за несимметричной нагрузки [6 – 11].

**Исследование потерь энергии в СПОВ при воздействии пульсирующего магнитного поля.** Рассмотрим катушечные обмотки (различной геометрии), выполненные из сверхпроводящих композиционных проводов, подвергающиеся воздействию переменного магнитного поля.

Имеется два основных механизма потерь, один из которых обусловлен протеканием переменного транспортного тока по сверхпроводнику, другой связан с тем, что каждый виток катушки находится в сильном магнитном поле, создаваемом другими витками. Для многослойных катушек превалирует второй механизм потерь.

В основе расчёта потерь в композиционном проводе от пульсирующего магнитного поля амплитуды  $B_0$  была эмпирическая зависимость вида

$$Q = \alpha B_0^{2+\beta},$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – параметры сверхпроводника, определяемые на основании результатов экспериментальных калориметрических измерений.

Потери энергии в сверхпроводящих обмотках находились путём суммирования потерь в элементах объёма СПОВ с учётом распределения магнитного поля по ее сечению.

Для проведения экспериментальных исследований была создана установка, в которой магнитное поле, воздействующее на СПОВ, создавалось двумя обмотками: обмоткой постоянного магнитного поля и обмоткой переменного поля. Последняя имела две модификации: обмотка пульсирующего поля и обмотка вращающегося поля. Постоянное магнитное поле достигало значения 3 Тл, а амплитуда переменного поля – 0,1 Тл.

Потери в композиционном сверхпроводящем проводе от воздействия переменного магнитного поля измерялись калориметрическим способом, а потери в сверхпроводящих катушках, несущих переменный транспортный ток, измерялись электрическим методом.

Наилучшее совпадение расчётных и экспериментальных данных наблюдалось в случае однослойных обмоток. По мере увеличения количества слоёв в СПОВ расхождение между расчётом и экспериментом увеличивалось.

На рис. 1 приведён пример экспериментальной и теоретической зависимостей потерь мощности от амплитуды пульсирующего магнитного поля, изменяющегося с частотой 50 Гц, для однослойной катушки из сверхпроводящего композиционного провода HT-50, диаметром 0,5 мм с числом жил – 210. Геометрические размеры катушки: внутренний радиус намотки – 10 мм, высота намотки – 80 мм.

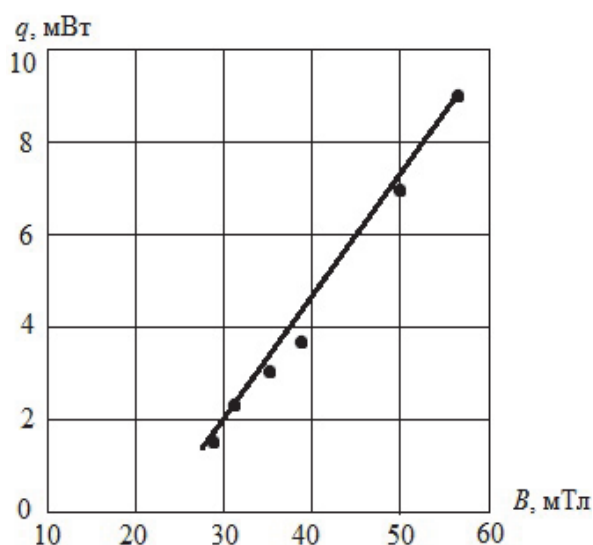


Рис. 1. Потери мощности в сверхпроводящей катушке в переменном магнитном поле: ■ – эксперимент; — – расчёт

Также экспериментально исследовалось влияние поперечного магнитного поля на величину гистерезисных потерь в ленточном проводе из  $Nb_3Sn$  в переменном магнитном поле. Для измерения потерь использовался вибрационный магнитометр с колеблющимся образцом. Постоянный и переменный компоненты магнитного поля были ориентированы в плоскости ленты. Переменное поле  $h_0 \sin \omega t$  было направлено вдоль длины ленты, а постоянное поле  $H_0$  – поперёк её длины. Было установлено, что постоянное поперечное магнитное поле приводит к увеличению гистерезисных потерь. Немаловажное значение для величины гистерезисных потерь имела магнитная предыстория ленточного провода из  $Nb_3Sn$ .

**Исследование устойчивости сверхпроводящих обмоток к воздействию переменного магнитного поля.** Для устойчивости работы СПОВ требуется знать допустимые уровни индукции переменного магнитного поля, воздействующего на СПОВ в широком диапазоне частот. Другими словами, необходим обоснованный выбор значений рабочего тока и формулировка требований к системе экранирования СПОВ.

Допустим, что сверхпроводящая обмотка возбуждения представляет собой монолитную конструкцию, охлаждение которой осуществляется с поверхности обмотки за счёт теплопроводности. Распределение температуры по сечению обмотки определяется в результате решения дифференциального уравнения теплопроводности

$$K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q = 0,$$

где  $T = f(x, y, z, t)$  – температура точки обмотки с координатами  $x, y, z$ ;  $K_x, K_y$  – коэффициенты теплопроводности;  $q$  – удельная мощность тепловыделения в обмотке

$$q = \lambda \cdot (q_r + q_v + q_k),$$

где  $\lambda$  – коэффициент заполнения обмотки проводом;  $q_r, q_v, q_k$  – удельные гистерезисные, вихревые, кооперативные потери в проводе.

Граничные условия, определяющие теплообмен на поверхности обмотки, следующие:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_\Gamma} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y_\Gamma} = \frac{h_\Gamma}{K_u} (T_\Gamma - T_0),$$

где  $x_\Gamma, y_\Gamma$  – координаты границы;  $T_\Gamma$  – температура границы;  $T_0$  – температура хладагента 4,2 К;  $K_u$  – коэффициент теплопроводности поверхностной изоляции;  $h_\Gamma$  – коэффициент теплоотдачи на границе, который определяется по формуле [2]

$$h_\Gamma = \frac{hK_u}{K_u + \delta h},$$

где  $h$  – коэффициент теплоотдачи при кипении жидкого гелия;  $\delta$  – толщина изоляции.

Условие устойчивости СПОВ определяется не превышением плотности тока по сверхпроводнику ее критического значения ( $j_k$ ) с учётом локального значения магнитной индукции и температуры

$$\frac{I}{S_{СП}} < j_k(B, T),$$

где  $I$  – ток СПОВ;  $S_{СП}$  – сечение сверхпроводника в проводе.

Критическая плотность тока определяется на основании модели критического состояния с учётом температурной зависимости [3]

$$j_k = \frac{\alpha [T_k (1 - B \cdot B_{k2}^{-1})^{0,5} - T]}{(B_0 + B) [T_k (1 - B \cdot B_{k2}^{-1})^{0,5} - T_0]},$$

где  $\alpha, B_0$  – константы модели;  $T_k$  – критическая температура;  $B_{k2}$  – верхнее критическое поле.

Расчёт тепловыделения в обмотке проводился в соответствии с выражениями, полученными в работе [4].

Гистерезисные потери от поля с амплитудным значением напряженности  $H_m$  и частотой  $f$  определялись по формулам

$$q_\Gamma = \frac{256 \lambda \mu_0 H_m^3 f}{27 \pi d j_k}, \quad H_m < H_p < j_k \frac{d}{2},$$

$$q_\Gamma = \frac{2 \lambda \mu_0 d H_m j_k f}{3}, \quad H_m \geq H_p,$$

где  $H_p$  – поле полного проникновения в сверхпроводник.

Потери на вихревые токи рассчитывались по соотношению

$$q_e = \frac{(\pi R_0 \mu_0 H_m f)^2}{8 p_m(B)},$$

где  $R_0$  – радиус провода без изоляции.

Кооперативные потери находились в соответствии с выражениями, полученными в работе [4], в зависимости от частоты и амплитуды воздействующего переменного магнитного поля

$$q_{\dot{E}} = \frac{\mu_0^2(1-\lambda)^2 H_m^2 l_T^2 f^2}{4p_m}, \quad f < f_1, H_m < H_p,$$

$$q_{\dot{E}} = \frac{\mu_0^2(1+\lambda)H_m^2 l_T^2 f^2}{(1-\lambda)p_m}, \quad f < f_1, H_m \geq H_p,$$

$$q_{\dot{E}} = \frac{8\pi^2(1-\lambda)^2 H_m^2 p_m l_T^2}{(1+\lambda)l_T^2}, \quad f \leq f_1 \leq f_2,$$

$$q_{\dot{E}} = \frac{8\pi^2(1-\lambda)R_0 \sqrt{\pi\mu_0} f p_m H_m^2}{(1+\lambda)l_T^2}, \quad f > f_1,$$

где  $f_1 = \left(\frac{2\pi}{l_T}\right)^2 \frac{p_m}{\pi\mu_0}$ ,  $f_2 = \frac{p_m}{2R_0^2 \pi\mu_0}$ ,  $p_m = \frac{1}{\sigma_{\text{ПР}} \mu_{\text{ПР}}}$  – удельная проводимость и относительная магнитная проницаемость в направлении, перпендикулярном сверхпроводящим жилам;  $l_T$  – шаг твиста.

Совокупность приведенных выражений позволила определить зависимость амплитуды индукции переменного магнитного поля от частоты, вызывающей переход СПОВ в нормальное состояние.

Расчётные зависимости теплоотода и тепловыделения для центрального сечения представлены на рис. 2.

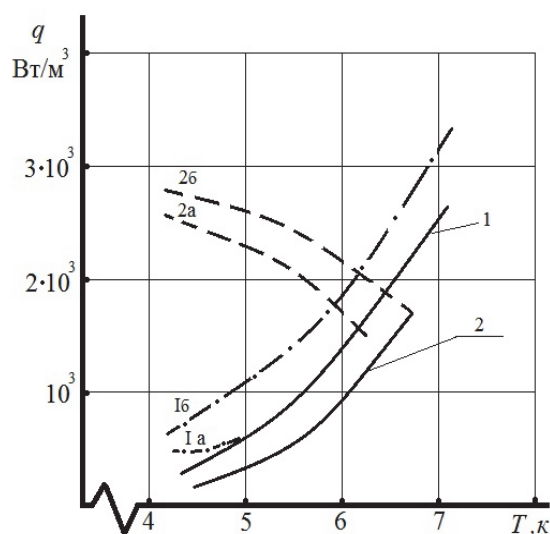


Рис. 2. Потери и теплоотвод для центрального сечения обмотки:

1, 2 – теплоотвод из обмоток 1, 2; 1а – потери в обмотке 1

при  $I = 75 \text{ A}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $B_m = 0,015 \text{ Тл}$ ; 1б –  $B_m = 0,02 \text{ Тл}$ ;

2а – потери в обмотке 2 при  $I = 800 \text{ A}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $B_m = 0,015 \text{ Тл}$

Экспериментальное исследование устойчивости СПОВ, изготовленных из промышленных ниобий-титановых и ниобий-оловянных проводов, проводилось в диапазонах частоты воздействующего поля от 2 до 50 Гц и значений рабочего тока СПОВ от 0,5 до 0,99  $I_k$ . Сверхпроводящая обмотка, предварительно запитанная постоянным током, подвергалась воздействию переменного магнитного поля. В ходе эксперимента определялась зависимость времени воздействия переменного магнитного поля на обмотку до перехода её в нормальное состояние в зависимости от амплитуды индукции. Эксперименты проводились для разных значений, рабочего тока и частоты пере-

менного поля. На основании этих результатов получено минимальное критическое значение амплитуды индукции для СПОВ, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры сверхпроводящих обмоток

Название параметров	Обмотка 1	Обмотка 2
Размеры, мм	360×190×30	350×120×37
Сечение обмотки, мм	80×30	40×37
Количество секций	1	2
Количество витков	3000	350 (230 ÷ 120)
Компаунд	Эпоксидный с наполнителем	Эпоксидный без наполнителя
Материал провода / матрицы	NbTi / медь	Nb <sub>3</sub> Sn / бронза
Диаметр, мм	0,85	1,26
Количество жил	37	7225
Диаметр жил, мкм	90	5
Шаг скрутки, мм	25	25

В результате экспериментальных исследований были определены зависимости уровня критического амплитудного значения индукции от частоты для различных значений тока обмотки (см. рис. 3). Эксперименты показали высокую повторяемость результатов для идентичных обмоток и удовлетворительное совпадение с расчётными данными.

Выполненное экспериментальное сравнение однотипных обмоток, изготовленных из ниобий-титанового и ниобий-оловянного круглых проводов, показало, что использование последнего позволяет примерно на порядок повысить допустимый уровень индукции переменного магнитного поля, воздействующего на СПОВ.

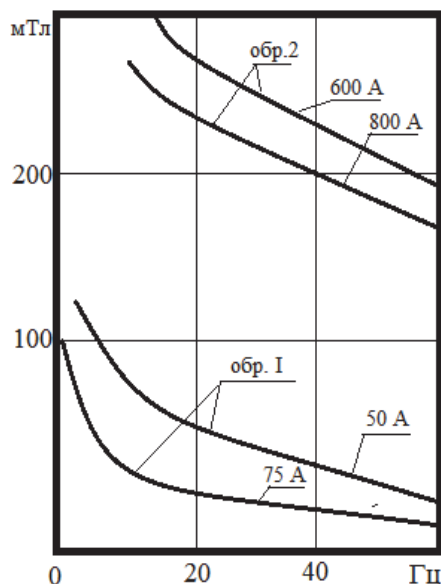


Рис. 3. Зависимость критической индукции переменного поля

**Исследование потерь энергии в сверхпроводниках при работе во вращающемся магнитном поле.** Рассмотрим процесс диссипации энергии в СПОВ при воздействии на них вращающегося магнитного поля величиной до 0,05 Тл при наличии постоянного поля подмагничива-

ния с индукцией до 2 Тл. Полученные экспериментальные зависимости полных потерь мощности в сверхпроводящих образцах при воздействии на них вращающегося с частотой 50 Гц магнитного поля приведены на рис. 4. Данные исследованных образцов приведены в табл. 2.

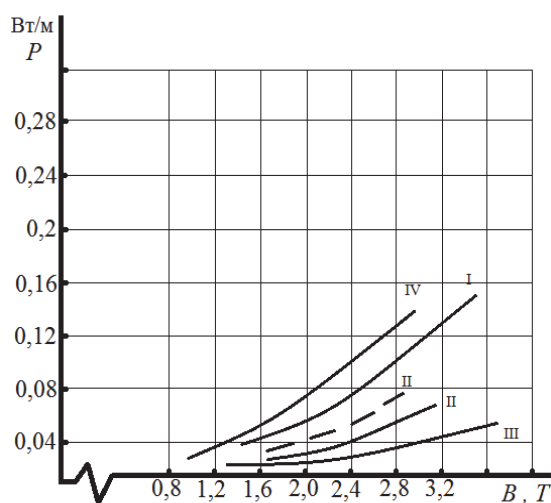


Рис. 4. Зависимость потерь мощности в сверхпроводящих образцах от амплитуд внешнего вращающегося магнитного поля:  
 — эксперимент; - - - расчет

Таблица 2

Параметры сверхпроводящих образцов

Наименование параметров	Номер образца			
	I	II	III	IV
Размер провода, мм	Провод Ø1,5	Шина 2×3,5	Проволока Ø0,7	Шина 2×3,5
Материал матрицы	Медь	Медь – МН-5	Медь	Медь
Количество СП жил	1045	3630	61	3630
Коэффициент заполнения обмотки сверхпроводником	0,35	0,395	0,52	0,35
Высота образца, м	0,05	0,05	0,05	0,05
Число проводников в образце	58	138	372	138
Длина провода, м	2,9	6,9	18,6	6,9

Теоретическая оценка потерь мощности в сверхпроводнике от воздействия вращающегося магнитного поля выполнялась по следующей методике:

1) Поперечное вращающееся магнитное поле, приложенное к сверхпроводнику, представлялось в виде суммы двух взаимно перпендикулярных векторов

$$B_a = B_a^m \sin \omega t \cdot e_x + B_a^m \cos \omega t \cdot e_y,$$

где  $B_a^m$  – амплитуда внешнего поля;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $e_x, e_y$  – единичные орты.

2) Потери на гистерезис в сверхпроводящей жиле за цикл на единицу объема в случае неполного проникновения поля в сверхпроводящие жилы определялись по формуле [4], Дж/м<sup>3</sup>:

$$W_{h \text{ rot}} = \frac{4\pi}{3\mu_0} \lambda B_p f B^m [1 - \exp(-4\beta_f^2) - 8\beta_f^3 \exp(-4,75\beta_f)] \cdot \left(\frac{R}{R+C}\right),$$

где  $\beta_f = \frac{2B^m}{\mu_0 dj_c}$ ,  $B^m = \frac{\mu_1 B_a^m}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{0,5}}$ ,  $\mu_1 = \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda}$ ;  $d$  – диаметр сверхпроводящей жилы;  $\lambda$  – коэффициент заполнения по сверхпроводнику  $\tau = \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{l_T}{2\pi}\right)^2 (\sigma_{пр} + \frac{C}{R} \sigma_{поп})$ ;  $R$  – радиус композита;  $C$  – толщина наружной оболочки матрицы;  $\sigma_{пр}$ ,  $\sigma_{поп}$  – проводимость в продольном и поперечном направлениях.

В случае полного проникновения магнитного поля в сверхпроводящие жилы гистерезисные потери в цилиндрической сверхпроводящей жиле определяются по формуле [6], Вт/м<sup>3</sup>:

$$P_h = \frac{4}{3} f dj_c B^m,$$

где  $f$  – частота изменения магнитного поля;  $j_c$  – критическая плотность тока.

Расчётная зависимость удельных гистерезисных потерь от величины поля подмагничивания для различных значений амплитуды вращающегося с частотой 50 Гц магнитного поля приведена на рис. 5. Результаты исследований показали, что вращательные гистерезисные потери ~ в 1,28 раза выше, чем потери на гистерезис в случае пульсирующего поля.

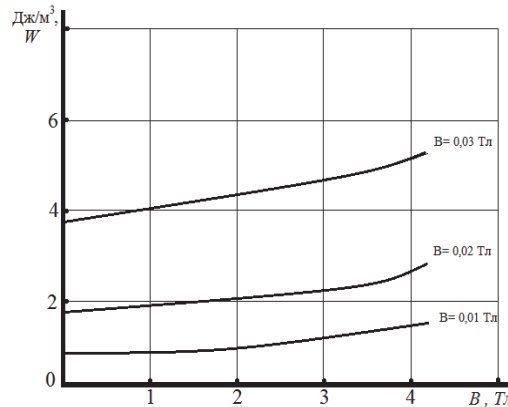


Рис. 5. Зависимость гистерезисных потерь мощности в образце II от величины поля подмагничивания

Если плотность потока экранирующего магнитного поля

$$B_s = B^m \omega \tau / (1 + \omega^2 \tau^2)^{0,5}$$

удовлетворяет следующему условию:

$$B_s \ll \frac{\mu_0 d j_c}{\pi} = B_p,$$

то потери на вихревые токи на единицу объёма определяются по следующему выражению [6]:

$$P_e = 2 \frac{B_a^m \omega^2 \tau}{\mu_1 (1 + \omega^2 \tau^2)}.$$

Если  $B_s > \mu_0 d j_c$ , то для расчета потерь на вихревые токи на единицу объёма использовалась следующая формула:

$$P_e = \frac{3\pi}{4} \frac{128 B_a^m \omega^4 \tau^3}{9\pi^3 \mu_1 B_p (1 + \omega^2 \tau^2)^{3/2}}.$$

По данной методике выполнен оценочный расчет потерь в сверхпроводящем образце II, данные которого приведены в табл. 2. Расчетные точки приведены на рис. 4.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что наибольшее расхождение между расчетными и экспериментальными значениями, исследованных в диапазоне амплитуды вращающегося магнитного поля от 0,01 до 0,05 Тл, составляет 33 % и увеличивается по мере роста амплитуды воздействующего внешнего поля.

Следует отметить, что в исследованном диапазоне воздействующих полей и частот в сверхпроводящем образце преобладают потери на вихревые токи, а потери на гистерезис незначительны и составляют десятые доли процента.

### Выводы

1. На основе проведенных исследований предложена методика расчёта потерь энергии в  $Nb_3Sn$  сверхпроводниках от воздействия вращающегося магнитного поля.

2. Экспериментально исследовано влияние поперечного магнитного поля на гистерезисные потери в ленточном проводнике. Установлено, что поперечное магнитное поле вызывает рост гистерезисных потерь при всех значениях амплитуды магнитного поля.

3. Разработана методика расчёта распределения температуры в сверхпроводящей обмотке в режиме заведения тока, позволяющая определить максимальную скорость запитки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости / К. К. Ким. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. – 360 с.
2. Ким, К. К. Транспортная система с кондукционным подвесом при движении экипажа с малой скоростью / К. К. Ким // *Электротехника*. – 1998. – № 11. – С. 36-41.
3. Ким, К. К. Использование сверхпроводящего подвеса в транспортных системах / К. К. Ким // *Электротехника*. – 2000. – № 6. – С. 16-19.
4. Ким, К. К. Об одном способе автоматического причаливания космических аппаратов / К. К. Ким // *Космические исследования*. – 1996. – Т. 34(№ 1). – С. 1-4.
5. Ким, К. К. Об одном способе стыковки космических аппаратов / К. К. Ким // *Космические исследования*. – 2000. – Т. 38(№ 2). – С. 221-224.
6. Laskaris, T. E. Transient thermal analysis of epoxy-impregnated superconducting windings in linear ramped field / T. E. Laskaris // *Journal of Heat Transfer*. – 1978, 100. – № 4. – pp. 702-707.
7. Уильямс, Дж. Сверхпроводимость и ее применение в технике / Дж. Уильямс. – М.: Мир, 1973. – С. 135.
8. Carr, W. J. Alternating field loss in multifilamentary superconducting wire for weak AC field superposed on a constant bias / W. J. Carr, M. S. Walker, J. H. Murphy // *Journal Applied Physics*. – 1974, 46. – № 9. – pp. 4048-4052.
9. Pang, C. Losses in NbTi multifilamentary composite when exposed to transverse alternating and rotating field / C. Pang, A. M. Campbell, P. M. Laren // *IEEE Transaction on Magnetics*. – Vol-Mag-17. – № 1. – January, 1981.
10. Hlasnik, I. Could cryoturbogenerator armature winding be superconducting? / I. Hlasnik. – 03.05.01. June, 1982. Institute für Technishe Physik.
11. Иванов, С. Н. Некоторые вопросы использования сверхпроводящих обмоток возбуждения в режиме «замороженного» потока / С. Н. Иванов, И. Д. Лупкин // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1982. – С. 1344-1347.

**Кравченко Е. Г., Китаева А. А., Коровина Н. Ю.**  
E. G. Kravchenko, A. A. Kitaeva, N. Yu. Korovina

**ПРОГРАММА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ**

**PROGRAM OF EVALUATION OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEM PERFORMANCE OF ENTERPRISE**

**Кравченко Елена Геннадьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

**Ms. Elena G. Kravchenko** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of mechanical engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

**Китаева Анастасия Александровна** – магистрант кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: star8793@mail.ru.

**Ms. Anastasia A. Kitaeva** – master's degree student, Department of mechanical engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: star8793@mail.ru.

**Коровина Наталья Юрьевна** – магистрант кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: nataffka240893@mail.ru.

**Ms. Natalia Yu. Korovina** – master's degree student, Department of mechanical engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: nataffka240893@mail.ru.

**Аннотация.** В условиях жесткой конкурентной борьбы на рынке отечественных и зарубежных организаций выжить могут лишь компании, обладающие главным конкурентным преимуществом – высоким качеством менеджмента. Вопросы, связанные с проблемой адекватной и объективной оценки, а также последующего анализа результативности СМК приобретают вид задачи как теоретической, так и практической значимости.

**Summary.** Under the conditions of fierce competition in the domestic and foreign, only those companies can survive that possess such major competitive advantage as high quality management. Issues related to the adequate and objective assessment and subsequent analysis of the quality management effectiveness are of theoretical and practical significance.

**Ключевые слова:** система менеджмента качества, результативность системы менеджмента качества, оценка качества.

**Key words:** quality management system, effectiveness of a quality management system, quality assessment.

УДК 65.018

**Введение**

В условиях жесткой конкурентной борьбы на рынке отечественных и зарубежных организаций выжить могут лишь компании, обладающие главным конкурентным преимуществом – высоким качеством менеджмента.

Мировая практика показала, что применение принципов международного стандарта ISO серии 9000 на сегодняшний день является надежным инструментом для построения результативной системы управления, повышения конкурентоспособности и создания благоприятных условий для роста инвестиций. В стандартах ISO серии 9000 одним из основных инструментов совершенствования деятельности организации в области качества является измерение результативности

действующей СМК. Поэтому вопросы, связанные с проблемой адекватной и объективной оценки, а также последующего анализа результативности СМК приобретают вид задачи как теоретической, так и практической значимости.

### Методика оценки результативности СМК

Оценка результативности процессов СМК проводится ежегодно по основным показателям результативности процессов.

При проведении оценки по измеримым параметрам (показателям) владельцы процессов регистрируют данные по форме и направляют результаты в Отдел менеджмента качества для оценки результативности процессов (подпроцессов) СМК и всей системы в целом.

Каждый показатель может быть определен:

- исходя из отношения фактических данных к планируемому, если имеется планируемый уровень;

- посредством сравнения данных за текущий и предыдущий период, если планируемый уровень отсутствует.

Расчёт показателей процессов (подпроцессов) СМК в соответствии с плановыми и фактическими значениями критериев производится по формуле

$$ПР = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{\text{вып } i} \times 100,$$

где ПР – показатель результативности;  $K_{\text{вып } i}$  – коэффициент выполнения  $i$ -го показателя.

Коэффициент выполнения ( $K_{\text{вып}}$ ) определяется по каждому показателю как отношение фактического значения показателя к плановому и характеризует степень достижения плановых значений показателя.

Для показателей процессов (подпроцессов), по которым не установлены плановые значения, рассчитываются коэффициенты сравнения.

Коэффициент сравнения ( $K_c$ ) определяется по каждому показателю как отношение значения показателя процесса (подпроцесса) за предыдущий период и характеризует рост или снижение значения показателя.

Расчёт результативности процессов (подпроцессов) СМК производится методом взвешенной суммы оценок показателей с учетом весовых коэффициентов и показателей результативности по формуле

$$ПРП = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ПР_i \times \alpha_i,$$

где ПРП – показатель результативности процесса;  $ПР_i$  – показатель результативности  $i$ -го показателя;  $\alpha$  – весовой коэффициент показателя.

Весовые коэффициенты показателей определяются по каждому процессу по формуле

$$\alpha = \left( \sum_{i=1}^n A \right) / N,$$

где  $\alpha$  – весовой коэффициент критерия;  $A$  – оценка, данная  $i$ -м экспертом;  $N$  – количество экспертов.

### Оценка результативности СМК

Определение результативности СМК предприятия в соответствии с показателями результативности и весовыми коэффициентами процессов производится по формуле

$$ПРСМК = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ПРП_i \times m_i),$$

где ПРСМК – показатель результативности СМК;  $ПРП_i$  – показатель результативности  $i$ -го процесса (подпроцесса);  $m_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го процесса (подпроцесса).

### Алгоритм оценки результативности СМК

Общая последовательность оценки результативности СМК предприятия приведена на рис. 1.

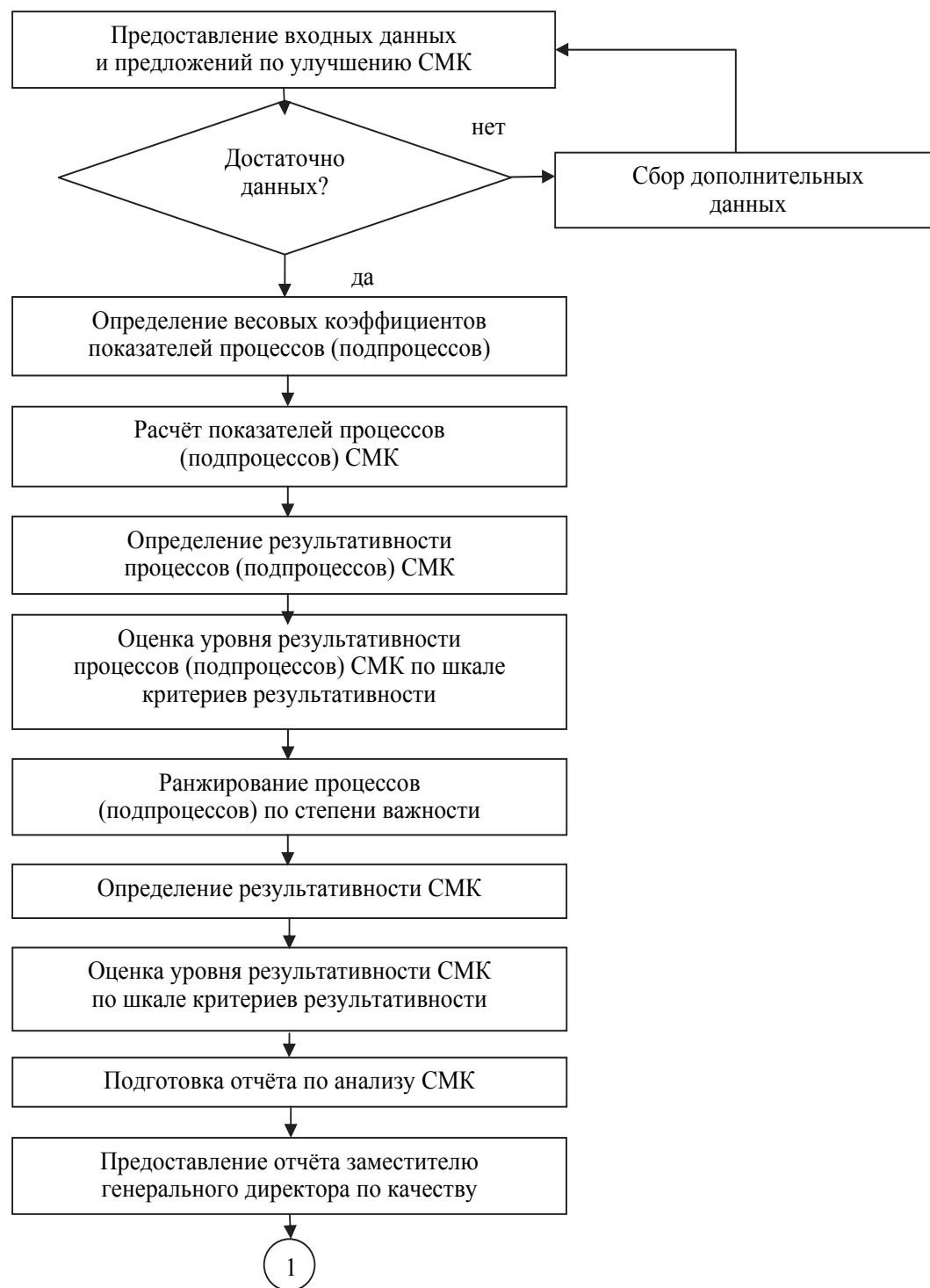


Рис. 1. Последовательность оценки результативности СМК

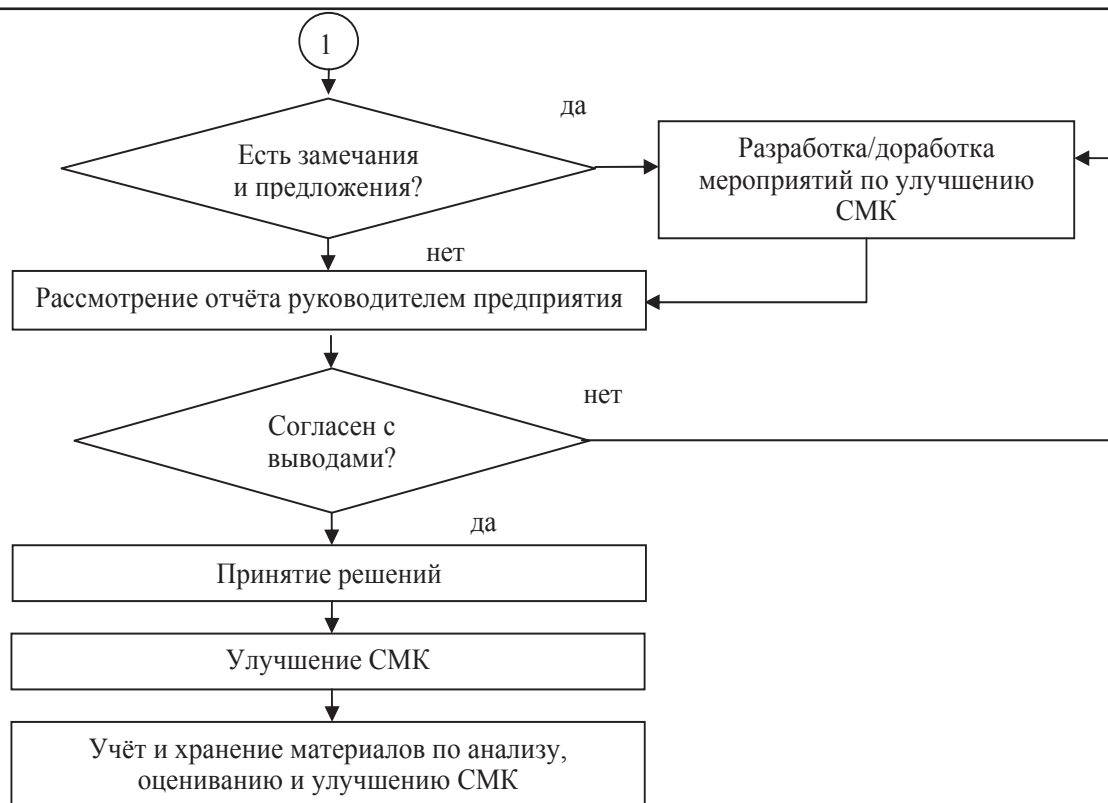


Рис. 1. Последовательность оценки результативности СМК (продолжение)

### Программа для оценки результативности СМК

Анализ результативности СМК позволяет проанализировать состояние всей системы или отдельных ее элементов и определить степень соответствия установленным требованиям. На рис. 2 представлен алгоритм последовательности оценки процессов СМК.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма оценки процессов СМК

Разработана методика, которая может использоваться при оценивании результативности СМК предприятия и проведении мероприятий по улучшению эффективности системы. Методика основана на применении процессного подхода, т.е. использовании ряда процессов для оценки СМК на соответствие требованиям стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015. В качестве практического инструмента реализации этой методики разработана электронная система оценки результативности СМК предприятия, которая основана на использовании электронной формы.

Блок-схема для алгоритма подпрограмм первого уровня: «1 Стратегическое планирование»; «2 Анализ со стороны руководства»; «5 Управление документированной информацией»; «8 Управление метрологическим обеспечением»; «12 Производство продукции» показана на рис. 3.

Блок-схема для алгоритма подпрограмм второго уровня: «3 Улучшение СМК»; «4 Планирование»; «6 Управление персоналом»; «7 Управление инфраструктурой»; «9 Взаимодействие с потребителем»; «10 Закупки»; «11 Подготовка производства» показана на рис. 4.

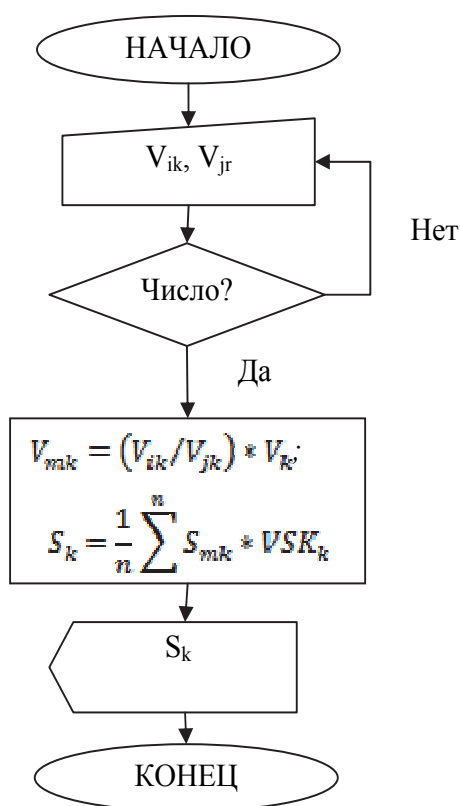


Рис. 3. Блок-схема для алгоритма подпрограмм первого уровня

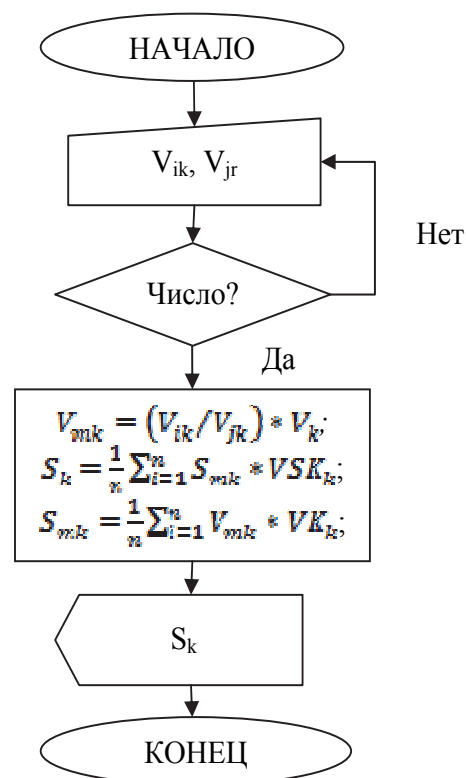


Рис. 4. Блок-схема для алгоритма подпрограмм второго уровня

Блок-схема для алгоритма подпрограммы третьего уровня: «Результативность СМК» показана на рис. 5.

Работа программы начинается с запуска приложения Project1.exe. Первая страница формы приложения приведена на рис. 6.

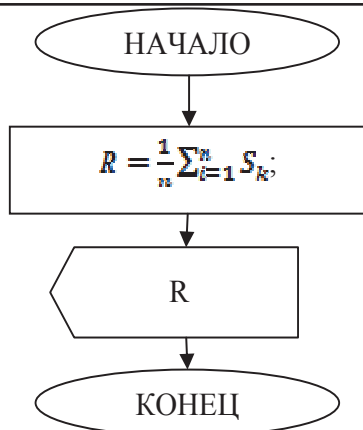


Рис. 5. Блок-схема для алгоритма подпрограммы третьего уровня

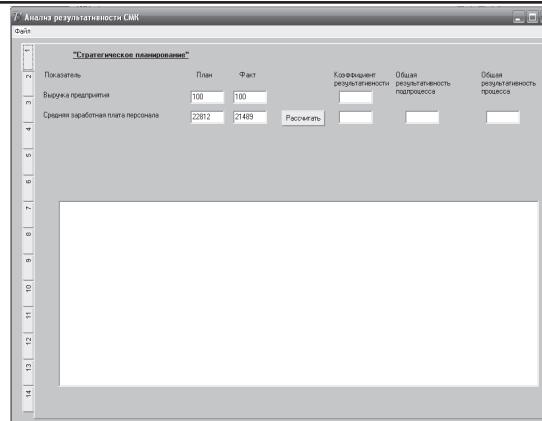


Рис. 6. Первая страница формы приложения в программе

На рис. 7 изображено окно приложения, в котором производится расчёт результативности СМК и вывод рекомендаций по улучшению СМК.

После завершения расчёта программа в специальном окне выдаёт результаты анализа результативности СМК (см. рис. 8).

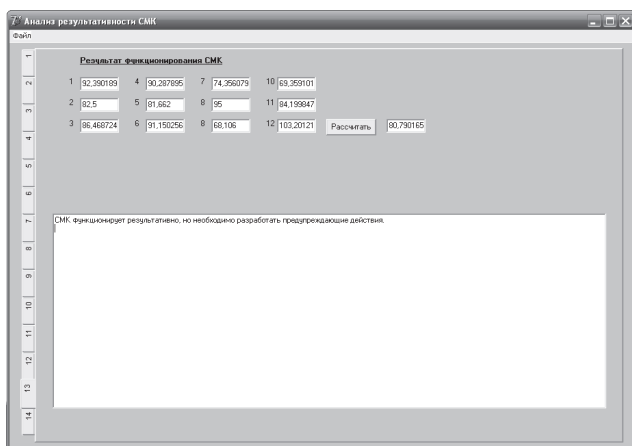


Рис. 7. Вкладка расчёта результативности СМК в программе

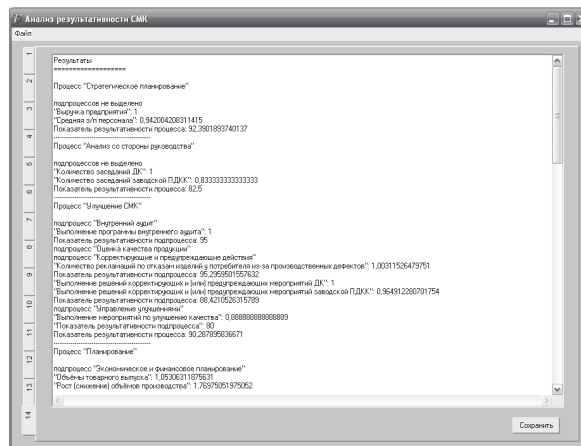


Рис. 8. Вывод результатов в программе

## Заключение

Важными аспектами обеспечения качества предоставляемых услуг и выпускаемой продукции являются дееспособная система менеджмента качества и адекватная оценка ее результативности. Грамотный подход к оценке результативности СМК и ее процессов – залог успеха функционирования СМК.

Важной особенностью разработанной методики является количественная оценка процессов результативности СМК предприятия, что позволяет владельцам процессов принять активное участие в управлении качеством.

В качестве практического инструмента реализации этой методики разработана электронная система оценки результативности СМК предприятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Система менеджмента качества. Требования. – Введ. 2015-11-01. – М.: Стандартинформ, 2015.

**Черный С. П., Духно А. А., Чигрин Д. Ю., Толибов Б. Н.**  
**S. P. Cherny, A. A. Dukhno, D. Yu. Chigrin, B. N. Tolibov**

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ**

## **ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF REDUCING THE FUZZY REGULATOR INFORMATION EXCESS**

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

**Mr. Sergey P. Cherny** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electro-Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

**Духно Андрей Андреевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

**Mr. Andrey A. Dukhno** – Master's Degree student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

**Чигрин Денис Юрьевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

**Mr. Denis Yu. Chigrin** – Master's Degree student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

**Толибов Бохтиер Назриевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

**Mr. Bokhtier N. Tolibov** – Master's Degree student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [kerapu@knastu.ru](mailto:kerapu@knastu.ru).

**Аннотация.** В работе представлен один из возможных подходов к снижению информационной избыточности нечетких систем управления, позволяющий существенно упростить возможность реализации регулятора, основанного на мягких вычислениях для систем промышленной автоматизации.

**Summary.** The paper presents one possible approach to reduce the information redundancy of fuzzy control systems to simplify the ability of the controller based on soft computing for industrial automation systems.

**Ключевые слова:** нечеткий логический регулятор, информационная избыточность, техническая реализация интеллектуальных систем управления.

**Key words:** fuzzy logic controller, information redundancy, the technical implementation of intelligent control systems.

УДК 6283.621.3

На сегодняшний день при моделировании и проектировании промышленных систем управления достаточно широко применяются интеллектуальные системы, использующие в своей основе подходы, базирующиеся не теории нечеткой логики. Зачастую, при синтезе таких систем управления возникают проблемы с избыточностью информации в основных функциональных блоках нечетких регуляторов, обусловленной неопределенностью этой информации, субъективной составляющей, связанной с наличием человека-эксперта в контуре регулирования и отсутствием строгих алгоритмов и рекомендаций при настройке таких систем. Кроме того, необходимо отметить, что процесс проверки интеллектуальных систем управления с нечеткой логикой с целью выявления избытка информации представляет собой достаточно сложную задачу. Информационная избыточ-

ность может проявляться целым набором параметров, например количеством нечетких переменных в базовом терм-множестве, излишним набором нечетких продукционных правил, а также выбором достаточного числа входных лингвистических переменных [1]. Однако в ходе обработки больших объемов такой информации основными блоками регулятора, основанного на теории мягких вычислений, существенно сокращается его быстродействие. Эти ограничения снижают возможности по использованию таких систем при решении задач управления на существующей программно-аппаратной базе для технологических процессов с быстро изменяющимися во времени характеристиками. Таким образом, влияние вышеуказанных параметров нечеткого логического регулятора накладывает большое количество ограничений на их реализацию существующими средствами промышленной автоматизации.

В данной статье рассматривается возможность снижения информационной и алгоритмической нагрузки нечеткого логического регулятора путем сокращения количества информации, используемой в основных функциональных блоках интеллектуального управляющего устройства.

Рассмотрим математическую модель системы автоматического управления скоростью с регулятором, настроенным на типовые алгоритмы нечеткого логического вывода (см. рис. 1).

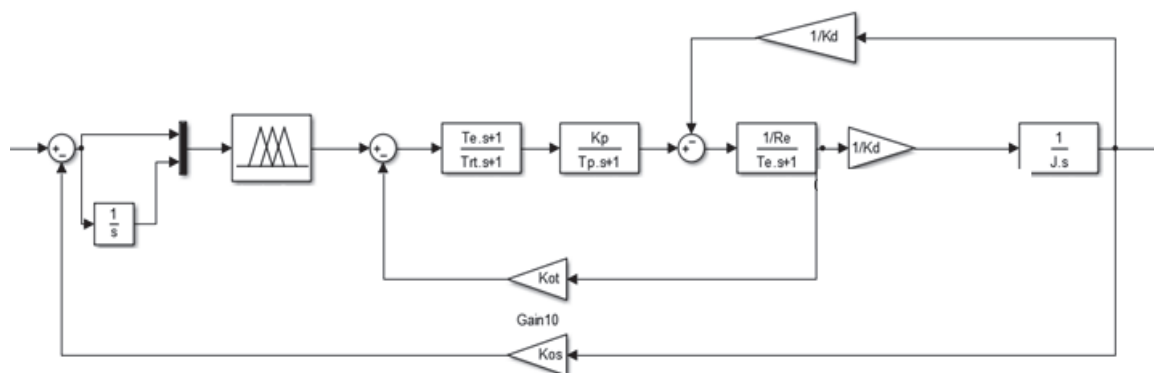


Рис. 1. Структурная схема нечеткой системы управления

Синтезированный типовой нечеткий регулятор в своей основе имеет алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани с двумя лингвистическими переменными на входе и одной лингвистической переменной на выходе. Каждая лингвистическая переменная ограничена пятью нечеткими переменными в базовом терм-множестве. Диапазоны регулирования для входных и выходных лингвистических переменных определены по результатам моделирования «классической» системы управления [2]. Распределение и форма функций принадлежности входных лингвистических переменных показаны на рис. 2 – 3, выходной лингвистической переменной – на рис. 4.

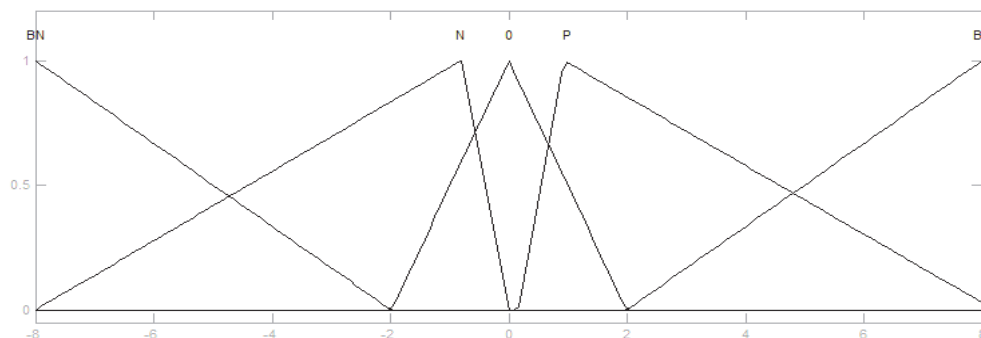


Рис. 2. Распределение функций принадлежности входной лингвистической переменной «Ошибка управления»

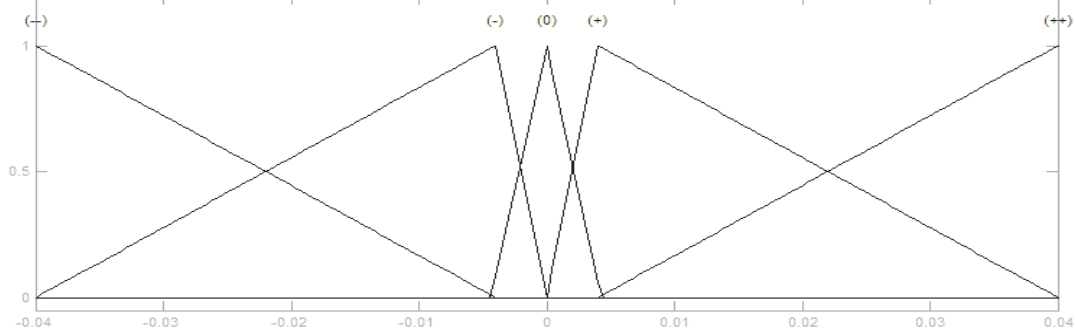


Рис. 3. Распределение функций принадлежности лингвистической переменной «Интеграл от ошибки управления»

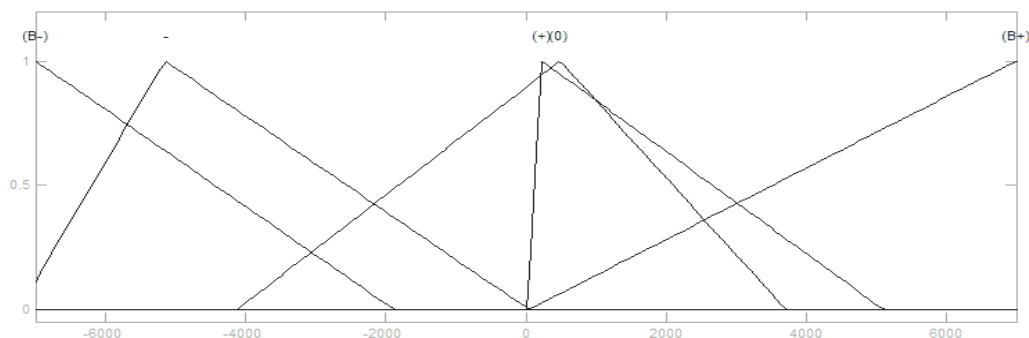


Рис. 4. Распределение функций принадлежности лингвистической переменной «Сигнал управления контуром тока»

На основании анализа графиков переходных процессов в классической системе управления и знаний о функционировании представленной модели объекта регулирования для моделируемой нечеткой системы была сформирована база знаний, состоящая из следующего набора нечетких продукционных правил [3]:

- ЕСЛИ «X» есть ВР, ТО «Out» есть (В+);
- ЕСЛИ «X» есть 0 и «Int(X)» есть (0), ТО «Out» есть (0);
- ЕСЛИ «Int(X)» есть (++), ТО «Out» есть (0);
- ЕСЛИ «X» есть Р, ТО «Out» есть (+);
- ЕСЛИ «X» есть N и «Int(X)» есть (+), ТО «Out» есть (-).

График переходного процесса по скорости в синтезированной интеллектуальной системе представлен на рис. 5.

Проанализировав характеристики «классического» регулятора, базу продукционных правил и лингвистические переменные, описывающие входы нечеткого регулятора, можно сделать вывод, что некоторыми функциями принадлежности и, как следствие, некоторыми правилами можно пренебречь. В ходе анализа переходных характеристик также было выявлено, что отсутствие лингвистической переменной «интеграл от ошибки управления» не оказывает существенного влияния на качество функционирования системы в целом.

Итерационное преобразование нечеткого логического регулятора приведет к тому, что он будет описываться единственной входной лингвистической переменной с тремя термами в базовом множестве и одной лингвистической переменной на выходе с двумя термами в базовом множестве (см. рис. 6 – 7).

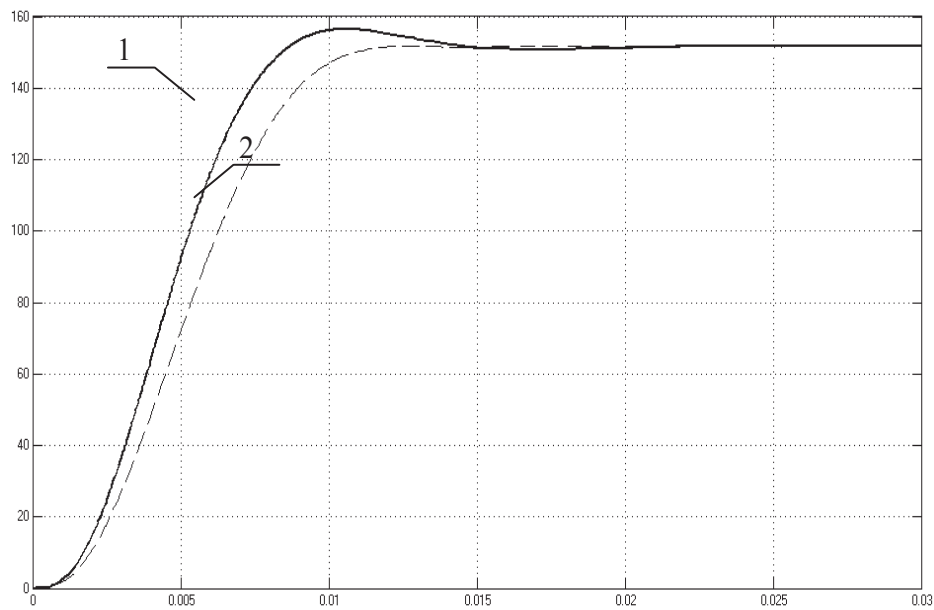


Рис. 5. Графики переходных процессов по скорости: 1 – исходной системы с классическим регулятором; 2 – системы с нечетким регулятором

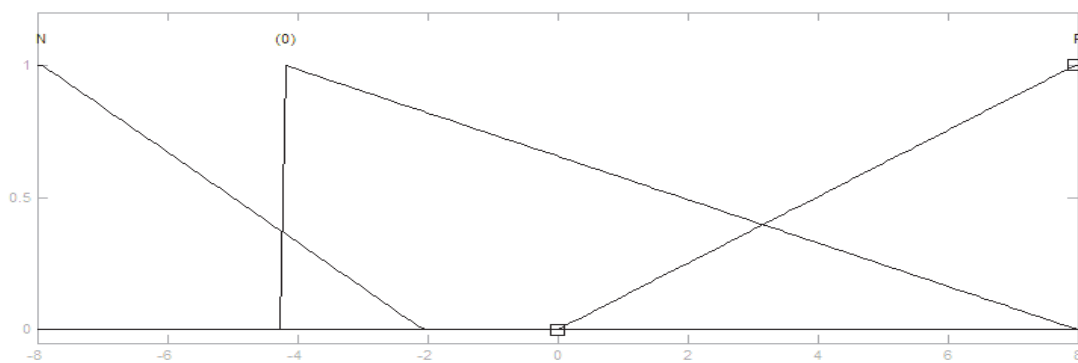


Рис. 6. Распределение функций принадлежности входной лингвистической переменной «Ошибка управления»

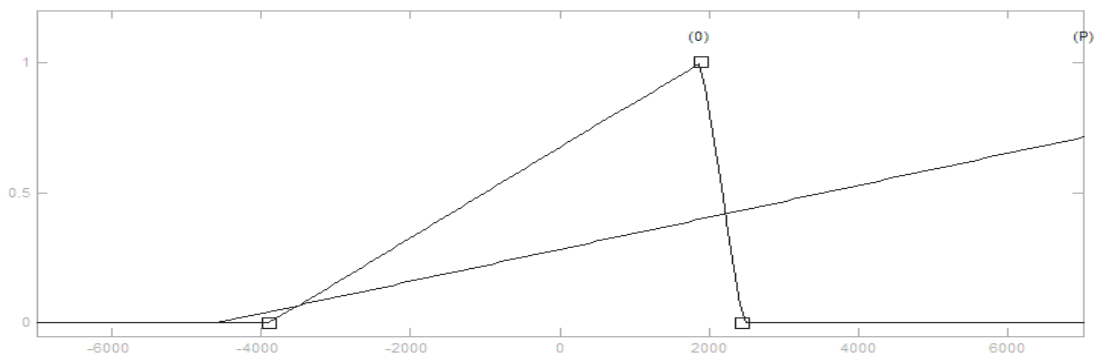


Рис. 7. Распределение функций принадлежности выходной лингвистической переменной «Сигнал управления контуром тока»

После проведенных операций преобразованная база знаний будет состоять из двух продукционных правил:

- 1) ЕСЛИ «X» есть (0), ТО «Out» есть (0);
- 2) ЕСЛИ «X» есть (P), ТО «Out» есть (P).

Как видно из графика, представленного на рис. 8, интеллектуальная система с упрощенным логическим регулятором функционирует адекватно, но является менее точной по сравнению с системой с устройством управления, настроенным на типовой алгоритм нечеткого логического вывода. Однако в сравнении с классической системой выходной сигнал достигает установившегося значения с наименьшим временем протекания переходного процесса.

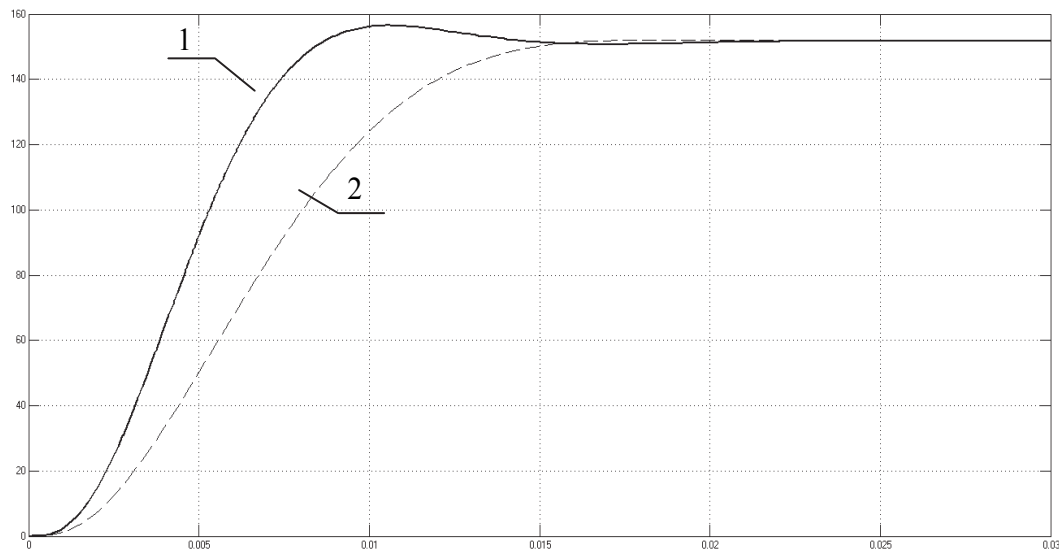


Рис. 8. Графики переходных процессов по скорости: 1 – исходной системы с классическим регулятором; 2 – системы с упрощенным нечетким регулятором

Настройка типового нечеткого регулятора на алгоритм Сугено производится аналогично настройке на алгоритм Мамдани, но с одним отличием: в выходной лингвистической переменной вместо базового терм-множества используются четкие переменные (упрощенный алгоритм нечеткого логического вывода) [4].

Обозначение и распределение входных функций принадлежности будут аналогичны с алгоритмом Мамдани (см. рис. 3 – 4). База знаний будет также состоять из пяти продукционных правил:

- 1) ЕСЛИ «X» есть VP, ТО «Out» есть (++);
- 2) ЕСЛИ «X» есть 0 и «Int(X)» есть (0), ТО «Out» есть (0);
- 3) ЕСЛИ «Int(X)» есть (++) , ТО «Out» есть (0);
- 4) ЕСЛИ «X» есть P, ТО «Out» есть (+);
- 5) ЕСЛИ «X» есть N и «Int(X)» есть (+), ТО «Out» есть (-).

График переходного процесса смоделированной системы автоматического регулирования скорости с устройством управления, настроенным на типовой алгоритм нечеткого логического вывода Сугено, представлен на рис. 9.

Регулятор с алгоритмом вывода Сугено упрощается аналогичным способом. После анализа характеристик «классического» регулятора, его лингвистических переменных и базы знаний редуцируется смоделированный ранее регулятор [5].

Синтезированное нечеткое устройство управления имеет на входе одну лингвистическую переменную, состоящую из трех функций принадлежности (см. рис. 10).

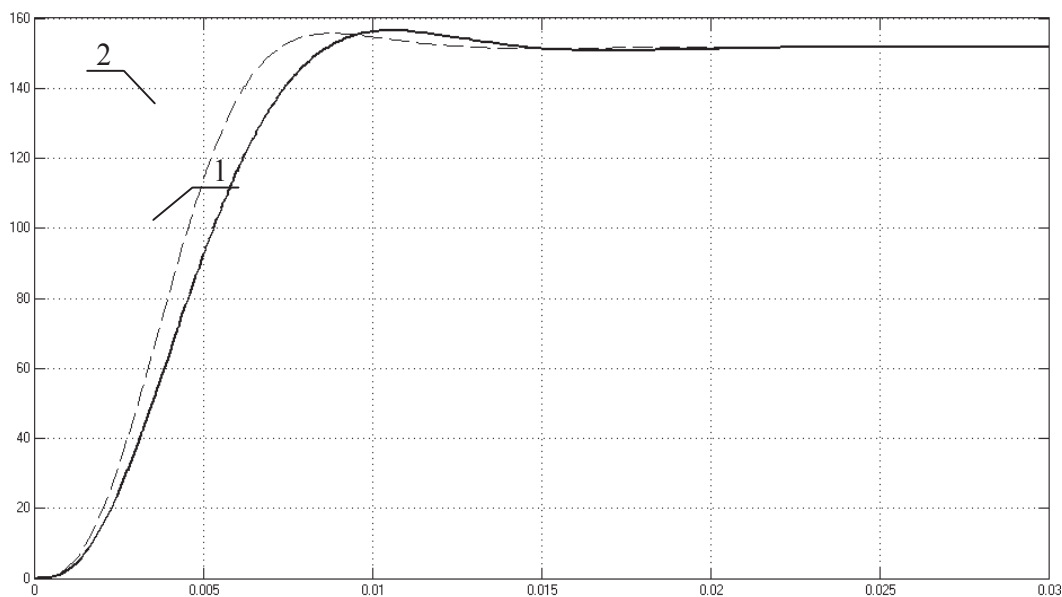


Рис. 9. Графики переходных процессов по скорости: 1 – исходной системы с классическим регулятором; 2 – системы с нечетким регулятором

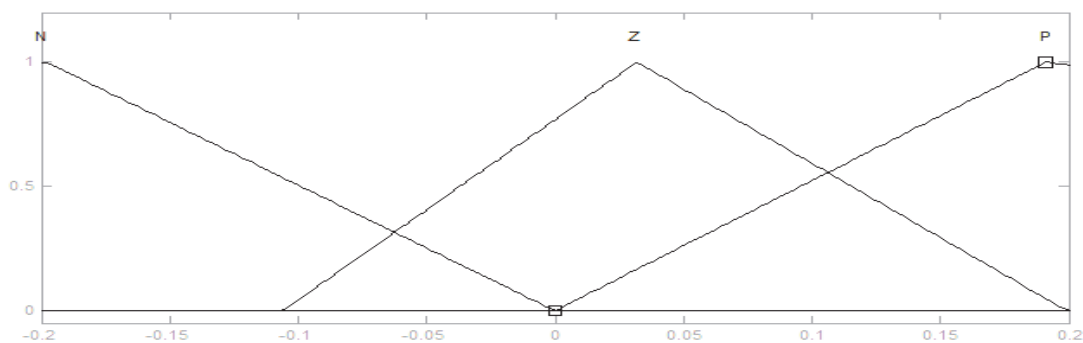


Рис. 10. Распределение функций принадлежности входной лингвистической переменной «Ошибка управления»

База продукционных правил упрощенного нечеткого регулятора с алгоритмом вывода Сугено имеет вид:

- 1) ЕСЛИ «X» есть Z, ТО «Out» есть 0;
- 2) ЕСЛИ «X» есть P, ТО «Out» есть (+);
- 3) ЕСЛИ «X» есть N, ТО «Out» есть 0.

Так же, как и в предыдущем случае, полученное устройство управление является работоспособным и улучшает переходный процесс системы в части быстродействия (см. рис. 11).

Техническая реализация интеллектуальных систем управления с регуляторами, обладающими сокращенной информационной и алгоритмической избыточностью, позволяет получить улучшенный переходный процесс в части быстродействия не только на программном, но и на аппаратном уровне за счет меньшего объема информации, обрабатываемой в основных функциональных блоках нечеткого устройства управления, в результате чего сокращается время отклика регулятора.

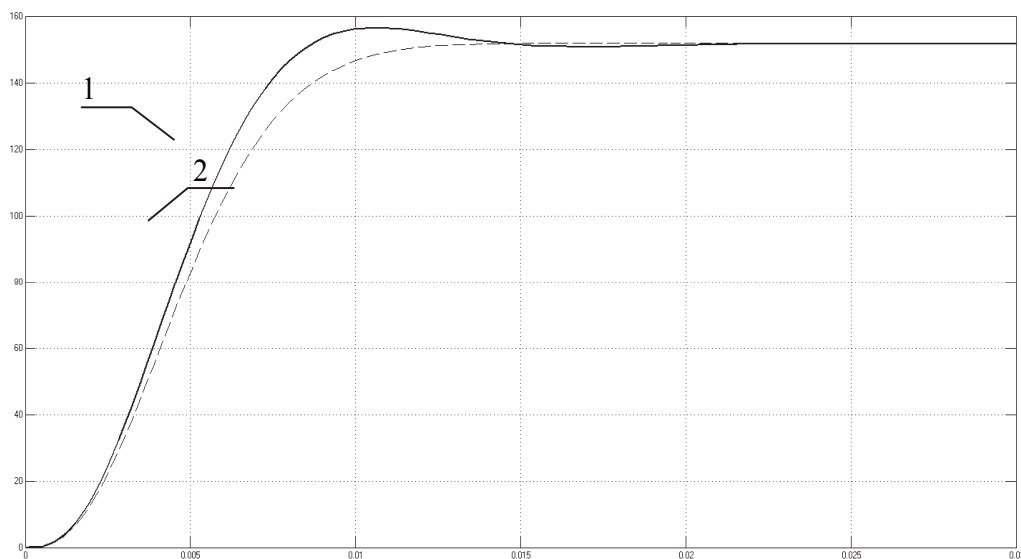


Рис. 11. Графики переходных процессов по скорости: 1 – исходной системы с классическим регулятором; 2 – системы с упрощенным нечетким регулятором Сугено

Известен ряд методик, позволяющих оптимизировать количество и качество производственных правил в базе знаний, но комплексного подхода к сокращению ряда характеристик нечетких логических регуляторов не существует. В статье показана возможность по оптимизации основных составляющих нечетких регуляторов, которая позволяет в дальнейшем использовать их для программирования промышленного или полупромышленного контроллера с целью реализации быстрого действующего технологического процесса. Необходимо отметить, что снижения информационной избыточности нечеткого логического регулятора представляют итерационный процесс, в первую очередь связанный с изменением формы функций принадлежности на аппроксимированные аналоги, а также их количества в сторону сокращения. Следующий шаг этого процесса напрямую затрагивает содержимое базы правил, а именно ее сокращение в соответствии с изменившимся составом параметров лингвистических переменных. Третий шаг оценивает избыточность нечеткого логического регулятора по числу входных лингвистических переменных. Последним, что может быть оптимизировано с точки зрения сокращения информационной избыточности, является сам алгоритм нечеткого логического вывода. Подобный алгоритм может быть зациклен до тех пор, пока будут соблюдаться необходимые требования к качеству характеристик системы управления в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 63 с.
2. Черный, С. П. Моделирование следящей системы управления с применением многокаскадного нечеткого регулятора / С. П. Черный, И. Е. Бичаев // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж: Кварта. – 2014. – № 1(33). – С. 47-54.
3. Соловьев, В. А. Многокаскадные нечеткие системы управления мобильной установкой пиролиза древесины / В. А. Соловьев, С. П. Черный, А. И. Малюкова // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж: Кварта. – 2010. – № 3. – С. 45-51.
4. Черный, С. П. Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Черный, Д. А. Новак // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж: Кварта. – 2012. – № 4(28). – С. 56-60.
5. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 798 с.



Ляпустина Ю. В., Горькавый М. А., Соловьев В. А.

Yu. V. Lyapustina, M. A. Gorkaviy, V. A. Solovyev

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ

### DEVELOPMENT OF ALGORITHM AIMED AT METHOD OPTIMIZATION OF RISK MANAGEMENT IN ENERGY COMPANIES

**Ляпустина Юлия Владимировна** – магистр кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: yulya2766@mail.ru.

**Ms. Yuliya V. Lyapustina** – Master's Degree student, Management of innovative processes and projects Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: yulya2766@mail.ru.

**Горькавый Михаил Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: uipp@knastu.ru.

**Mr. Michael A. Gorkaviy** – PhD in Engineering, Head of Management of innovative processes and projects Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: uipp@knastu.ru.

**Соловьев Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Mr. Vyacheslav A. Solovyev** – Doctor of Engineering, Head of Electric drive and automation of industrial plant Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Аннотация.** Развитие промышленности и экономики Дальнего Востока определяется темпами модернизации и строительства комплексной инфраструктуры, одним из основных элементов которой являются энергетические компании. Специфика территории значительно усложняет процессы управления производственными процессами энергетических компаний, что, в свою очередь, негативно сказывается на эффективности процесса генерации и транспортировки электрической энергии. В статье решается ряд вопросов в проблемной области идентификации, предупреждения и разрешения рискованных ситуаций в энергетических компаниях. Предложен алгоритм оптимизации комплекса методов управления рисками. Представлены инструменты, позволяющие оценить эффективность применения комплекса методов для управления пулом рисков в технико-экономическом разрезе. Рассмотрена работа алгоритма на примере рисков электрогенерирующей компании.

**Summary.** The pace of modernization and construction of an integrated infrastructure, one of the main elements of which are energy companies, determine industry and economy development of the Far East. The territory significantly makes the processes of managing production in energy companies difficult, which, in turn, negatively affects the efficiency of the generation and transportation of electricity. The article solves a number of issues in the problem field of identification, prevention and diminishing risks in energy companies. There is the algorithm for optimization of risk management methods in the article. The instrument, which allows evaluating the effectiveness application of the risk management methods in the technical and economic context are presented. The work of the algorithm is considered on the example of the risks of an electricity generating company.

**Ключевые слова:** риск, теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), алгоритм, оптимизация, автоматизация, производство, электроэнергия, теплоэнергия, управление.

**Key words:** risk, thermoelectric plant (CHP), algorithm, optimization, automation, production, electric power, heat energy, control.

УДК 004.891

Развитие промышленности, экономики и социальной среды Дальнего Востока определяется темпами модернизации и строительства комплексной инфраструктуры, одними из основных элементов которой являются электросетевые, электрогенерирующие и энергосбытовые компании.

Специфика территории (удаленность населенных пунктов, низкая плотность населения, ограниченное число транспортных узлов и развязок, протяженность магистральных линий, суровые климатические условия, высокая степень износа оборудования большинства компаний, нехватка квалифицированных специалистов и т.д.) значительно усложняет процессы управления производственными процессами энергетических компаний, что, в свою очередь, негативно сказывается на эффективности процесса генерации и транспортировки электрической энергии.

Аварии, сбои поставок, снижение качества поставки электрической энергии не только негативно сказываются на функционировании промышленных предприятий, но и могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций в объектах первой категории энергоснабжения (причинение вреда жизни и здоровью людей, тяжелые экологические последствия и т.д.). Кроме того, невыполнение обязательств электроэнергетических компаний по генерации или поставки электрической энергии грозит значительными по величине штрафами и неустойками, предусмотренными соответствующими юридическими документами. Таким образом, решение проблем идентификации, прогнозирования, своевременного предупреждения и снижения последствий рискованных ситуаций в энергетических компаниях является первостепенной задачей, требующей значительного внимания.

В научных работах отечественных ученых рассматриваются вопросы проектирования инструментов анализа рискованных ситуаций и возможных методов управления рисками [3 – 11] для объектов различных отраслей промышленности. Но не всегда авторам удается обеспечить приемлемый уровень автоматизации формирования решения, а детально проработанные алгоритмы и механизмы, специфичные для определенных отраслей промышленности, защищаются корпоративными стратегиями, узкоспециализированы и в полном объеме не доступны внешней (по отношению к разработчику) среде.

В настоящей статье ставится задача разработки эффективного и надежного алгоритма оптимизации комплекса методов управления рисками. Представленные инструменты позволят оценить эффективность применения комплекса методов для управления пулом рисков в технико-экономическом разрезе.

#### **Постановка задачи управления рисками**

Риски, воздействующие на предприятие или возникающие внутри него, сказываются на конечном продукте (услуге), его цене, качестве и выпускаемом объеме. В свою очередь, продукт (услуга) с набором получившихся характеристик является стимулом для вызова у потребителя нового заказа у данного предприятия и возникновения новой потребности. Эту взаимосвязь можно увидеть на рис. 1 (схема построена методом IDEF0). Роль механизмов в процессе производства выполняют оборудование и работающий персонал. Так как риск – сочетание вероятности и последствий наступления неблагоприятных событий, то в предложенной схеме вводится понятие переменных, сопряженных с рисками, где роль переменных выполняют действия. Риск оправдан в тех случаях, когда действия, сопряженные с ним, правомерны, а отрицательный результат, нанесенный ущерб являются следствием причин, которые, во-первых, не зависят от принимающего решение и которые, во-вторых, он не может заранее предвидеть.

Существует множество разработок методов управления рисками [3; 4; 8; 11]. Как правило, эти работы позволяют выявить лишь приоритетный метод устранения рисков, но это не означает, что другие методы не могут подойти. Так как каждый риск в проекте рассматривается отдельно и методы устранения для них никак не согласуются друг с другом, то стоимость реализации этих методов может оказаться очень дорогостоящей. Для решения этой проблемы предлагается установить стоимостной предел затрат на методы, разработать алгоритм перебора методов управления рисками и осуществить выбор наиболее эффективного решения. Для оптимизации было принято

решение стоимость проекта измерять в долях от чистой текущей стоимости (NPV), то есть в долях от стоимости самого проекта. Тогда максимальная сумма затрат на риски проекта равна 1 NPV. Единица свидетельствует о том, что для предотвращения того или иного риска заказчик может затратить лишь 100 % от чистого дисконтированного дохода (NPV) и остаться в безубыточном состоянии.

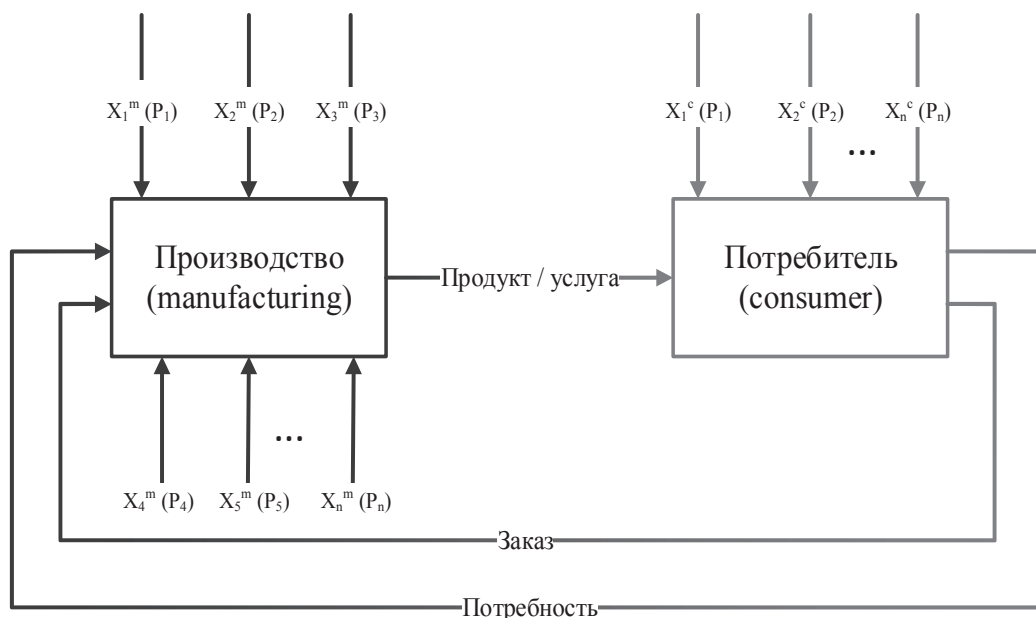


Рис. 1. Влияние рисков на предприятие и потребителя:

$P_1, P_2 \dots P_n$  – риски, оказывающие воздействие на процесс производства и потребителя;  $X_1, X_2 \dots X_n$  – переменные, сопряженные с рисками

Для удобства восприятия информации была разработана схема взаимосвязи методов управления рисками от NPV (см. рис. 2). В результате анализа работ по методам управления рисками в качестве основных методов были выбраны: страхование, локализация, компенсация и игнорирование.

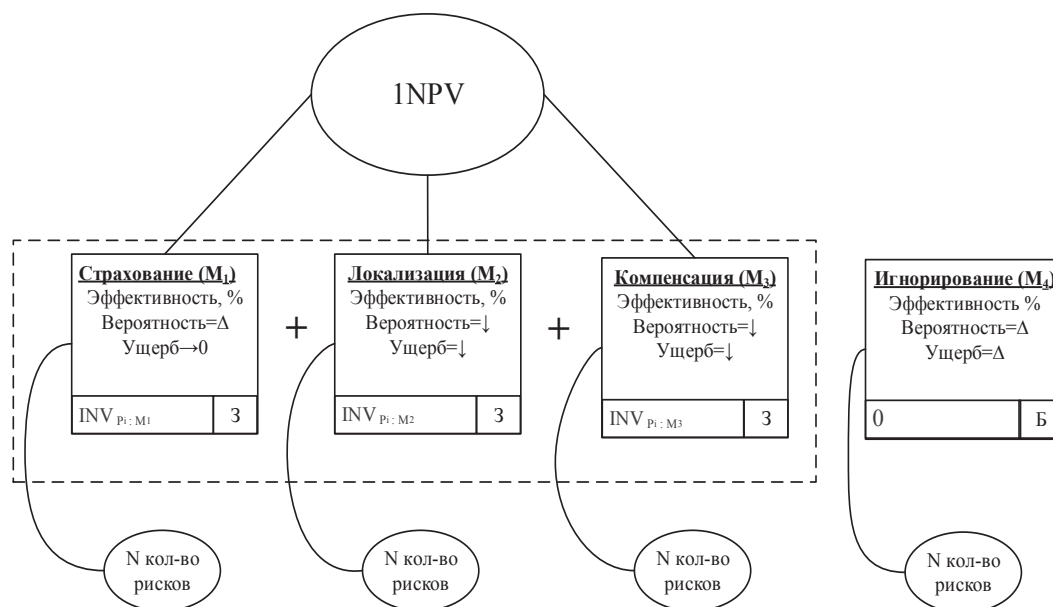


Рис. 2. Методы управления рисками

Эффективность предотвращения (устранения) того или иного риска выражается в процентах, так, например, для страхования эффективность может составлять 100 %, для локализации – 30 %, для компенсации – 40 %. Это определяется экспертом.

Буква «З» (см. рис. 2) обозначает, что для выбора того или иного метода необходимы финансовые затраты, показатель INV отображает сумму затрат на метод управления рисками. Игнорирование рисков является беззатратным методом, поэтому его обозначение «Б».

Каждый метод управления рисками влияет на вероятность возникновения риска и ущерб от него. При страховании вероятность возникновения риска остается неизменной (Вероятность = Δ), но ущерб, понесенный риском, сводится к нулю (Ущерб → 0). При локализации и компенсации вероятность и ущерб понижаются (Вероятность = ↓, Ущерб = ↓).

Для перебора и выбора оптимальных методов управления каждым риском предлагается рассматривать матрицу, в столбцах которой представлены методы управления рисками, а в строках – обозначения рисков (см. рис. 3).

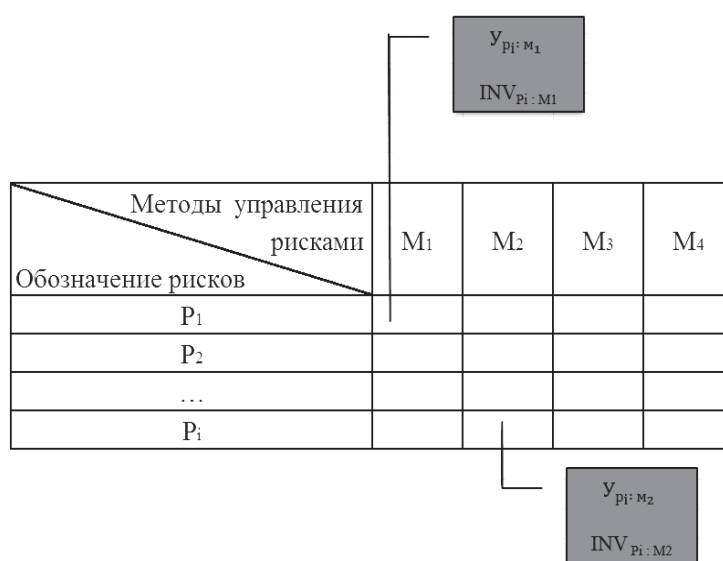


Рис. 3. Матрица соответствия методов управления рисками

В ячейках матрицы заполняются данные о возможности использования того или иного метода для устранения риска. Элементы матрицы могут принимать значения 0 или 1. Ноль свидетельствует о невозможности использования данного метода для устранения риска, а единица отражает возможность применения каждого метода.

Для выбора оптимального решения, позволяющего минимизировать потенциальный ущерб, дополнительно вводится информация:

- 1) сумма, которую выделяет разработчик на устранение рисков;
- 2) сумма затрат на методы (разработчик определяет, во сколько ему обойдется застраховать данный риск или локализовать его и т.д.);
- 3) степень уменьшения риска в процентах (то есть вводится значение, отображающее, на сколько метод снижает потенциальный ущерб от риска);
- 4) сумма затрат на риск (сумма потенциального ущерба, которую понесет разработчик в случае, если данный риск случится);
- 5) вероятность возникновения риска.

После ввода необходимой информации осуществляется перебор методов с целью выявления оптимального для каждого риска в пределах суммы, выделяемой заказчиком для устранения каждого риска.

## Алгоритм принятия решения по управлению рисками

Для оптимизации комплекса методов управления рисками был разработан алгоритм принятия решения по управлению рисками:

- 1) Необходимо заполнить матрицу управления рисками (см. рис. 3).
- 2) Ввести сумму, выделяемую заказчиком на устранение рисков ( $S_p$ ).
- 3) Определить, в какую сумму обойдется заказчику каждый метод управления рисками ( $INV_{P_i: M_1}, \dots, INV_{P_i: M_j}$ ).
- 4) Указать степень уменьшения риска при использовании каждого метода – эффективность ( $Эф_{P_i: M_j}$ ).
- 5) Оценить потенциальный ущерб от каждого риска в денежном эквиваленте ( $Ущерб_{P_1} \dots Ущерб_{P_n}$ ). Для удобства восприятия информации предлагается исходные данные рассматривать в виде схемы (см. рис. 4).

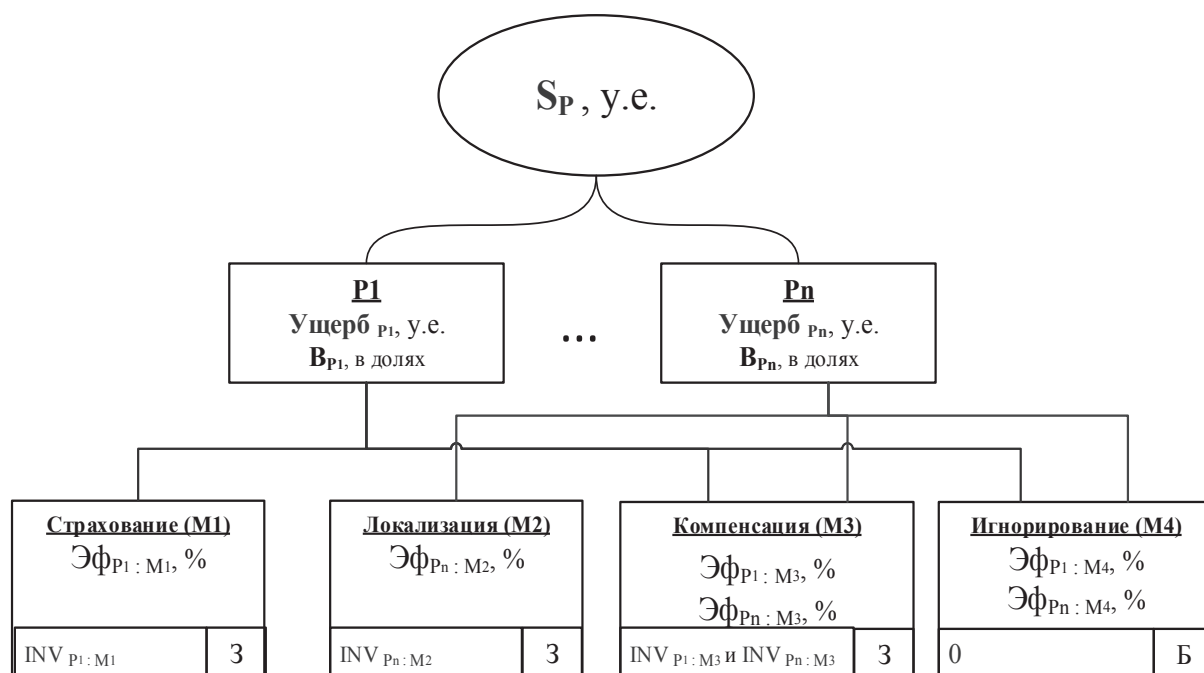


Рис. 4. Графическое представление исходных данных

- 6) Занести дополнительные данные о каждой ячейке матрицы:
  - рассчитать потенциальный ущерб, приносимый каждым риском, с учетом использования методов управления по формуле

$$У_{P_i: M_j} = V_{P_i} \times Ущерб_{P_i} (1 - Эф_{P_i: M_j}), \quad (1)$$

где  $У_{P_i: M_j}$  – ущерб, приносимый каждым риском, с учетом использования методов, р.;  $V_{P_i}$  – вероятность возникновения  $i$ -го риска, доли;  $Ущерб_{P_i}$  – общая сумма ущерба от  $i$ -го риска, р.;  $Эф_{P_i}$  – эффективность реализации каждого метода управления рисками, %;

- записать соотношение потенциального ущерба, приносимого каждым риском, к сумме затрат на риск (см. рис. 3).

- 7) Сформировать варианты перебора взаимодействия рисков с методами.
- 8) Ввести коэффициент ( $k$ ), отображающий, сколько на одну денежную единицу сегодня придется денежных единиц в будущем.
- 9) Определить прогнозируемый ущерб при использовании определенных методов управления рисками по формуле

$$O_{P_i : M_j} = k \times \sum U_{P_i : M_j}, \quad (2)$$

где  $O_{P_i : M_j}$  – остаток от ущерба, р.;  $U_{P_i : M_j}$  – ущерб, приносимый каждым риском, с учетом воздействия методов, р.;  $k$  – коэффициент, отображающий, сколько на одну денежную единицу сегодня придется денежных единиц в будущем.

10) Определить общую сумму затрат на использовании выбранных методов управления рисками:

$$S_{\text{зат}} = (INV_{P_i : M_1} + INV_{P_i : M_2} + \dots + INV_{P_i : M_j}), \quad (3)$$

где  $S_{\text{зат}}$  – общая сумма затрат на методы, р.;  $INV_{P_i : M_j}$  – сумма затрат на  $n$ -й метод.

11) Рассчитать сумму, которую удается компенсировать за счет выбранных методов

$$S_{\text{ком}} = \left( \sum (\text{Ущерб}_{P_i} \times B_{P_i}) - \sum U_{P_i : M_j} \right) \times k, \quad (4)$$

где  $S_{\text{ком}}$  – сумма компенсаций, р.;  $B_{P_i}$  – сумма, выделяемая заказчиком на устранение каждого риска (см. пункт 3);  $\text{Ущерб}_{P_i}$  – ущерб, приносимый каждым риском, с учетом применяемого метода, р.;  $U_{P_i : M_j}$  – ущерб, приносимый каждым риском, с учетом использования методов, р. (см. пункт 6);  $k$  – коэффициент, отображающий, сколько на одну денежную единицу сегодня придется денежных единиц в будущем.

12) Рассчитать общий коэффициент для выбора оптимального метода управления рисками

$$K_{\text{общ}} = \frac{S_{\text{ком}}}{S_{\text{зат}}}, \quad (5)$$

где  $S_{\text{ком}}$  – сумма компенсаций, р.;  $S_{\text{зат}}$  – общая сумма затрат на методы, р.

Для визуализации интерфейса пользователю предлагается представлять результаты вычислений по формулам (2) – (5) в табл. 1.

Таблица 1

Визуализация интерфейса выбора метода управления рисками

P <sub>1...n</sub> M <sub>j</sub> – P <sub>i...n</sub> M <sub>k</sub>			
1	2	3	4
O <sub>P<sub>i</sub> : M<sub>j</sub></sub>	S <sub>зат</sub>	S <sub>ком</sub>	K <sub>общ</sub>

13) Отсечь варианты, где общий коэффициент меньше единицы.

14) Из выбранных вариантов оставить вариант с максимальным общим коэффициентом.

**Пример заполнения матрицы**

В качестве примера заполнения матрицы рассмотрим риски со всеми известными показателями и выбранными методами. Значение приведенных в примере параметров определено экспертно.

На теплоэлектроцентрали выявлено два риска:

1) риск, связанный с повреждением котельного оборудования (P<sub>1</sub>);

2) риск возгорания в котлотурбинном цехе (P<sub>2</sub>).

Вероятность возникновения первого риска – 0,1 (B<sub>p<sub>1</sub></sub> = 0,1), а второго – 0,2 (B<sub>p<sub>2</sub></sub> = 0,2).

По предложенному алгоритму произведен выбор методов управления рисками. Было выявлено, что риск P<sub>1</sub> можно застраховать, компенсировать, но нельзя локализовать и проигнорировать. Риск P<sub>2</sub>, в свою очередь, нельзя застраховать, но можно локализовать, компенсировать и проигнорировать. Формируется матрица соответствия методов управления рисками (см. табл. 2) согласно рис. 3.

Заполненная матрица соответствия методов управления рисками на основе приведенного примера

Методы управления рисками / Обозначение рисков	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
P <sub>1</sub>	1	0	1	0
P <sub>2</sub>	0	1	1	1

Выделяется сумма на устранение рисков ( $S_P$ ). Для первого риска она составит 3120 у.е.

Далее определяется, в какую сумму обойдется заказчику каждый метод управления рисками:

- страхование ( $M_1$ ) стоит 50 у.е. ( $INN_{P_1:M_1} = 50$  у.е.);

- локализация ( $M_2$ ) стоит 45 у.е. ( $INN_{P_2:M_2} = 45$  у.е.);

- компенсация ( $M_3$ ) для риска  $P_1$  стоит 40 у.е. ( $INN_{P_1:M_3} = 40$  у.е.), а для риска  $P_2$  стоит 35 у.е. ( $INN_{P_2:M_3} = 35$  у.е.);

- игнорирование ( $M_4$ ) стоит 0 у.е. ( $INN_{P_2:M_4} = 0$  у.е.).

Определяется эффективность ( $\text{Эф}_{P_n:M_n}$ ) реализации каждого метода управления рисками (для рисков  $P_1$  и  $P_2$  эффективность компенсации совпадает):

-  $\text{Эф}_{P_1:M_1} = 100\%$ ;

-  $\text{Эф}_{P_2:M_2} = 30\%$ ;

-  $\text{Эф}_{P_1|P_2:M_3} = 50\%$ ;

-  $\text{Эф}_{P_2:M_4} = 0$ .

Оценивается ущерб каждого риска в денежном эквиваленте:  $P_1 = 3000$  у.е.;  $P_2 = 3500$  у.е.

Для удобства восприятия информации представляются исходные данные в виде схемы (см. рис. 5).

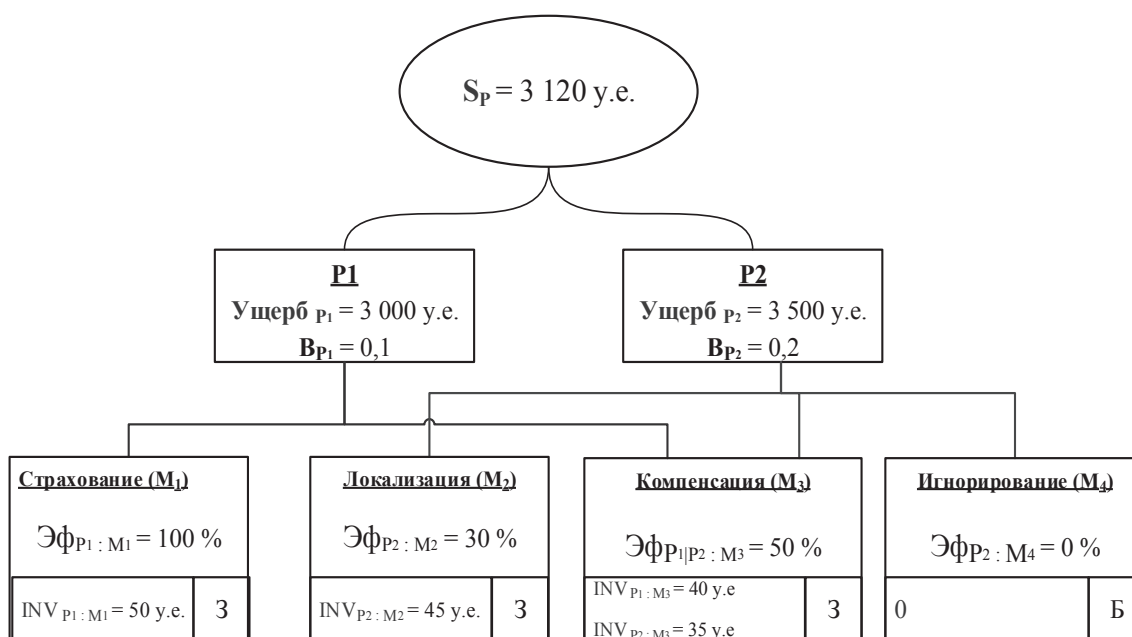


Рис. 5. Исходные данные

Рассмотрим *расчет матрицы* (см. рис. 6).

		0 50		150 40	
Методы управления рисками		M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
Обозначение рисков					
P <sub>1</sub>	1	0	1	0	
P <sub>2</sub>	0	1	1	1	700 0
		490 45		350 35	

Рис. 6. Графическое представление матрицы

1) Рассчитывается ущерб, приносимый каждым риском, с учетом воздействия методов управления по формуле (1). Так как эффективность страхования равна 100 %, то ущерб P<sub>1</sub> составляет 0 у.е.

$$Y_{P_1; M_1} = 0,1 \times 3000 \times (1 - 100) = 0 \text{ у.е.}$$

2) Сумма затрат на страхование составляет 50 у.е., из этого следует соотношение  $\begin{bmatrix} 0 \\ 50 \end{bmatrix}$ .

3) У компенсации (M<sub>3</sub>) эффективность 50 %, поэтому сумма ущерба риска P<sub>1</sub> уменьшается на 50 % с учетом вероятности возникновения риска и составляет 100 у.е. Затраты на компенсацию составляют 40 у.е.

$$Y_{P_1 - M_3} = 0,1 \times 3000 \times (1 - 50) = 150 \text{ у.е.}$$

4) Далее формируется перебор методов управления рисками в матрице:

- P<sub>1</sub> – M<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> – M<sub>2</sub>;
- P<sub>1</sub> – M<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> – M<sub>3</sub>;
- P<sub>1</sub> – M<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> – M<sub>4</sub>;
- P<sub>1</sub> – M<sub>3</sub> и P<sub>2</sub> – M<sub>2</sub>;
- P<sub>1</sub> – M<sub>3</sub> и P<sub>2</sub> – M<sub>3</sub>;
- P<sub>1</sub> – M<sub>3</sub> и P<sub>2</sub> – M<sub>4</sub>.

**Рассмотрим первый вариант** P<sub>1</sub> – M<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> – M<sub>2</sub>:

1) Производится ввод коэффициента (*k*), отображающего, сколько на одну денежную единицу на текущий момент придется денежных единиц в будущем. В нашем примере он равен 1/7.

2) Определяется прогнозируемый ущерб при использовании выбранных методов управления рисками

$$Oy_{P_1; M_1; P_2; M_2} = (0 + 490) \times \frac{1}{7} = 70 \text{ у.е.}$$

Полученное значение записывается в *первый* столбец табл. 3.

Анализ данных для выбора метода управления рисками

P <sub>1</sub> – M <sub>1</sub> и P <sub>2</sub> – M <sub>2</sub>				P <sub>1</sub> – M <sub>1</sub> и P <sub>2</sub> – M <sub>3</sub>				P <sub>1</sub> – M <sub>1</sub> и P <sub>2</sub> – M <sub>4</sub>			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
70	95	72,857	0,767	50	85	92,857	1,092	100	50	42,857	0,857

Продолжение табл. 3

P <sub>1</sub> – M <sub>3</sub> и P <sub>2</sub> – M <sub>2</sub>				P <sub>1</sub> – M <sub>3</sub> и P <sub>2</sub> – M <sub>3</sub>				P <sub>1</sub> – M <sub>3</sub> и P <sub>2</sub> – M <sub>4</sub>			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
91,429	85	51,429	0,605	71,429	75	71,429	0,952	121,429	40	21,429	0,536

3) Определяется общая сумма затрат при использовании выбранных методов управления рисками по формуле (3)

$$S_{\text{зат}} = 50 + 45 = 95 \text{ у.е.}$$

Полученное значение записывается во *второй* столбец табл. 3.

4) Далее рассчитывается сумма, которую удалось компенсировать за счет выбранных методов, по формуле (4)

$$S_{\text{ком}} = \frac{(3000 \times 0,1 + 3500 \times 0,2) - (0 + 490)}{7} = 72,857 \text{ у.е.}$$

Результат записывается в *третий* столбец в табл. 3.

5) Для выбора метода необходимо вывести общий коэффициент по формуле (5)

$$K_{\text{общ}} = \frac{72,857}{95} = 0,767.$$

Рассматриваются только те варианты, в которых этот коэффициент будет превышать единицу. Результат записывается в *четвертый* столбец табл. 3.

Аналогично проводятся расчеты и по другим рискам.

В результате расчётов был выделен один вариант методов управления рисками, превышающий единицу

$$P_1 - M_1 \text{ и } P_2 - M_3.$$

Это означает, что в качестве методов управления рисками для P<sub>1</sub> подходит страхование, а для P<sub>2</sub> – компенсация. Затраты на P<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> составят 85 у.е., что меньше суммы, выделяемой заказчиком для устранения рисков.

### Заключение

Предложенный алгоритм оптимизации комплекса методов управления рисками энергетических компаний при условии наличия адекватной, непротиворечивой, специфичной для объекта управления базы знаний обеспечит повышение показателей качества функционирования интеллектуальных модулей в системе поддержки принятия решений аппарата управления энергетической компании. Возможность экономической оценки технических и технологических элементов, комплекса рисков событий определяет наглядность процесса принятия решения в области выбора методов управления рисками и обеспечивает единую шкалу измерений последствий рискованного события. Алгоритм сохраняет историю всех вариантов перебора методов управления рисками, что позволяет в случае необходимости выбрать другой набор, качественно и количественно диф-

ференцировать полученные наборы, оперативно пересмотреть решение в случае изменения значений входных переменных. Необходимо отметить, что, поскольку предложенный алгоритм опирается на базу знаний, принципиально важно при его использовании обеспечить высокое качество результатов реализации технологии сбора и обработки экспертной информации предметной области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горькавый, М. А. Нечеткий подход к оценке компетентности технического персонала промышленного предприятия / М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Вестник Тихоокеанского гос. ун-та. – 2010. – № 3. – С. 63-72.
2. Горькавый, М. А. Разработка структуры рисков электросетевых компаний для снижения электропотерь / М. А. Горькавый, К. Пыльнова // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы науч.-тех. конф., Комсомольск-на-Амуре, 01-15 апр. 2016 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – Ч. 1. – С. 502-504.
3. Дегтярева, О. И. Управление рисками в международном бизнесе / О. И. Дегтярева. – М.: Флинта, 2014. – 55 с.
4. Дюкина, Т. О. Управление рисками с использованием статистических методов / Т. О. Дюкина // Известия международной академии аграрного образования. – 2013. – № 18. – С. 135-141.
5. Зайцева, И. В. Современные проблемы управления производственным риском в электроэнергетике / И. В. Зайцева // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 180-181.
6. Зайцева, И. В. Качественная оценка риска в топливно-энергетическом секторе экономики / И. В. Зайцева // Вестник Южно-Российского гос. политех. ун-та. – Новочеркасск, 2015. – № 1. – С. 56-62.
7. Маренков, Н. Л. Страхование дело / Н. Л. Маренков, Н. Н. Косаренко. – М.: Феникс, 2003. – 608 с.
8. Олейников, Е. А. Метод оценки стоимости системы мер по управлению риском / Е. А. Олейников, С. А. Филин, А. С. Муравьев // Экономический анализ: теория и практика. – 2003. – № 11. – С. 26-33.
9. Свирчевский, Д. В. Промышленные риски и контроль со стороны государства / Д. В. Свирчевский // Управление экономическими системами. – 2011. – № 35. – С. 1-12.
10. Тэпман, Л. Н. Риски в экономике / Л. Н. Тэпман. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 380 с.
11. Черкасова, В. А. Управление рисками российских компаний на основе метода сценарного планирования / В. А. Черкасова // Экономический анализ: теория и практика. – 2005. – № 24. – С. 49-53.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА  
MATEMATICS AND MECHANICS

**Хохлов Н. А., Калугина Н. А., Лин Ко Ко**  
**N. A. Khokhlov, N. A. Kalugina, Ko Ko Lin**

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФОРМФАКТОРА НЕЙТРОНА  
ИЗ РЕАКЦИИ УПРУГОГО РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОНА НА ДЕЙТРОНЕ**

**THE EXTRACTION OF THE NEUTRON ELECTRIC FORM FACTOR FROM THE REACTION  
CONNECTED WITH ELASTIC SCATTERING OF ELECTRON ON DEUTERON**

**Хохлов Николай Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: nikolahokhlov@yandex.ru.

**Mr. Nikolay A. Khokhlov** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Physics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av. E-mail: nikolahokhlov@yandex.ru.

**Калугина Наталья Анатольевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: natanat55@mail.ru.

**Ms. Natalia A. Kalugina** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av. E-mail: natanat55@mail.ru.

**Лин Ко Ко** – аспирант кафедры прикладной математики и информатики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: linkoko53@gmail.com.

**Mr. Ko Ko Lin** – a post-graduate student, Department of Applied mathematics and Informatics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av. E-mail: linkoko53@gmail.com.

**Аннотация.** В работе показано, что статические электромагнитные свойства дейтрона могут быть описаны в рамках модели импульсного приближения для оператора двухнуклонного электромагнитного тока.

**Summary.** It is shown that the static electromagnetic properties of deuteron may be described in frames of the spectator approximation model for the two-nucleon electromagnetic current operator.

**Ключевые слова:** потенциал двухнуклонного взаимодействия, релятивистский формализм, дейтрон, нуклон, форм-фактор, оператор тока.

**Key words:** nucleon-nucleon potential, relativistic formalism, deuteron, nucleon, form factor, current operator.

УДК 538.171.11

Нуклон-нуклонное взаимодействие является основой для численного решения большинства задач современной ядерной физики, поскольку это взаимодействие определяет как структуру атомных ядер, так и динамику ядерных реакций. Обычным является описание этого взаимодействия нуклон-нуклонным (NN) потенциалом. Микроскопический, фундаментальный подход к построению такого потенциала предполагает его расчет в рамках квантовой хромодинамики. Однако такие расчеты в настоящее время нереализуемы. По этой причине все реалистические NN потенциалы, используемые в расчетах, являются феноменологическими. В таких микроскопически обоснованных моделях всегда имеются свободные параметры. Указанные параметры подгоняются численно с тем, чтобы наилучшим образом описать экспериментальные данные упругого NN рассеяния и статические свойства дейтрона. К сожалению, указанных данных недостаточно для однозначного определения NN потенциала.

В литературе на уровне учебников бытует мнение, что даже статические электромагнитные свойства дейтрона не могут быть описаны в рамках лишь двухнуклонной модели. Это заблуждение возникло во времена недостаточного развития численных методов и некоторой переоценки модели Юкавы. Модель Юкавы предполагает, что сильное взаимодействие между нуклонами обусловлено обменом мезонами, с массой несколько меньше массы нуклонов. Указанная модель в настоящее время представляет лишь исторический интерес, поскольку она имеет лишь качественный характер и не является микроскопической с точки зрения фундаментальной квантовой хромодинамики. Расчеты показывают, что, действительно, локальный потенциал с асимптотикой потенциала Юкавы и описывающий данные нуклон-нуклонного рассеяния не дает описания статических квадрупольного и магнитного моментов дейтрона. Однако нуклон-нуклонный потенциал лишь приближенно может рассматриваться как локальный и не является таким в современных реалистических моделях. Обычно предполагается, что согласия с экспериментальными значениями можно достичь введением аддитивных поправок в оператор электромагнитного тока двухнуклонной системы. Эти поправки учитывают влияние обменных мезонных токов на электромагнитные свойства NN системы. Имеющиеся в такой модели свободные параметры, действительно, могут быть подогнаны с тем, чтобы достичь согласия с экспериментом. Однако реалистических нуклон-нуклонных потенциалов много – порядка десяти только наиболее часто используемых в расчетах ядерных свойств и реакций. Эти потенциалы отличаются друг от друга также и различными параметрами мезонных обменных токов. Такая ситуация не является противоречивой. Нуклон-нуклонный потенциал не является наблюдаемой величиной и с микроскопической точки зрения нуклон-нуклонный потенциал, учитывающий только NN канал без связи с изобарными и другими возможными каналами, – это оптический потенциал, определение которого неоднозначно. В связи с этим возникает следующий вопрос: «Можно ли построить такой нуклон-нуклонный оптический потенциал, для которого влияние мезонных обменных токов будет минимальным или вовсе пренебрежимым?». Наличие такого потенциала существенно упростит расчет электромагнитных свойств ядер и электромагнитных реакций с ядрами. В настоящей работе мы показываем, что из электромагнитных свойств дейтрона можно извлечь волновую функцию дейтрона, которая описывает эти свойства без обменных добавок в двухнуклонный оператор электромагнитного тока.

Ранее нами был разработан в рамках точечной формы релятивистской квантовой механики формализм расчета электромагнитных реакций с двумя нуклонами. В работах [1; 2; 3; 4; 6; 7; 8] показано, что этот формализм дает хорошее согласие с экспериментальными результатами. Поскольку здесь мы используем этот формализм без изменений, здесь он не приводится. Детали его применения к расчету электромагнитных свойств дейтрона подробно описаны нами в [3; 5]. Здесь мы опишем, каким образом извлекалась волновая функция дейтрона.

Волновая функция дейтрона в импульсном представлении имеет следующий вид:

$$|\chi\rangle = \frac{1}{q} \sum_{l=0,2} u_l(q) |l, 1; 1M_J\rangle.$$

Здесь  $u_l(q)$  является радиальной частью функции с орбитальным моментом  $l$ ;  $|l, S; J| - M_J\rangle$  определяет спин-угловую часть волновой функции с суммарным спином  $S = 1$ , полным моментом  $J = 1$ , проекцией полного момента  $M_J$ ;  $q$  – импульс одного из нуклонов в системе отсчета покоящегося дейтрона.

Для радиальных волновых функций мы используем следующую удобную для расчетов параметризацию:

$$u_l(q) = \sum_{i=0}^n a_{l,i} R_{l,i}(r_0 \cdot q) + \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \sum_{j=1}^m \frac{C_{l,j}}{q^2 + m_j^2}.$$

Здесь  $m_j = (0,23145 + (j-1) \cdot 0,5) \text{Фм}^{-1}$  обеспечивает правильную асимптотику функции.

Поведение волновой функции на малых расстояниях определяется функциями осцилляторного базиса

$$R_{l,i}(r) = (-1)^i \sqrt{\frac{2i!}{r_0 \Gamma(i+l+3/2)}} r^{l+1} e^{-r^2/2} L_i^{l+1/2}(r^2),$$

где  $L_i^\alpha(x)$  – присоединенные полиномы Лагера; осцилляторный радиус  $r_0 = 0,4$  Фм.

Постоянные  $a_{l,i}$  и  $C_{l,i}$  были нами подогнаны для наилучшего описания электромагнитных свойств дейтрона.

На рис. 1 показаны полученные в результате такой подгонки волновые функции дейтрона (eD) в сравнении с волновыми функциями дейтрона для реалистических потенциалов Боннского (CDBonn) [9], Парижского (Paris) [8], Московского (Moscow) [7], Аргонского (Argo18) [12], Идахо (Idaho) [4], Ниймегенских (NijmI и NijmII) [11] и JISP16 [10].

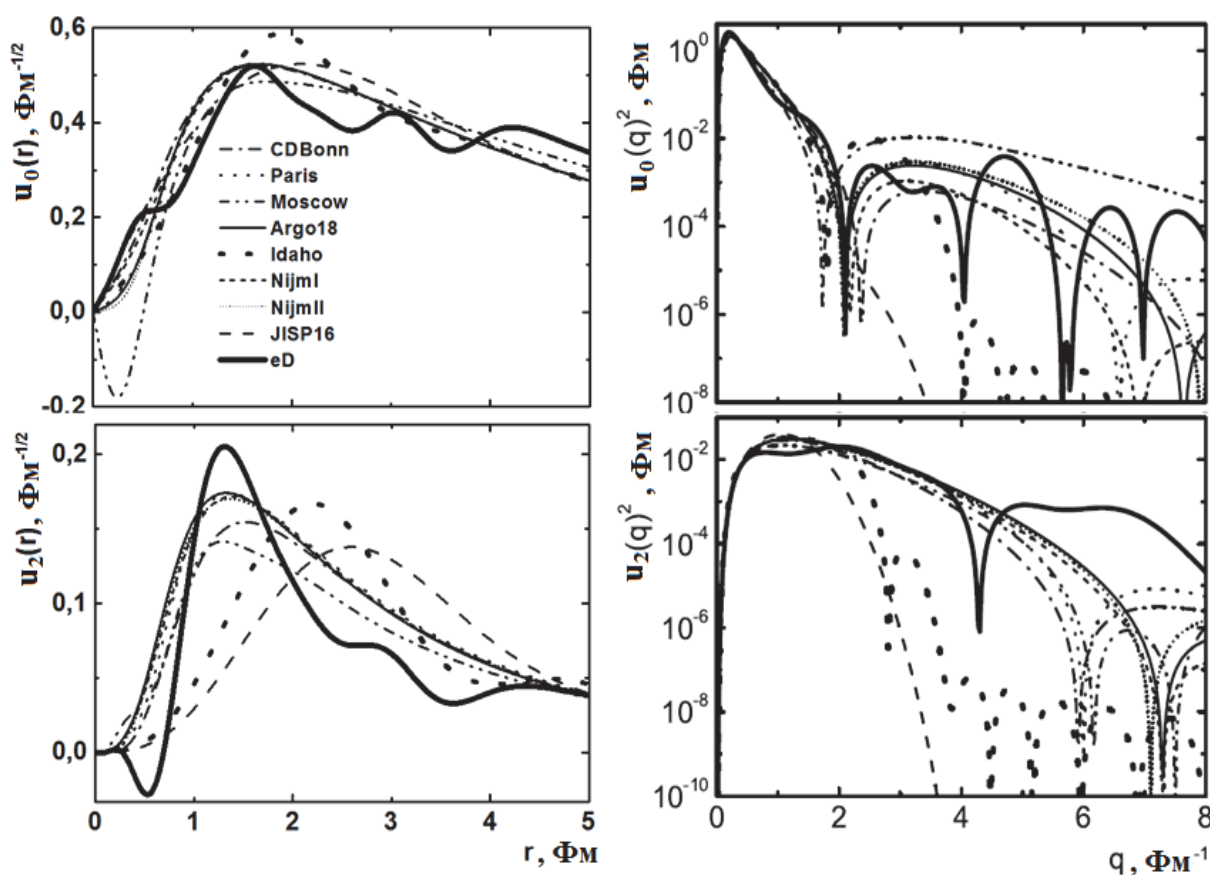


Рис. 1. Волновые функции дейтрона для различных реалистических потенциалов и извлеченная из электромагнитных свойств дейтрона (eD) сплошная линия: слева – волны в конфигурационном пространстве; справа – те же волны в импульсном пространстве

Мы видим, что некоторое варьирование волновых функций приводит к хорошему описанию электромагнитных свойств дейтрона, результаты их расчета для всех потенциалов приведены в табл. 1.

Результаты расчетов статических форм-факторов дейтрона

	$G_M(0)$	$G_Q(0)$
Эксперимент	1,715	25,83
CDBonn	1,704	24,39
Paris	1,694	25,21
Moscow	1,699	24,23
Argo18	1,694	24,42
Idaho	1,714	26,20
NijmI	1,695	24,60
NijmII	1,695	24,51
JISP16	1,714	26,12
eD	1,715	25,83

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кныр, В. А. Реакция эксклюзивного электрорасщепления дейтрона в рамках точечной формы релятивистской квантовой механики / В. А. Кныр, Н. А. Хохлов. – М.: Ядерная физика, 2007. – Т. 70. – № 12. – С. 2117-2128.
2. Хохлов, Н. А. Электродинамика двухнуклонных систем в точечной форме релятивистской квантовой механики / Н. А. Хохлов. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2011. – 182 с.
3. Хохлов, Н. А. Реакция упругого рассеяния электрона на дейтроне в релятивистской потенциальной модели / Н. А. Хохлов, А. А. Вакулук. – М.: Ядерная физика, 2015. – Т. 78. – № 1-2. – С. 97-109.
4. Entem, D. R. Accurate charge-dependent nucleon-nucleon potential at fourth order of chiral perturbation theory / D. R. Entem and R. Machleidt. – Phys. Rev. C 68, 041001, 2003. – P. 1-4.
5. Garcon, M. The Deuteron: structure and Form Factors / M. Garcon, J. W. Van Orden Adv. – Nucl. Phys. 26, 2001. – P. 293-373.
6. Khokhlov, N. A. Reconstruction of the optical potential from scattering data / N. A. Khokhlov, V. A. Knyr. – Phys. Rev. C 73, 024004, 2006. – P. 1-11.
7. Khokhlov, N. A. Nucleon-nucleon wave function with short-range nodes and high-energy deuteron photodisintegration / N. A. Khokhlov, V. A. Knyr, V. G. Neudatchin. – Phys. Rev. C 75, 064001, 2007. – P. 1-15.
8. Parametrization of the Paris N – N potential / M. Lancome, B. Loiseau, J. M. Richard [et al.]. – Phys. Rev. 21, C, 1980. – 861 p.
9. Machleidt, R. The Bonn meson-exchange model for the NN interaction / R. Machleidt, K. Holinde, Ch. Elster. – Phys. Reports., 1, 1999. – 149 p.
10. Shirokov, A. M., Mazur, A. I., Zaytsev, S. A., Vary, J. P., and T. A. Weber – Phys. Rev. C 70, 044005, 2004.
11. Stoks V. G. J., Klomp R. A. M., Terheggen C. P. F., and J. J. de Swart – Phys. Rev. C 49, 2950, 1994.
12. Wiringa, R. B. Accurate nucleon-nucleon potential with charge-independence breaking / R. B. Wiringa, V. G. J. Stoks and R. Schiavilla. – Phys. Rev. C 51, 1995. – P. 38-51.



Штука В. И.

V. I. Shtuka

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛУЧЕВОГО МЕТОДА В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПРОДЕФОРМИРОВАННОГО УПРУГОГО СЛОЯ

## THE RAY METHOD APPLICATION FOR STAIN-STRESS STATE OF ELASTIC CYLINDRICAL LAYER WITH PRELIMINARY DEFORMATIONS DEFINITION

**Штука Виктор Игоревич** – аспирант Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Владивосток). E-mail: onslice@mail.ru.

**Mr. V. I. Shtuka** – A post-graduate student in Institute of Automation and Controlled Processes, FEB RAS (Russia, Vladivostok). E-mail: onslice@mail.ru.

**Аннотация.** Указаны особенности применения лучевого метода к нестационарным задачам теории упругости, решение которых получается посредством учёта распространяющихся поверхностей сильных разрывов (ударных волн). В случае наличия осевой симметрии и предварительных деформаций скручивающего типа построено решение с дополнительным разложением самого разрыва непосредственно на ударной волне. Данное обстоятельство продиктовано спецификой сильных разрывов и невозможностью получения рекуррентных обыкновенных дифференциальных соотношений (уравнений затухания). Полученное приближённое решение используется для инициализации специально сконструированной численной схемы, учитывающей наличие поверхностей разрывов. Решение уравнений движения за фронтами распространяющихся деформаций делает возможным уточнение интенсивностей ударных волн и позволяет определить напряжённно-деформированное состояние слоя без ограничений на интенсивность ударного воздействия и в конечное послеударное время.

**Summary.** Application of the ray method is specified to the nonstationary problems of the theory of elasticity; solution of which is obtained by taking into account propagating surfaces of strong discontinuities (shock waves). In the case of axial symmetry and preliminary torsional deformation another feature to build the solution, consisting in a further break decomposition directly on the shock wave is demonstrated. This circumstance is dictated by the specifics of strong breaks and the impossibility of obtaining the recurrent ordinary differential relations (attenuation equations). The approximate solution is used to initialize a specially constructed numerical scheme that take the presence of the surface of discontinuity into account. The solution to the motion equations behind the wave fronts makes refinement of the intensities possible and allows to define layer stress-strain state without any restrictions for the intensity of impact action and post-impact time finiteness.

**Ключевые слова:** упругость, динамика, лучевой метод, ударные волны, численное моделирование.

**Key words:** elasticity, dynamics, ray method, shock waves, numerical simulation.

УДК 539.3

### Введение

Изучение свойств нелинейно-упругих твёрдых тел ввиду особенностей их поведения при нестационарных воздействиях является одной из актуальных задач математической физики и механики сплошных сред. Математическое описание таких технологических процессов, какковка и штамповка, предполагает учёт существенных перепадов напряжений и скоростей. Так, в частности, ударное нагружение, произведённое на внешнюю границу нелинейно-упругого полупространства, вызывает распространение в нём квазипродольных и квазипоперечных поверхностей разрывов скоростей (ударных волн).

Точное аналитическое решение подобных задач представляет значительные трудности, поэтому многие исследователи пользуются методиками построения приближённого решения (методом возмущений или методом лучевых рядов), а также специальными схемами численных расчё-

тов, учитывающими распространение особых поверхностей. Лучевой метод, предложенный в работах [1, 148-152] и [7, 142-144] независимо друг от друга, обладает хорошими качественными характеристиками представления неизвестных функций за поверхностями разрывов при условии малости послеударных времён. Изначально лучевой метод не применялся для решения задач с ударными волнами ввиду невозможности получения замкнутой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Его модификация, предложенная А. А. Бурениным и Ю. А. Россихиным [3, 131-136], позволила преодолеть данный аспект за счёт введения дополнительного разложения на ударных волнах по дельта-производным [9, 40-45], что позволило замкнуть систему уравнений метода. Продемонстрируем употребление модифицированного лучевого метода на примере решения задачи определения деформированного состояния несжимаемого упругого цилиндрического слоя с предварительными скручивающими деформациями. Описание особенностей поведения эластомеров при нестационарных воздействиях и распространении в них сдвиговых ударных волн содержится в работе [9, 12-14].

### Модель несжимаемого упругого тела

Модель изотропного несжимаемого упругого тела представлена соотношениями в декартовой системе координат  $x_1, x_2, x_3$

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j} &= \rho(\dot{v}_i + v_{i,j}v_j), & v_i &= \dot{u}_i + u_{i,j}v_j, \\ \sigma_{ij} &= -p\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial \alpha_{ik}}(\delta_{kj} - 2\alpha_{kj}),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $u_i, v_i$  – компоненты векторов перемещений и скоростей;  $\sigma_{ij}, \alpha_{ij}$  – компоненты тензоров напряжений Коши-Эйлера и деформаций Альманзи;  $p$  – функция добавочного всестороннего давления,  $\rho = const$  – плотность среды.

Индексом после запятой обозначена производная по соответствующей пространственной координате, точкой сверху – по времени. Потенциал изотропной несжимаемой упругой среды  $W$  (плотность распределения внутренней энергии) представлен разложением в ряд Тейлора относительно свободного состояния по инвариантам тензора деформаций

$$\begin{aligned}W(A_1, A_2) &= -2\mu A_1 + b A_1^2 - \mu A_2 - a A_1^3 - (\mu - b)A_1 A_2 + \dots, \\ A_1 &= \alpha_{kk}, & A_2 &= \alpha_{ik}\alpha_{ki},\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига;  $a, b$  – модули упругости третьего порядка.

Сокращение числа постоянных материала вызвано характером дальнейшего винтового деформирования, заставляющего их быть связанными между собой [6, 313-317]. Таким образом, компоненты вектора перемещений в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  будут иметь вид

$$u_r = r(1 - \cos \psi(r, t)), \quad u_\varphi = r \sin \psi(r, t), \quad u_z = u(r, t), \quad (3)$$

где функция  $\psi(r, t)$  отвечает за поворот точки относительно оси  $Z$  в процессе движения, а функция  $u(r, t)$  – за её смещение вдоль этой же оси.

### Поверхности разрывов и лучевой метод

При существенно нестационарных нагрузках в процессе деформирования среды возникают резкие перепады скоростей, напряжений и других параметров, которые при математическом описании представляются разрывами первого рода. На поверхностях, где искомые функции претерпевают скачки, выполняются кинематические, геометрические и динамические условия совместности (следствия интегральных законов сохранения), которые позволяют определить взаимосвязь величин разрывов и скорости их распространения. Так, в несжимаемой упругой среде с предвари-

тельными деформациями ( $\psi_{,r} \neq 0$ ) возможно существование и распространение двух поверхностей разрывов деформаций: первой волны нагрузки  $\Sigma_1$  и второй волны круговой поляризации  $\Sigma_2$  со скоростями

$$G_1 = C(1 + \chi_1 r^4 (5\psi_{,r}^4 + C^{-4}\lambda_1^4) + \dots),$$

$$G_2 = C(1 + \chi_1 r^4 (\psi_{,r}^4 + C^{-4}\lambda_1^4) + \dots),$$

$$\chi_1 = 3\mu^{-1}(a - b + \mu)/4, \quad C = \sqrt{\mu/\rho}.$$

При этом первая волна увеличивает предварительный сдвиг, а вторая изменяет его направленность и является изоэнтропийной. В рамках линейной теории получить такие результаты было бы невозможно ввиду эффектов, вызванных слагаемыми старшего порядка.

За волной нагрузки  $\Sigma_1$  приближённое решение запишем в форме лучевого ряда

$$\psi^-(r, t) = \psi(r) - \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j \frac{(t-t_1)^j}{j!}, \quad \lambda_j = \left[ \frac{\partial^j \psi}{\partial t^j} \right]_{\Sigma_1}, \quad t_1 = \int_0^r G_1^{-1}(\xi) d\xi, \quad (4)$$

а за волной круговой поляризации  $\Sigma_2$

$$\psi^-(r, t) = \psi(r, t) - \sum_{j=1}^{\infty} \eta_j \frac{(t-t_2)^j}{j!}, \quad u^-(r, t) = -\sum_{j=1}^{\infty} \omega_j \frac{(t-t_2)^j}{j!},$$

$$\eta_j = \left[ \frac{\partial^j \psi}{\partial t^j} \right]_{\Sigma_2}, \quad \omega_j = \left[ \frac{\partial^j u}{\partial t^j} \right]_{\Sigma_2}, \quad t_2 = \int_0^r G_2^{-1}(\xi) d\xi. \quad (5)$$

На фронте  $\Sigma_1$  из уравнения движения (1), представленного в разрывах, записывается уравнение затухания для разрыва скорости

$$\frac{\delta \lambda_1}{\delta t} = \lambda_1 \left( -\frac{3C}{2r} + 10 \frac{\chi_1}{C} r^4 \psi_{,r}^3 (\lambda_2 - C^2 \psi_{,rr}) \right) + \dots \quad (6)$$

На фронте  $\Sigma_2$  получается уже система (к уравнению затухания добавляется ещё алгебраическое соотношение на разрыв ускорения)

$$\frac{\delta \omega_1}{\delta t} = \omega_1 \left( -\frac{1C}{2r} + 2C \chi_1 r^4 \psi_{,r}^3 (\lambda_2 - C^2 \psi_{,rr}) \right) + \chi_1 r^3 \psi_{,r}^2 \lambda_1 \left( \omega_1 \left( \frac{\psi_{,r}}{r} + 6 \left( \frac{\lambda_2}{C^2} - \psi_{,rr} \right) \right) + 2 \frac{r \omega_2 \psi_{,r}}{C} \right) + \dots,$$

$$\eta_2 = -\frac{\omega_1 \omega_2}{Cr^2 \psi_{,r}} \left( 1 - \frac{4}{5} \frac{\lambda_1}{Cr \psi_{,r}} (1 - \chi_1 r^4 \psi_{,r}^4) \right) + \dots \quad (7)$$

Разрешая системы (6), (7) с учётом краевых условий и дополнительных разложений разрывов на волновых фронтах

$$\lambda_1 = (\lambda_{10} + \lambda_{11} t_1)(t - t_1) + \dots, \quad \lambda_2 = \lambda_{20}(t - t_1)^2 + \dots, \quad (8)$$

$$\omega_1 = (\omega_{10} + \omega_{11} t_2)(t - t_2) + \dots, \quad \omega_2 = \omega_{20}(t - t_2)^2 + \dots,$$

было получено приближённое решение задачи.

### Численное моделирование

Полагаем, что несжимаемая упругая среда, движение которой подчиняется соотношениям (1), (2), (3), заполняет собой цилиндрический слой, расположенный между жёсткими цилиндрическими поверхностями  $r = r_0$  и  $r = R$  ( $R > r_0$ ). На внешней границе слоя выполняется условие жёсткой спайки. На внутренней границе задана компонента перемещений  $\psi(r_0, 0) = \psi_0$ , определяющая предварительные ( $t \leq 0$ ) деформации в слое. Для времени  $t > 0$  краевые условия имеют вид

$$\psi(r_0, t) = \psi_0, \quad \psi(R, t) = 0, \quad (9)$$

$$u(r_0, t) = u_1 t + u_2 t^2, \quad u(R, t) = 0,$$

которые инициируют распространение двух расходящихся от внутренней поверхности слоя ударных волн.

После получения приближённого решения были произведены и соответствующие численные расчёты, с представлением решения за ударными волнами в виде лучевых рядов по типу (4), (5) и (8). Для моделирования была выбрана неявная схема с конечными разностями, учитывающая изменение положения фронта ударных волн и то обстоятельство, что для определённого числа временных слоёв невозможна аппроксимация вторых производных функций, входящих в уравнение движения (1). Дельта-производные аппроксимировались линейно

$$\frac{\delta \omega_l}{\delta t} \cong \frac{\omega_{l,j} - \omega_{l,j-1}}{\Delta t}.$$

Схема предполагает наличие простого итеративного счёта и решение задачи оптимизации на каждом шаге методом наименьших квадратов. Более подробное описание численной методики расчётов содержится в работе [5, 52-56].

График (см. рис. 1) для компоненты осевого смещения представлен эпюрами осевого смещения с обозначением соответствующего времени, для которого они показаны. Параметры модельных расчётов (9) были выбраны следующими:  $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$ ,  $C = 50 \text{ м/с}$ ,  $\chi_1 = 100$ ,  $\psi_0 = 0.02\pi$ ,  $u_1 = 1 \text{ м/с}$ ,  $u_2 = 10 \text{ м/с}^2$ ,  $r_0 = 0.01 \text{ м}$ ,  $R = 0.02 \text{ м}$ .

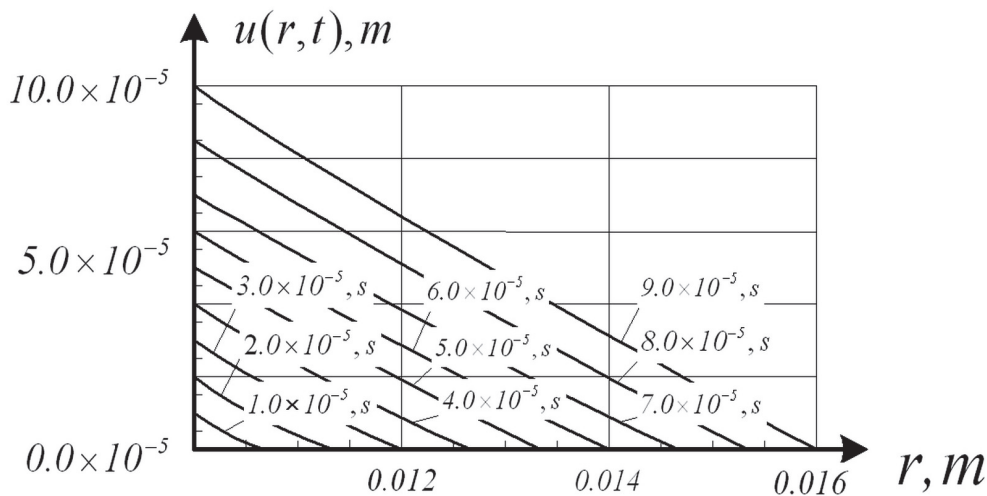


Рис. 1. Эпюры осевого смещения точек слоя

### Заключение

В рамках нелинейной теории упругости удалось получить приближённое решение сложной задачи определения деформированного состояния несжимаемого слоя постоянной кривизны с расходящимися ударными волнами посредством применения модифицированного метода лучевых рядов. Для более точного результата в отношении расширенного диапазона временной переменной была применена специальная расчётная схема, использующая в качестве начального приближения величины, полученной из приближённого решения.

Отметим ещё раз, что фактор наличия предварительных деформаций на этапе постановки является существенным, поскольку именно он влияет на качественные и количественные характеристики процесса.

Дополнительным ограничением необходимо считать наличие кинематической связи (условия несжимаемости), которая позволяет перейти к рассмотрению только волн изменения формы (а не объёма) и априори знать очерёдность их распространения [2, 16].

В сравнении с результатами работы [4, 404-409] можно отметить различия в особенностях распространения различных типов деформационных воздействий, но и вместе с тем схожесть полученных систем, обусловленную идентичностью уравнений затухания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабичева, Л. А. Лучевой метод решения динамических задач в упруго-вязкопластических средах / Л. А. Бабичева, Г. И. Быковцев, Н. Д. Вервейко // Прикладная математика и механика. – 1973. – Т. 37. – № 1. – С. 145-155.
2. Буренин, А. А. К закономерностям распространения деформаций изменения формы / А. А. Буренин, О. В. Дудко, А. А. Лаптева // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2011. – Т. 14. – № 4. – С. 14-23.
3. Буренин, А. А. Лучевой метод решения одномерных задач нелинейной динамической теории упругости с плоскими поверхностями разрывов / А. А. Буренин, Ю. А. Россихин // Прикладные задачи механики деформируемых сред. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. – С. 129-137.
4. Буренин, А. А. Лучевой метод в приближённом решении задачи об ударном нагружении несжимаемого цилиндрического слоя / А. А. Буренин, Г. М. Севастьянов, В. И. Штука // Вычислительная механика сплошных сред, 2016. – Т. 9. – № 4. – С. 400-411. DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.4.33.
5. Герасименко, Е. А. Численное решение задачи о несжимаемом слое / Е. А. Герасименко, А. А. Заверган // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Т. 1. – № 3. – С. 46-56.
6. Лурье, А. И. Нелинейная теория упругости / А. И. Лурье. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
7. Achenbach, S. D. Note on wave propagation in linearly viscoelastic media / S. D. Achenbach, D. R. Reddy // Zeitschr fur angew. Math und Phys. – 1967. – V. 18. – P. 141-144.
8. Chu Boa-Teh. Transverse shock waves in incompressible elastic solids / Chu Boa-Teh // J. Mech. Phys. Solids, 1967. – V. 15. – № 1. – P. 1-14.
9. Tomas, T. Y. Plastic Flow and fracture in solids / T. Y. Tomas. – New York, London: Academic Press, 1961. 271 p.

**Зарубин М. М.**  
**M. M. Zarubin**

**ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ НЕСТАНДАРТНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ  
ОДНОМЕРНОГО ЧИСЛОВОГО МАССИВА В ДВУМЕРНЫЙ МАССИВ**

**ON A NON-STANDARD TRANSFORMATION ALGORITHM OF ONE-MEASURED  
NUMERICAL SET OF LATTICE POINTS TO A TWO-DIMENSIONAL SET OF LATTICE  
POINTS**

**Зарубин Михаил Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zmm52@mail.ru.

**Mr. Michael M. Zarubin** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Applied Mathematics and Informatics Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: zmm52@mail.ru.

**Аннотация.** Предложен алгоритм заполнения прямоугольной матрицы размеров  $n \times m$  элементами сформированного одномерного числового массива по заданной непрерывной кривой. В отличие от традиционных алгоритмов решения задачи для некоторых модельных случаев (например, при заполнении прямоугольной матрицы по спирали) предложенный алгоритм не требует громоздких математических расчетов и легко адаптируется под конкретную геометрию нестандартного заполнения матрицы («кривой заполнения»). Это достигается организацией «препятствий» в процессе заполнения матрицы последовательными элементами исходного одномерного массива и переключением направления «движения» в соответствии с заданной схемой («кривой заполнения»). Приводится описание алгоритма для одной из модельных постановок задачи (заполнение по спирали по часовой стрелке, начиная с «северо-западного угла» матрицы) и его реализация на языке PASCAL (исходный текст программы и соответствующие скриншоты). В качестве исходного одномерного массива используется массив последовательных простых чисел, сгенерированных методом «решета Эратосфена».

**Summary.** An algorithm is proposed for filling a rectangular matrix of  $n \times m$  elements of a formed one-dimensional numerical set of lattice points with a given continuous curve. Unlike traditional problem solving algorithms for some model cases (for example, when a rectangular matrix is spirally filled), the proposed algorithm does not require cumbersome mathematical calculations and is easily adapted to the specific geometry of non-standard matrix filling ("filling curve"). This is achieved by the organization of "obstacles" in the process of filling the matrix with consecutive incoming elements of the original one-dimensional set of lattice points and switching the direction of "motion", in accordance with the specified scheme ("filling curve"). The description of the algorithm for one of the model productions of the problem (filling in a clockwise spiral, starting from the "north-west corner" of the matrix) and its implementation in PASCAL (the source code of the program and the corresponding screenshots) is given. As the initial one-dimensional set of lattice points, set of lattice points of successive prime numbers generated by the "Eratosthenes" method is used.

**Ключевые слова:** алгоритм, матрица, нестандартное заполнение.

**Key words:** algorithm, matrix, non-standard filling.

УДК 510.51

Многие задачи прикладной математики требуют заполнения прямоугольной матрицы числами из некоторой совокупности.

Соответствующие числовые совокупности определяются конкретной задачей, а сами числа могут выражать самый разнообразный смысл: коэффициенты жесткости некоторой механической системы, физические параметры исследуемой модели в их численном выражении, коэффициенты системы обыкновенных или дифференциальных уравнений и т.д.

При этом под «стандартным заполнением» матрицы понимается ситуация, когда матрица заполняется построчно: по строкам – «слева направо», по столбцам – «сверху вниз».

Простая модификация «стандартного заполнения», когда меняются только направления заполнения строк или столбцов (например, когда заполнение идет «снизу вверх» или «справа налево», или «зигзагом»: по нечетным строкам – «слева направо», по четным – «справа налево») не представляет существенных трудностей и легко программируется.

В работе рассмотрен случай «существенно нестандартного» заполнения матрицы (по некоторой заданной непрерывной кривой) на примере ее заполнения по спирали. Предложенный при этом алгоритм может быть легко адаптирован и к другим «существенно нестандартным» случаям (изменению «кривой заполнения»).

Традиционный алгоритм заполнения матрицы по спирали (по часовой или против часовой стрелки) требует значительных математических усилий, так как по мере развертывания процесса заполнения матрицы меняется не только направление «движения», но и количество еще незаполненных элементов строки (столбца) (см., например, задачу 81.3 в [1]).

Предлагаемый в настоящей работе алгоритм позволяет избежать вышеописанных трудностей и легко запрограммировать соответствующее заполнение матрицы числами из заданного массива.

Отметим, что задача заполнения матрицы естественным образом разбивается на две подзадачи:

- 1) формирование требуемой числовой совокупности;
- 2) собственно «нестандартное заполнение» матрицы.

Подзадача 1 имеет самую широкую постановку, тесно связанную с изначально решаемой более общей задачей (для решения которой и формируется двумерный массив, то есть матрица), и выходит за пределы нашего рассмотрения. В качестве ее примера мы рассмотрим генерацию последовательных простых чисел методом «решета Эратосфена».

В данной работе нас будет интересовать подзадача 2, а именно трансформация сформированного одномерного массива в двумерный («нестандартное заполнение» матрицы).

В качестве примера конкретного решения подзадачи 2 – «нестандартного заполнения» матрицы мы рассмотрим задачу заполнения прямоугольной матрицы размеров  $n \times m$  по спирали по часовой стрелке, начиная с «северо-западного угла» (как уже отмечалось выше, предложенный алгоритм легко адаптируется и к другим постановкам подзадачи 2).

Идея алгоритма заполнения состоит в следующем: встретив «препятствие», необходимо изменить направление «движения» (то есть заполнения элементов матрицы) в соответствии с поставленной подзадачей 2.

Например, для рассматриваемого нами случая – заполнения по спирали по часовой стрелке – требуется каждый раз поворачивать направо.

Закодировав направления движения следующим образом: 0 – «слева направо»; 1 – «сверху вниз»; 2 – «справа налево»; 3 – «снизу вверх», получим, что код направления следует увеличивать каждый раз на единицу, сбрасывая на ноль, по достижению максимального значения, равного четырем.

Главный момент реализации идеи алгоритма состоит в том, как организовать «препятствие».

Для этого обнуляем все элементы матрицы, окружив ее по периметру «забором» из единиц, то есть заводим вместо исходной матрицы размеров  $n \times m$ , матрицу размеров  $(n + 2) \times (m + 2)$ , заполняя нулями и единицами соответствующие элементы.

Заполнив «стартовый» элемент «малой матрицы» первым значением сформированной совокупности (в нашем случае, первым простым числом – 2), организуем «прощупывание» очередного элемента матрицы текущего направления (в нашем случае, направления с кодом 0 – «слева направо»).

Если «прощупываемый элемент» равен нулю, то заполняем данный элемент матрицы очередным значением сформированной числовой совокупности.

В противном случае («наткнулись на препятствие») изменяем соответствующим образом код направления и осуществляем «прощупывание» в новом направлении.

Во избежание заикливания (на последнем шаге заполнения матрицы «препятствие» возникнет в любом направлении, так как матрица будет уже полностью заполнена) мы контролируем текущее количество заполненных клеток матрицы с помощью счетчика (значение счетчика, равное  $n \cdot m$ , означает завершение процесса заполнения матрицы).

Отметим, что в случае, когда в исходной числовой совокупности могут содержаться элементы, равные 0 или 1, в качестве индикаторов не заполненных и, соответственно, заполненных элементов матрицы можно использовать любые не равные друг другу числа, заведомо не содержащиеся в исходном массиве.

Ниже приводится код программы на языке Pascal (откомпилированный в среде Borland Pascal 7.0), реализующей задачу заполнения по спирали прямоугольной матрицы размеров  $n \times m$  последовательными простыми числами (сгенерированными методом «решета Эратосфена») по часовой стрелке, начиная с «северо-западного угла», и результат ее выполнения.

```
program SimplSpir;
uses CRT; {вспомогательный модуль для использования функций ClrScr – очистки экрана и Read-
Key – приостановки экрана пользователя}
const
  MaxCount=10000; {константа, регулирующая количество сгенерированных простых чисел}
  MaxDim=100; {константа, регулирующая максимальные размеры заполняемой матрицы}
label A; {метка для прерывания процесса заполнения матрицы при обнаружении недостаточного
количества сгенерированных простых чисел}
var
  N,M,i,j:byte; {переменные N, M – размеры заполняемой матрицы; i, j – рабочие переменные}
  Count,k:word; {переменная Count – количество сгенерированных простых чисел; k – порядковый
номер простого числа}
  MassivOfSimpleNumbers:array[1..MaxCount] of word; {массив для хранения сгенерированных
простых чисел}
  Matrix:array[0..MaxDim,0..MaxDim] of word; {матрица для заполнения}
  Direct:0..4; {код направления}
Procedure Eratosfen; {процедура генерации простых чисел методом "решета Эратосфена"}
var
  WorkMassiv:array[2..MaxCount] of boolean; {рабочая матрица для "просеивания" простых чисел
методом "решета Эратосфена"}
  i,j:word; {рабочие переменные}
begin
  for i:=2 to MaxCount do WorkMassiv[i]:=true;
  Count:=0;
  for i:=2 to MaxCount do
  begin
    if WorkMassiv[i] then
    begin
      Inc(Count);
      MassivOfSimpleNumbers[Count]:=i;
      j:=i;
      while j<= MaxCount do
      begin
        WorkMassiv[j]:=false;
        j:=j+i;
      end;
    end;
  end;
end;
```



```
end;
begin
  ClrScr; {очистка экрана}
  writeln('Введите размеры заполняемой матрицы:');
  write('Число строк N=');readln(N);
  write('Число столбцов M=');readln(M);
  Eratosfen; {генерация простых чисел методом "решета Эратосфена"}
  {Проверка достаточности количества сгенерированных простых чисел для заполнения матрицы
заданных размеров}
  if Count<N*M then
    begin
      writeln('Для заданных значений N и M сформировано недостаточное количество простых чи-
сел!');
      writeln('Требуется увеличить значение константы MaxCount в тексте программы!');
      ReadKey;
      goto A;
    end;
  Count:=N*M; {переменная Count уменьшается до значения, требуемого для заполнения матрицы
заданных размеров}
  {Подготовка матрицы к "нестандартному заполнению" – расстановка "препятствий" по периметру
матрицы и "расчистка" её рабочего пространства}
  for i:=1 to N do
    for j:=1 to M do Matrix[i,j]:=0;
  for j:=0 to M+1 do
    begin
      Matrix[0,j]:=1;
      Matrix[N+1,j]:=1;
    end;
  for i:=1 to N do
    begin
      Matrix[i,0]:=1;
      Matrix[i,M+1]:=1;
    end;
  {Инициализация переменных}
  Direct:=0;
  i:=1;
  j:=0;
  k:=0;
  {Заполнение матрицы}
  while k<Count do
    begin
      case Direct of
        0:if Matrix[i,j+1]=0 then
          begin Inc(j); Inc(k); Matrix[i,j]:=MassivOfSimpleNumbers[k] end
          else Inc(Direct);
        1:if Matrix[i+1,j]=0 then
          begin Inc(i); Inc(k); Matrix[i,j]:=MassivOfSimpleNumbers[k] end
          else Inc(Direct);
        2:if Matrix[i,j-1]=0 then
          begin Dec(j); Inc(k); Matrix[i,j]:=MassivOfSimpleNumbers[k] end
          else Inc(Direct);
```

```

3:if Matrix[i-1,j]=0 then
  begin Dec(i); Inc(k); Matrix[i,j]:=MassivOfSimpleNumbers[k] end
  else Direct:=0;

end;
end;
{Вывод результата}
writeln("Заполненная матрица имеет вид:");
for i:=1 to N do
  begin
    for j:=1 to M do write(Matrix[i,j]:5);
    writeln
  end;
ReadKey;
A:end.

```

```

Ярлык для Vr.bat
Введите размеры заполняемой матрицы:
Число строк N=20
Число столбцов M=15
Заполненная матрица имеет вид:
 2   3   5   7  11  13  17  19  23  29  31  37  41  43  47
317 331 337 347 349 353 359 367 373 379 383 389 397 401 53
313 683 691 701 709 719 727 733 739 743 751 757 761 409 59
311 677 1033 1039 1049 1051 1061 1063 1069 1087 1091 1093 769 419 61
307 673 1031 1321 1327 1361 1367 1373 1381 1399 1409 1097 773 421 67
293 661 1021 1319 1583 1597 1601 1607 1609 1613 1423 1103 787 431 71
283 659 1019 1307 1579 1783 1787 1789 1801 1619 1427 1109 797 433 73
281 653 1013 1303 1571 1777 1931 1933 1811 1621 1429 1117 809 439 79
277 647 1009 1301 1567 1759 1913 1949 1823 1627 1433 1123 811 443 83
271 643 997 1297 1559 1753 1907 1951 1831 1637 1439 1129 821 449 89
269 641 991 1291 1553 1747 1901 1973 1847 1657 1447 1151 823 457 97
263 631 983 1289 1549 1741 1889 1979 1861 1663 1451 1153 827 461 101
257 619 977 1283 1543 1733 1879 1987 1867 1667 1453 1163 829 463 103
251 617 971 1279 1531 1723 1877 1873 1871 1669 1459 1171 839 467 107
241 613 967 1277 1523 1721 1709 1699 1697 1693 1471 1181 853 479 109
239 607 953 1259 1511 1499 1493 1489 1487 1483 1481 1187 857 487 113
233 601 947 1249 1237 1231 1229 1223 1217 1213 1201 1193 859 491 127
229 599 941 937 929 919 911 907 887 883 881 877 863 499 131
227 593 587 577 571 569 563 557 547 541 523 521 509 503 137
223 211 199 197 193 191 181 179 173 167 163 157 151 149 139

```

```

Ярлык для Vr.bat
Введите размеры заполняемой матрицы:
Число строк N=50
Число столбцов M=50
Для заданных значений N и M сформировано недостаточное количество простых чисел!
Требуется увеличить значение константы MaxCount в тексте программы!

```

## ЛИТЕРАТУРА

1. Брудно, А. Л. Олимпиады по программированию для школьников / А. Л. Брудно, Л. И. Каплан; под ред. Б. Н. Наумова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 96 с.
2. Немногин, С. А. Turbo Pascal / С. А. Немногин. – СПб.: Питер, 2003. – 492 с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING

**Отряскина Т. А., Нужных П. Н.**  
**T. A. Otryaskina, P. N. Nuzhnyih**

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ  
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ НАСАДКИ ПАЛЛЯ**

**INTENSIFICATION PROCESS RECTIFICATION DUE TO IMPROVEMENT  
OF THE DESIGN NOZZLE PALL**

**Отряскина Татьяна Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: knastu2000@mail.ru.

**Otryaskina Tatiana Alexandrovna** – cand. the technology. sciences; senior lecturer of the Department "Machines and apparatuses of chemical production", Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: knastu2000@mail.ru.

**Нужных Павел Николаевич** – магистр кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bradli91@bk.ru.

**Nuzhnyih Pavel Nikolaevich** – master of the "Machines and Devices of Chemical Productions" department, Komsomolsk-on-Amur state technical university (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bradli91@bk.ru.

**Аннотация.** В промышленной практике разделения газовых и жидких смесей методами абсорбции, ректификации и т.д. насадочные колонны применяются значительно реже, чем тарельчатые. Это связано с тем, что, несмотря на существующее в настоящее время многообразие конструкций нерегулярных насадок, в качестве контактных устройств до сих пор используются в основном морально устаревшие импортные насадки типа колец Рашига и Палля. В статье предложена новая конкурентоспособная насадка, имеющая высокую эффективность, низкое гидравлическое сопротивление, большую пропускную и малую удерживающую способности. Также у нее достаточно простая технология изготовления, допускающая массовое производство, низкая материалоемкость и необходимая прочность.

**Summary.** In industrial practice of division of gas and liquid mixes by methods of absorption, rectification etc. nozzle columns are applied considerably less than dish-shaped. It is connected with the fact that, despite the variety of designs of irregular nozzles existing now, as contact devices are still used generally obsolete import nozzles like rings of Rashiga and Pall. In article the new competitive nozzle having high efficiency, low hydraulic resistance, big throughput and small keeping abilities is offered. Also she has rather simple manufacturing techniques, allowing mass production, a low material capacity and necessary durability.

**Ключевые слова:** кольца Палля, кольца Рашига, гидравлическое сопротивление, процесс массообмена, кавитации потока, конструкция насады.

**Key words:** Pall's rings, Rashiga is pricked, hydraulic resistance, process of a mass exchange, cavitations of a stream, a design spread.

УДК 621.7.015

**Введение**

В технологических процессах химических производств процесс ректификации, безусловно, является основным: от его качества и производительности зависят в значительной степени качественные параметры готового продукта.

В промышленной практике разделения газовых и жидких смесей методом ректификации насадочные колонны применяются значительно реже, чем тарельчатые. Это связано с тем, что применение известных многочисленных насадок для конкретного технологического процесса воз-

можно только после проведения экспериментальных исследований и/или моделирования процесса взаимодействия потоков с рабочей частью насадки. Однако результаты таких исследований и моделирования в современной литературе отсутствуют, а на предприятиях химической технологии преимущественно используют известные насадочные элементы типа колец Рашига или насадки Палля.

Исследованиями В. И. Фетисова и В. Н. Стабникова [1; 2] установлено, что основными параметрами насадки, определяющими ее эффективность применения, являются: доля свободного объема, гидравлическое сопротивление, высота единицы переноса, коэффициент смешиваемости, геометрические параметры.

Развитие цилиндрических насадок шло по пути интенсификации процесса массообмена, уменьшения гидравлического сопротивления, снижения энергозатрат на проведение производственных процессов, т.е. по пути создания таких конструкций насадок, у которых массообменные характеристики были бы значительно выше, чем у колец Рашига.

С созданием колец Палля удалось сохранить развитую удельную геометрическую поверхность, при этом, по сравнению с кольцами Рашига, улучшался массообмен во внутренней полости насадки за счет турбулизации потоков, обусловленной воздействием лепестков.

Однако и эта насадка имеет ряд недостатков: низкую эффективность работы при небольших скоростях газа и массовых расходах жидкости и газа, повышенную неравномерность распределения взаимодействующих потоков, а также частый отрыв лепестков колец и недостаточную эксплуатационную прочность [3].

*Цель данной работы* – разработка усовершенствованной конструкции насадки Палля для обеспечения интенсификации процесса ректификации на основе снижения гидравлического сопротивления, турбулизации взаимодействующих потоков и повышения прочности элементов насадки.

#### **Разработка новой конструкции**

В настоящее время известно применение насадки Палля (см. рис. 1). Основными элементами данной конструкции являются лепестки, завернутые на  $90^\circ$  и расположенные рядами по высоте в шахматном порядке [4]. Однако данной конструкции присущи недостатки, указанные выше.

В результате проведенного сравнительного анализа эффективности работы различных насадочных устройств установлено, что конкурентоспособная насадка должна иметь высокую эффективность, низкое гидравлическое сопротивление, большую пропускную и малую удерживающую способности. Также у нее должны быть: достаточно простая технология изготовления, допускающая массовое производство, низкая материалоемкость и необходимая прочность.

В данной статье представлена разработанная усовершенствованная насадка Палля, конструкция которой удовлетворяет требованиям к насадкам (см. рис. 2), изложенным выше.

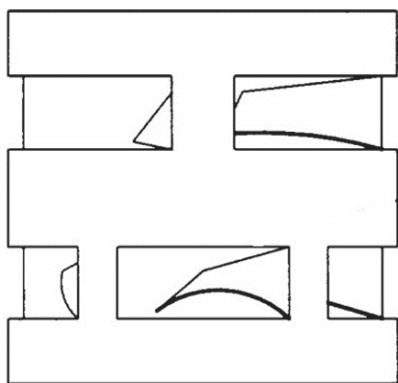


Рис. 1. Насадка Палля, прототип  
(патент РФ № 2230607)

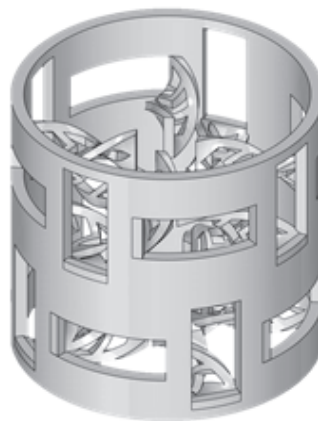


Рис. 2. Насадка Палля  
с измененными лепестками

Новая конструкция насадки для массообменных аппаратов содержит цилиндрическое кольцо, на боковой поверхности которого выполнены прямоугольные просечки, расположенные рядами по высоте в шахматном порядке. Просечки выполнены в виде лепестков, имеющих три стрелковидных отверстия (см. рис. 3, а), что значительно увеличивает площадь контакта фаз. Дополнительно лепестки повернуты на  $180^\circ$  относительно поверхности лепестка (см. рис. 3, б) – это обеспечивает наиболее благоприятные условия для контактирования проходящих через элемент насадки потоков. Создаваемые дополнительные местные завихрения стекающей жидкости способствуют дополнительной турбулизации жидкостного потока, что делает возможным осуществление процесса массообмена даже при небольших газожидкостных нагрузках. Кроме того, подобное конструктивное оформление лепестков препятствует стеканию жидкости к стенке колонны. Предлагаемая конструкция позволяет обеспечить за счет интенсификации турбулизации потоков и повышения степени их поперечного перемешивания, за счет увеличения поверхности контакта с расширенной поверхностью контакта лепестков, взаимодействующих фаз и повышения эффективности массообмена даже при пленочном режиме работы колонны.

а)



б)

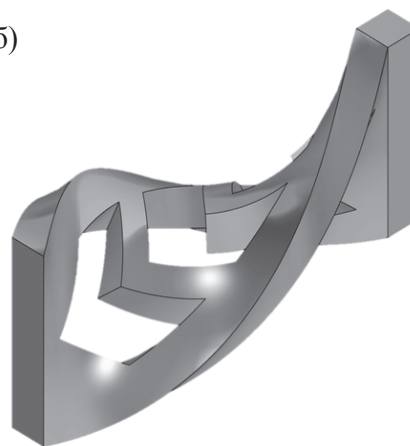


Рис. 3. Элемент насадки Палля: а – вид сбоку; б – изометрический вид

### Моделирование процесса работы насадки

С целью получения достоверной информации о работе усовершенствованной насадки была разработана ее геометрическая модель в системе CAD. В программном продукте CAE SOLIDWORKS Flow Simulation смоделирован процесс массообмена с моделью новой насадки для анализа эффективности работы [5].

Исходные данные для моделирования: скорость потока на входе – 5 м/с; скорость потока на выходе – 4 м/с; массовый расход – 4 кг/с; статическое давление – 2 МПа.

Результат моделирования процесса взаимодействия элементов насадки с потоком жидкости представлен на рис. 4.

На рис. 4 представлены результаты моделирования в виде схемы движения потока через насадку, где значение скорости потока свидетельствует о снижении гидравлического сопротивления. На данной модели наглядно просматривается отсутствие зон с повышенной скоростью потока, что свидетельствует об отсутствии кавитации потока, которая приводит к уменьшению площади контакта фаз. При попадании жидкости вовнутрь насадки происходит притормаживание, что, в свою очередь, увеличивает время контакта фаз, повышает интенсивность поперечного перемешивания и, как следствие, приводит к росту активной поверхности контакта фаз, и предотвращает проскок фазовых компонентов без их взаимного контакта. В итоге при анализе смоделированного процесса массообменные характеристики выросли приблизительно на 15 %, а падение давления снизилось в среднем в 1,5 раза. Интенсификация процесса массообмена достигается за счет снижения гидравлического сопротивления и увеличения площади контакта фаз.

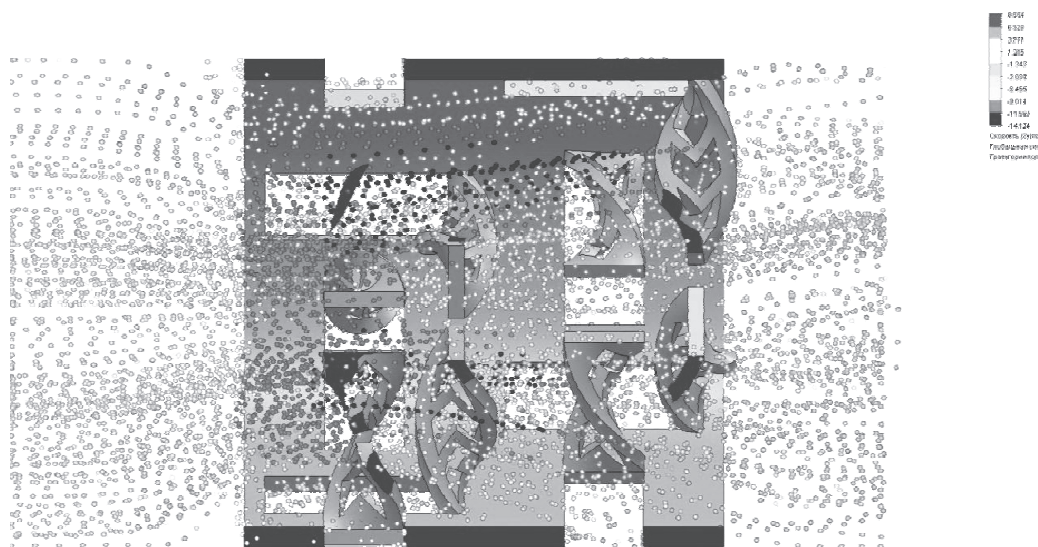


Рис. 4. Схема движения потока внутри насадки

### Выводы

1. На основании результатов моделирования процесса массообмена установлено, что разработанная конструкция насадки Палля позволяет интенсифицировать процесс ректификации, так как ее конструкция имеет низкое, по сравнению с другими насадками, эффективное гидравлическое сопротивление и обеспечивает увеличение площади контакта фаз взаимодействующих потоков.

2. Анализ конструкции новой насадки показал, что она является технологичной, обладает низкой материалоемкостью и высокой прочностью, что позволяет наладить ее массовое производство и обеспечивает ее высокую конкурентоспособность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фетисов, В. И. Разработка конструкций контактных устройств для массообменных колонн и исследование эффективности их работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04: защищена 09.06.00: утв. 08.12.00 / Фетисов Валерий Иванович. – Уфа, 2000. – 273 с.
2. Стабников, В. Н. Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов / В. Н. Стабников. – Киев: Техника, 1970. – 208 с.
3. Москалик, В. М. Гидродинамика и массообмен в насадочных аппаратах при пульсирующей подаче жидкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Москалик Валерий Михайлович. – М., 1994. – 258 с.
4. Пат. № 2230607 Российской Федерации. Элемент насадки для массообменных аппаратов / Владимиров А. И., Кремнева Т. В., Щелкунов В. А., Вихман А. Г.; опубл. 20.06.2004.
5. Розен, А. М. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / А. М. Розен, А. И. Мартюшин, В. М. Олевский. – М.: Химия, 1980. – 320 с.



Соловьев В. А., Дерюжкова Н. Е., Чжо Аунг Хтет  
V. A. Solovyov, N. Ye. Deryuzhkova, Kyaw Aung Htet

## К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ВЗАИМОСВЯЗАННОЙ СИСТЕМЫ ОБЪЕМНОГО ФОРМОВАНИЯ

## ON THE MATHEMATICAL MODEL OF THE OBJECT FOR INTERCONNECTED SYSTEM IN BULK FORMING

**Соловьев Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Mr. Vyacheslav A. Solovyov** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the department of electrical machine and automation of industrial plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Дерюжкова Нелли Егоровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Ms. Nelli Ye. Deryuzhkova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of electrical machine and automation of industrial plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Чжо Аунг Хтет** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: luckyboykah7@gmail.com.

**Kyaw Aung Htet** – a post-graduate student, Department of electrical machine and automation of industrial plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: luckyboykah7@gmail.com.

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объемного формования. Процесс формования можно считать как процесс изгиба и придания листовому материалу определенной кривизны, который позволяет существенно сократить издержки на механообработку и временные затраты на последующих этапах изготовления изделия. Оптимизация режимов формовки должна предусматривать предварительные исследования. Проведение исследований на реальном объекте затруднительно, поэтому целесообразно процесс исследования перевести в область моделирования. Управляющее звено в формовании представляет собой многодвигательный электропривод, реализуемый по схеме замкнутой системы регулирования, а силовое воздействие на листовую материал вынуждает рассматривать систему управления электроприводами как взаимосвязанную. В приближении через параметры узла изгиба получена разработанная математическая модель объекта. По разработанной математической модели объекта структурная схема объекта регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования представлена в среде MatLab-Simulink.

**Summary.** In this article, questions of the mathematical model of the object for interconnected system in bulk forming are considered. The forming process can be considered as a bending process and obtaining a specific curvature of sheet metal that can significantly reduce the cost of machining and time spent on subsequent stages of the product manufacture. Optimization methods of forming must be provided for preliminary research. The research with the real object is difficult and therefore expediently research will be conducted in modeling environment. Control link of forming process can be configured as a multi-motor electric drive that is implemented according to the scheme of the closed-loop control system and the acting force on the sheet material represents the control system of electric drives as the interconnected system. In the approximation through the parameters of the bending process, the developed mathematical equation of the object is obtained. According to the developed mathematical model of control object, the structural diagram of the object regulation of the three-point bending for the interconnected control system is presented in the MatLab- Simulink environment.

**Ключевые слова:** взаимосвязанная система, математическая модель, объемное формирование, изгиб.

**Key words:** Interconnected system, mathematical model, bulk forming, bending.

УДК 621.771

В конструкциях целого класса изделий машиностроительного производства широко применяются крупногабаритные металлические детали двойной кривизны. Как правило, изготовление таких изделий осуществляется путем формования из листового материала. Придание листовому материалу определенной кривизны позволяет существенно сократить издержки на механообработку и временные затраты на последующих этапах изготовления изделия. Для крупногабаритных изделий наиболее приемлемым способом обработки давлением следует признать способ высокотемпературной многоточечной формовки, при котором на заготовку при определённой температуре воздействует массив независимо движущихся стержней [1-4]. Процесс формообразования зависит от множества разнородных факторов: свойств материала, температуры, скорости изменения прикладываемого усилия и др. Поэтому оптимизация режимов формовки должна предусматривать предварительные исследования. Однако проведение исследований на реальном объекте затруднительно из-за единичности и уникальности такой установки, а изготовление опытной установки – дорогостоящее мероприятие. Поэтому целесообразно процесс исследования перевести в область моделирования.

При постановке задачи будем полагать, что формуемая заготовка представляет собой лист сравнительно большой толщины. Формующие стержни располагаются в виде равномерно распределенной матрицы оппозитно с двух сторон заготовки (см. рис. 1). Привод перемещения стержней выполнен на базе автономных частотно-регулируемых электроприводов. Преобразование вращательного движения в поступательное осуществляется с помощью типовой шарико-винтовой пары (актуатора).

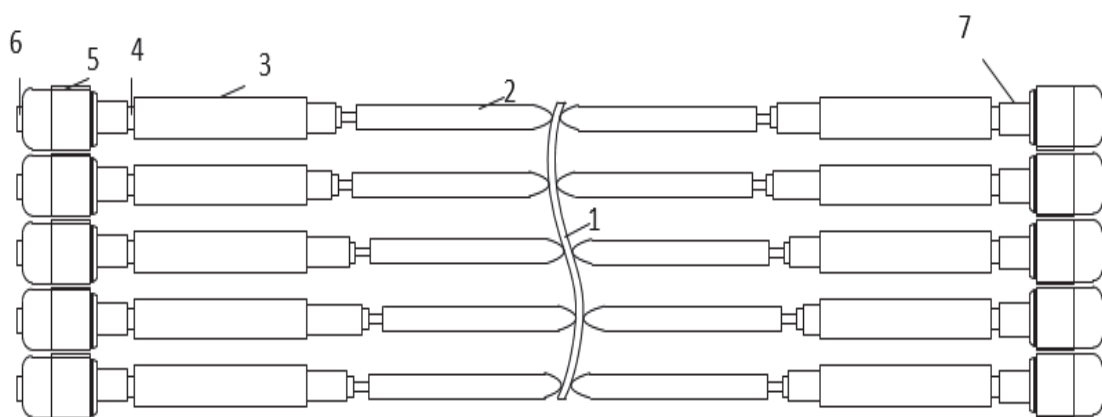


Рис. 1. Схематичное расположение формирующих стержней: 1 – заготовка; 2 – стержень; 3 – актуатор; 4 – датчик положения; 5 – двигатель; 6 – датчик скорости; 7 – редуктор

Для придания заготовке требуемой формы управление приводами стержней должно быть индивидуальным, в то же время наличие общего объекта силового воздействия вынуждает рассматривать систему управления электроприводами как взаимосвязанную. Базовым звеном, обеспечивающим придание заготовке желаемой кривизны, является комбинация взаимодействия трех стержней. Сам процесс формования можно считать как процесс изгиба, который схематично можно изобразить в виде, показанном на рис. 2.

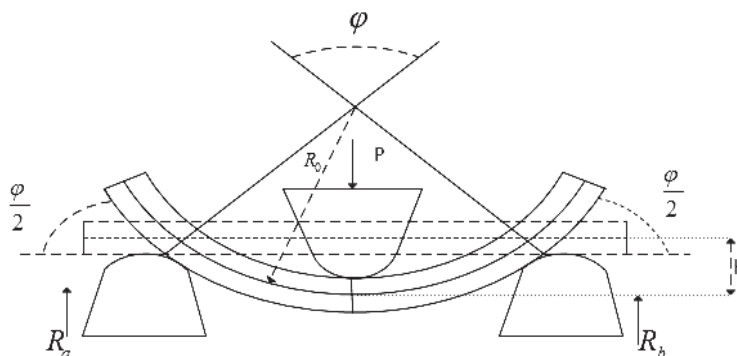


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая процесс изгиба:  $R_0$  – условный центральный радиус;  $\varphi$  – центральный угол изгиба;  $h$  – величина прогиба (линейное перемещение формирующих стержней);  $P$  – усилие воздействующее на заготовку;  $R_a, R_b$  – противодействующие усилия на oppositно расположенных стержнях

При перемещении центрального стержня на величину  $\Delta h$  со стороны заготовки на него будет действовать сила сопротивления, которая будет зависеть как от размеров заготовки, так и от свойств материала заготовки [5]

$$\Delta P = \frac{\sigma_s \frac{B s^2}{4} + \frac{\Pi}{R_0} \frac{B s^3}{12}}{\frac{l}{4} + \frac{\Delta h}{4} \frac{\operatorname{tg}(\frac{\varphi}{2}) - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg}(\frac{\varphi}{2})}}, \quad (1)$$

где  $s$  – толщина заготовки, м;  $B$  – размер заготовки, подвергаемый изгибу и измеряемый в перпендикулярном отношении к оси расположения oppositно расположенных стержней, м;  $R_0$  – центральный радиус изгиба, м;  $l$  – расстояние между осями oppositно расположенных стержней, м;  $\sigma_s$  – модуль пластичности материала;  $\Pi$  – модуль упрочнения материала;  $\mu$  – коэффициент трения между стержнем и заготовкой.

При выводе данного соотношения полагалось, что толщина слоя, подвергающаяся немонотонной деформации, незначительна, а радиус изгиба больше трехкратного значения толщины заготовки.

Угол изгиба  $\varphi$  в процессе формирования заготовки изменяется от нулевой величины до некоторого конечного значения, определяемого линейным перемещением. В первом приближении  $\operatorname{tg}\varphi/2$  можно выразить через параметры узла формирования  $\operatorname{tg}\varphi/2 = 2\Delta h/l$ . Тогда выражение (1) примет вид

$$\Delta P = \frac{\sigma_s \frac{B s^2}{4} + \frac{\Pi}{R_0} \frac{B s^3}{12}}{\frac{l}{4} + \frac{\Delta h}{2} \frac{2 \Delta h / l - \mu}{1 + \mu 2 \Delta h / l}}.$$

Необходимо отметить, модуль пластичности материала зависит не только от свойств материала, но и от температуры, при которой происходит формирование. Данную зависимость можно получить на основании экспериментальных данных. Характер такой зависимости для сплава 7075 в качестве примера показан на рис. 3.

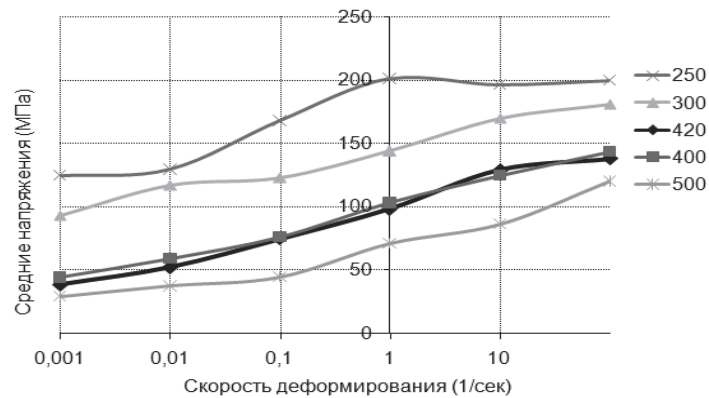


Рис. 3. Зависимость напряжений от скорости деформирования при разных температурах для сплава 7075

Полагая, что электроприводы перемещения стержней выполнены в виде сервоприводов переменного тока, тогда структурную схему объекта регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования в среде MatLab можно представить в виде, приведенном на рис. 4.

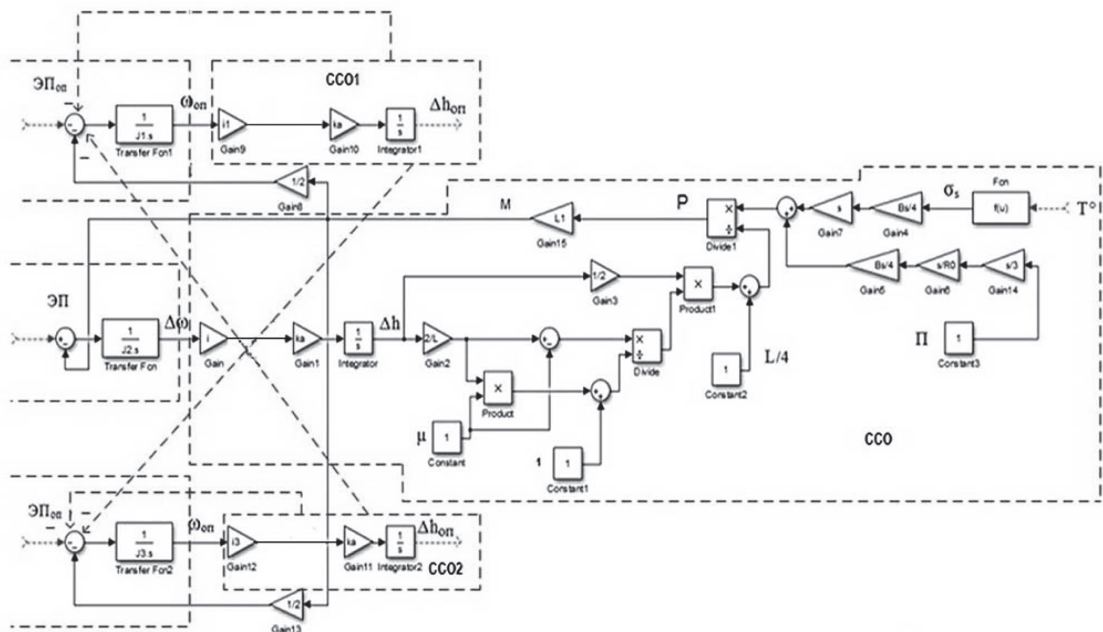


Рис. 4. Структурная схема объекта регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования в среде MatLab: ССО – структурная схема объекта; ССО1 – структурная схема объекта 1; ССО2 – структурная схема объекта 2; ЭП – электропривод; ЭП<sub>оп</sub> – опорный электропривод

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ 2251464, В 21 D 11/20. Устройство формования / Клопотов И. Д., Любашевская И. В., Раевская Г. А., Рублевский Л. Л., Соснин О. В.; опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13.
2. Патент РФ № 2216422. Формообразующее устройство / Гусев Г. А., Любашевская И. В., Рублевский Л.Л.; опубл. 20.11.2003.
3. Патент РФ № 2275267. Формообразующее устройство / Любашевская И. В., Рублевский Л. Л.; опубл. 27.04.2006.
4. А. с. СССР № 1147471. Способ формообразования деталей двойной крутизны и устройство для его осуществления / Соснин О. В., Шубин И. А., Горин В. В., Раевская Г. А.; опубл. 30.03.1985. БИ № 12.
5. Горбунов, М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов / М. Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1970.



Елистратов Д. С., Шурпо А. Н.  
D. S. Elistratov, A. N. Shurpo

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ УРОВНЕЙ ЗРЕЛОСТИ

## MANAGEMENT OF THE MANUFACTURING PREPARATION PROCESS AND MANUFACTURING OF PARTS BASED ON MATURITY LEVELS

**Елистратов Дмитрий Сергеевич** – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного технологического университета СТАНКИН (Россия, г. Москва). Корреспондентский почтовый адрес: 143989, Московская область, г. Железнодорожный, ул. Лесопарковая, д. 12; тел. 8(926)918-53-46. E-mail: zyreshex@inbox.ru.

**Mr. Dmitriy S. Elistratov** – Postgraduate student, Moscow state technological university (Russia, Moscow). Postal address for correspondence: 143989, Moscow region, Zheleznodorozhny, Lesoparkovaya St, 12; tel. 8(926)918-53-46. E-mail: zyreshex@inbox.ru.

**Шурпо Александр Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории 1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (Россия, г. Москва). Корреспондентский почтовый адрес: 127055, г. Москва К-55, а/я 24; тел. 8(499)978-26-02; 8(910)451-98-12. E-mail: a-shurpo@yandex.ru.

**Mr. Aleksandr N. Shurpo** – PhD in engineering, senior research fellow, laboratory 1, Institute for design-technological Informatics, Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow). Postal address for correspondence: 127055, Moscow K-55, and/I 24; tel: 8(499) 978-26-02; 8(910)451-98-12. E-mail: a-shurpo@yandex.ru.

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной проблеме, связанной с малоэффективным управлением деятельностью на машиностроительных предприятиях. Особое внимание уделено одному из важных процессов предприятия – процессу подготовки производства и изготовления деталей. Показано, что традиционное управление процессом обладает рядом существенных недостатков, из-за чего рекомендуется переход к процессной структуре управления. Предложено использовать уровни зрелости для оценки управляемости и эффективности процесса. Сделано заключение, что управление процессом подготовки производства и изготовления деталей на основе уровней зрелости позволяет улучшить качество и сократить время его выполнения, а также определить действия по дальнейшей его оптимизации.

**Summary.** The article is devoted to an actual problem connected with inefficient control of activities at machine-building enterprises. Special attention is given to one of important processes of an enterprise – a preparation and part manufacturing process. It is shown that traditional process control has a number of significant disadvantages, which is why it is recommended to move to the process control structure. The use of maturity levels is proposed to assess controllability and efficiency of the process. It is concluded that the management of a preparation and parts manufacturing process based on maturity levels makes it possible to improve quality and reduce time of its implementation, as well as determine actions for its further optimization.

**Ключевые слова:** организационная структура управления, подготовка производства, управление процессом, уровни зрелости, автоматизация управления.

**Key words:** organizational structure of control, preproduction, process control, maturity levels, control automation.

УДК 658.51

### Две структуры управления: функциональная и процессная

Важную роль на современных предприятиях играет организационная структура управления – устройство и взаимодействие функциональных подразделений. Она определяет эффективность деятельности предприятия в целом и отдельных работ в частности.

На каждом предприятии существуют иерархические структуры руководителей и подразделений. Последние структуры формируются по выполняемым ими функциям. Результатом выполнения функций всегда является какой-либо промежуточный или конечный продукт, полученный из некоторого входного набора ресурсов. Так как для каждого подразделения расписаны зоны ответственности и желаемые результаты, то можно отследить этапы изменения продукта из начального в конечное состояние.

Данная структура является традиционной и называется функциональной. У нее, безусловно, есть свои преимущества, среди которых можно выделить следующие:

- оптимальное разделение всей организации на подразделения согласно выполняемым функциям;

- персонал организации развивается в соответствующих направлениях, приобретая бесценный опыт и полезные навыки;

- у каждого работника есть четкие инструкции, по которым он выполняет свою работу и т.д.

В результате такой организации работы происходит некоторая изоляция функциональных подразделений друг от друга, тем самым усиливая связь внутри подразделения между начальником и подчиненными. Каждый сотрудник старается угодить только своему начальнику, совершенно не заботясь о тех, кто будет принимать их работу дальше по процессу. Они не обращают внимания на цели предприятия, так как никто не заставляет их смотреть за рамки собственного подразделения.

Таким образом, одновременно с усилением связей внутри подразделения ослабевает связь между подразделениями, из-за чего процесс принятия решений может значительно увеличиваться.

Ярким примером данной проблемы служит процесс обмена информацией между сотрудниками двух отделов. Вместо того чтобы передать информацию напрямую, она идет по цепочке: «сотрудник 1 – начальник сотрудника 1 – начальник сотрудника 2 – сотрудник 2».

Для любого современного предприятия в условиях нынешней рыночной конкуренции подобные проблемы являются недопустимыми. В частности, весь персонал должен осознавать конечные цели своей деятельности.

В конце концов предприятия пришли к выводу, что необходимо рассматривать работу в плоскости выполняемых процессов, протекающих сквозь организацию, а не её движение вдоль функциональных структур. Таким образом, начался переход от функционального управления к управлению процессами.

*Процессная структура управления* рассматривает такую организацию деятельности предприятия, в которой вся деятельность состоит из бизнес-процессов. Само понятие «бизнес-процесс» описано в литературе как деятельность по преобразованию входных ресурсов в результат, обладающий ценностью для его потребителя [2]. Помимо процессов, выполняющихся в рамках какого-либо подразделения, в данной структуре рассматриваются и «сквозные» процессы, проходящие через границы подразделений.

В организациях с функциональной структурой «сквозные» процессы существуют, но:

- отсутствуют какие-либо руководства их выполнения;

- нет руководящего звена, ответственного за весь процесс;

- имеются проблемы с контролем выполнения процесса;

- их информационное обеспечение неэффективно [1, 250].

Таким образом, для определения процессов предприятия можно использовать имеющуюся функциональную систему управления. В процессе анализа, проводимого для формализации процессов, можно отсеять процессы, не несущие пользы для предприятия, объединить процессы в цепочки, что позволит плавно переходить от выхода одного процесса к входу другого, а также по возможности распараллелить процессы для экономии времени на их выполнение.

При процессной структуре управления сотрудник несет ответственность не только за свои функции, но и за те бизнес-процессы, в которые он вовлечен. Также он должен следить за важными для него параллельными процессами. Таким образом, в данной структуре достигается то, чего

лишена функциональная – взаимная ответственность за результат процесса между всеми его участниками.

Каждый процесс организации должен управляться специальным должностным лицом – владельцем. В его функции входят:

- ответственность за корректное выполнение процесса;
- определение ресурсов, входов и выходов, границ процесса;
- взаимодействие между исполнителями и т.п.

На современном машиностроительном предприятии среди множества процессов можно выделить процесс подготовки производства и изготовления деталей. Его ключевыми исполнителями являются конструктор, технолог и оператор станка. Каждый из них относится к своему подразделению и имеет четко определенный перечень функций. Схематично управление процессом представлено на рис. 1.

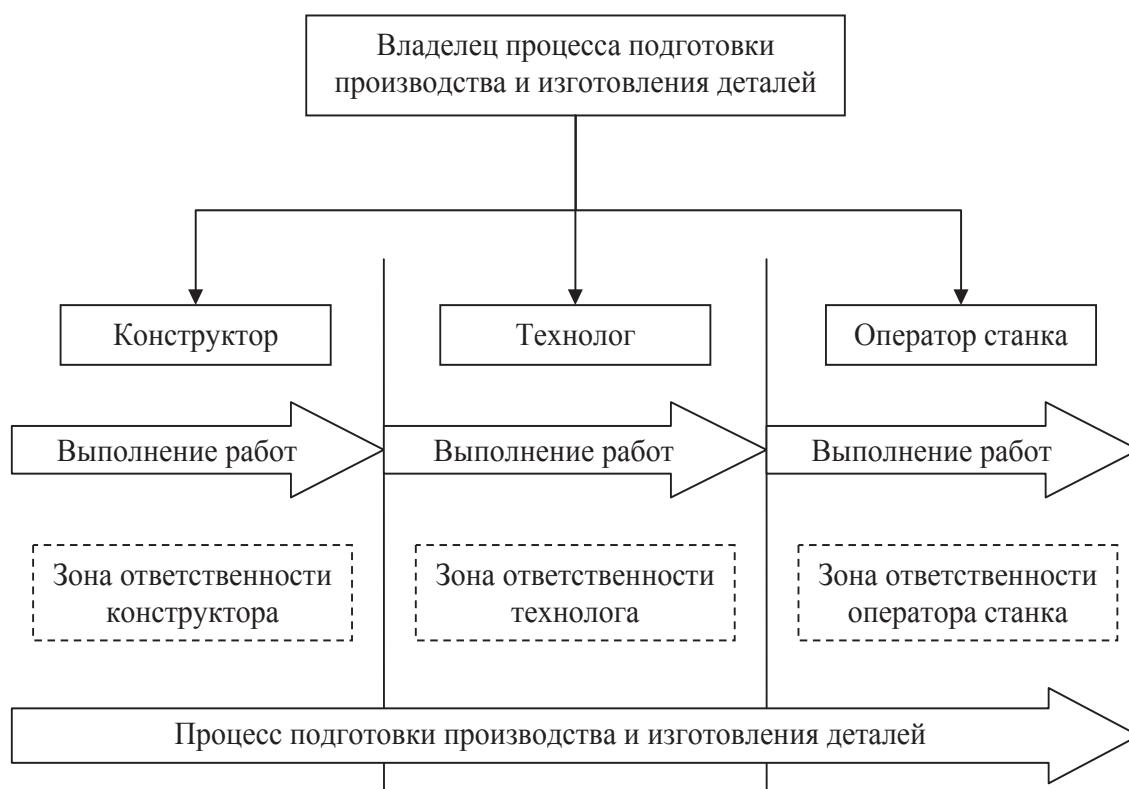


Рис. 1. Управление процессом подготовки производства и изготовления деталей

В каждом подразделении реализуются отдельные функции процесса, что в итоге приводит к получению результата на выходе – готовой детали. Владелец процесса контролирует работу каждого исполнителя. Данный контроль может быть реализован с помощью обратной связи.

### Управление процессом с помощью уровней зрелости

Управление теми или иными процессами организации подразумевает их совершенствование. Данная оптимизация позволяет сократить время выполнения процесса, а также повысить качество его результатов.

Для оценки эффективности и результативности процесса можно использовать уровни зрелости. Также зрелость помогает понять управляемость, контролируемость и определенность процесса. Чем выше уровень, тем деятельность более эффективна.

Выделяют следующие уровни зрелости процесса:

- нулевой, который характеризуется неопределенностью процесса, а также отсутствием какого-либо результата на выходе;

- первый, который характеризуется оценкой конкретной ситуации и выбором наиболее эффективных для нее методов управления;
- второй, который характеризуется достижением требуемых результатов в поставленные сроки, а также возможностью базового контроля и повторения процесса;
- третий, который характеризуется структурированностью, прозрачностью и стандартизацией процесса, что гарантирует качество результата;
- четвертый, который характеризуется возможностью количественного измерения показателей процесса с целью анализа полученной информации;
- пятый, который характеризуется наличием обратной связи, позволяющей контролировать достижение целей процесса и тем самым совершенствовать его выполнение.

Каждый уровень зрелости является фундаментом для последующего, поэтому оптимальными считаются последовательные шаги от одного уровня к следующему без каких-либо пропусков. При переходе на более высокий уровень результаты процесса становятся более точными, что достигается благодаря улучшению контроля и введением количественных показателей.

Теперь можно отметить особенности уровней зрелости для рассматриваемого процесса подготовки производства и изготовления деталей.

На *первом* уровне зрелости предприятие не может обеспечить постоянный процесс, в результате чего каждая новая деталь разрабатывается заново. Результат зачастую зависит от компетенции исполнителей процесса: конструктора, технолога и оператора станка. Если кто-то из них уходит, то все накопленные знания исчезают. Поиск решений проблем организуется только после возникновения последних. Также для этого уровня характерны высокие расходы на управление оборудованием, а также высокие риски обеспечения качества продукции.

На *втором* уровне появилась возможность использования ранее созданного процесса, что подходит для крупносерийного и массового производства. Разработка документации на новую деталь может происходить не «с нуля», а с помощью доработки уже существующей. Также на данном этапе может быть сформирован план выполнения процесса с заранее определенными сроками его завершения. Затраты снижаются на основе повышения эффективности процесса по сравнению с предыдущим уровнем.

На *третьем* уровне разрабатывается типовой процесс, который описывает все работы, проводимые каждым функциональным подразделением, благодаря чему можно говорить о получении гарантированного качества результата. Документируется как выполнение отдельных работ процесса, так и передача промежуточных результатов от одного исполнителя к другому.

На *четвертом* уровне введение количественного измерения показателей позволяет сформировать некоторые пределы, в рамках которых протекает процесс. Любое отклонение, выходящее за эти пределы, должно быть рассмотрено и устранено. Именно поэтому на данном этапе большое внимание уделяется профилактическим мерам по устранению внештатных ситуаций, которые могут быть связаны как с работоспособностью станка, так и с действиями самих исполнителей (например, ошибки в чертеже, технологическом маршруте, управляющей программе). В результате на отклонение любого показателя от нормы происходит быстрая и предсказуемая реакция. Затраты снижаются на основе лучшего использования знаний и опыта по работе с оборудованием.

На *пятом* уровне организуется эффективная совместная работа как среди отдельных исполнителей (конструктор, технолог, оператор станка), так и на уровне отделов. Наличие обратной связи между владельцем и участниками процесса позволяет оперативно находить и решать возникающие проблемы. Постоянно происходит совершенствование процесса как с помощью внутренних ресурсов, так и с помощью внешних. Все расходы прозрачны и находятся под полным контролем, затраты снижаются на основе тесного сотрудничества всех участников деятельности.

Благодаря описанию уровней зрелости, руководство предприятия сможет оценить текущий уровень выполняемого процесса и сформировать действия по его совершенствованию. Начиная со второго уровня, имеется возможность внедрения автоматизированных средств, которые могут облегчить выполнение тех или иных действий, что благоприятно скажется как на сокращении времени, так и на улучшении качества выполняемого процесса.



## Выводы

Использование процессной структуры управления позволяет разрушить барьеры между функциональными подразделениями, участвующими в процессе. Возникновение более тесного взаимодействия между исполнителями позволяет повысить эффективность деятельности персонала.

Применение уровней зрелости позволяет понять, на каком этапе находится тот или иной процесс, а также понять, что необходимо предпринять для его совершенствования. На высоких уровнях повышается эффективность процесса, что достигается благодаря сокращению времени его выполнения и благодаря улучшению качества получаемых результатов.

Таким образом, руководство предприятия, получая всю необходимую информацию по процессу, может сравнивать его состояние с тем, что происходит в других организациях. При достижении наивысшего уровня планируются и выполняются действия по оптимизации процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лялин, А. М. Теория менеджмента: учеб. для вузов. Стандарт 3-го поколения / А. М. Лялин. – СПб.: Питер, 2009. – 464 с.
2. Ташкинов, А. Г. Теоретико-методические основы процессного подхода к управлению на промышленном предприятии / А. Г. Ташкинов // Вестник Пермского университета. Экономика. – 2014. – № 2. – С. 77-86.

**Михалькова Л. А., Щетинин В. С.**  
**L. A. Mikhal'kova, V. S. Shchetinin**

**КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТРУБОПРОВОДОВ  
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР**

**COMPENSATION OF PIPELINE TEMPERATURE DEFORMATIONS UNDER  
THE CONDITIONS OF THE HIGH TEMPERATURE GRADIENT**

**Михалькова Людмила Андреевна** – студентка группы 4ОНб-1 Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: luda-mikhalkova@mail.ru.

**Ms. Ludmila A. Mikhal'kova** – student of 4EO-1, Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: luda-mikhalkova@mail.ru.

**Щетинин Владимир Сергеевич** – доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: schetynin@mail.ru.

**Mr. Vladimir S. Shchetinin** – Doctor of Engineering, professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: schetynin@mail.ru.

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию способов компенсации изменения длины трубопроводов под воздействием высокого градиента температур окружающей среды в климатических условиях северных территорий России. Был выполнен анализ различных вариантов решения поставленной задачи, изучены конструкции существующих компенсаторов температурных деформаций, а также рассмотрены материалы, из которых изготовлены данные компенсаторы. В данной статье определены технические задачи и намечены пути дальнейшего исследования в этой области.

**Summary.** The article investigates ways to compensate the elongation or shortening of pipelines under high ambient temperature gradient in the climatic conditions of the Russian northern territories. Analysis of different options to solve this problem was carried on; the structure of existing compensators of temperature deformation was investigated, the materials used for making these compensators were reviewed. Technical problems and ways of further research in this area were identified in this paper.

**Ключевые слова:** компенсация температурных деформаций, деформации трубопроводов, коэффициент температурного расширения, трубопроводы нефтегазовой отрасли.

**Key words:** temperature compensation deformation, deformation of pipelines, thermal expansion coefficient, oil and gas pipelines.

УДК 622.692.4

Жизнь современного человека невозможно представить без топливных ресурсов, которые обеспечивают энергией не только промышленность любой страны мира, но также являются неотъемлемой частью всех сфер жизни общества. Важнейшей частью топливно-энергетического комплекса России являются нефтяной и газовый секторы.

Современное развитие нефтегазовой отрасли происходит на Северных территориях (в Арктике и Западной Сибири). И это не случайно: именно эти территории очень богаты нефтью и газом.

Поиск, добыча и транспортировка этих ценных природных ресурсов осложняется климатом с большой разницей температур, которая летом может достигать +60°, а зимой – до -71° [1]. При таком высоком градиенте температур (100 – 150 °С) и коэффициенте линейного теплового расширения 0,012 мм/(м·°С) [2] 100 м трубопровода из нержавеющей стали могут изменить свой размер на 120 мм. Такое расширение трубопровода обуславливает применение компенсаторов линейных деформаций.

Для более широкого подхода в изучении данной задачи был выполнен анализ современного состояния вопроса, включающий патентные исследования.

На практике применяются различные конструкции компенсаторов температурных деформаций для цилиндрических трубопроводов, изготовляемых из сталей, чугунов, композиционных пластмасс, сплавов, полимеров, бетонов и керамики.

В частности, известна конструкция сифонного компенсатора сдвиговых и угловых перемещений (см. рис. 1) [3], относящаяся к области трубопроводного транспорта. Основным преимуществом данного изобретения является расширение арсенала технических средств. В то же время данный компенсатор имеет ряд значительных недостатков, таких как недостаточные прочность и надежность конструкции, высокая себестоимость, небольшой ассортимент используемых для их изготовления материалов, а также малый срок эксплуатации.

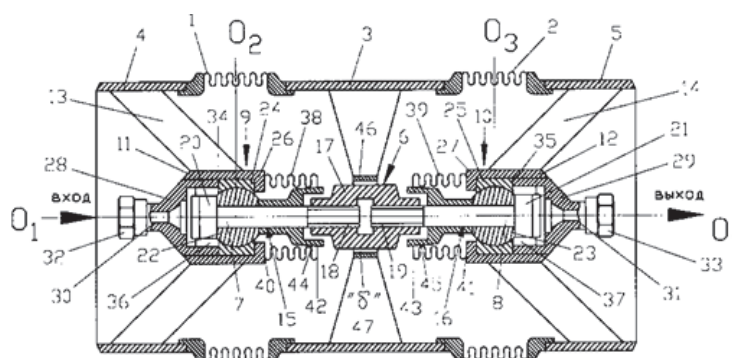


Рис. 1. Эскиз сифонного компенсатора сдвиговых и угловых перемещений

Известна также конструкция многослойного сифонного компенсатора (см. рис. 2) [4], применяемая в трубопроводных системах, транспортирующих высокоагрессивные среды. Это изобретение повышает надежность трубопровода, почти не требуя при этом дополнительного технического оборудования. Однако конструкция данного компенсатора обладает недостаточной прочностью и надежностью, высокой себестоимостью и малым сроком эксплуатации.

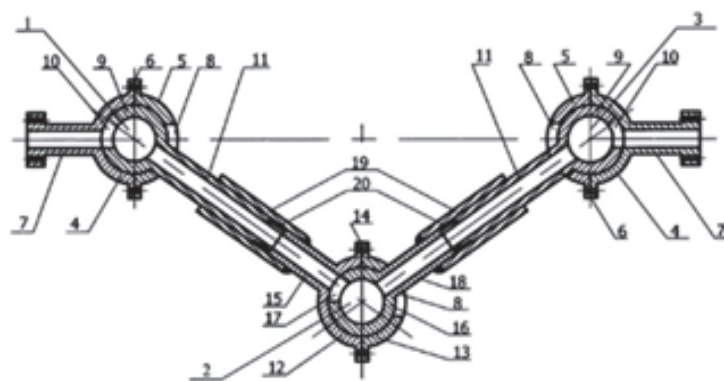


Рис. 2. Эскиз многослойного сифонного компенсатора

Также была рассмотрена конструкция компенсатора для трубопроводов (см. рис. 3) [5], применяемая для компенсации линейных и угловых перемещений участка трубопровода. Данное изобретение позволяет компенсировать большие линейные и угловые перемещения, возникающие в технологических линиях, а также может одновременно воспринимать большие гидростатические нагрузки и надежно работать при значительной частоте изменения компенсирующих размеров. Однако главным недостатком этого компенсатора является технологическая сложность их изготовления для больших диаметров.

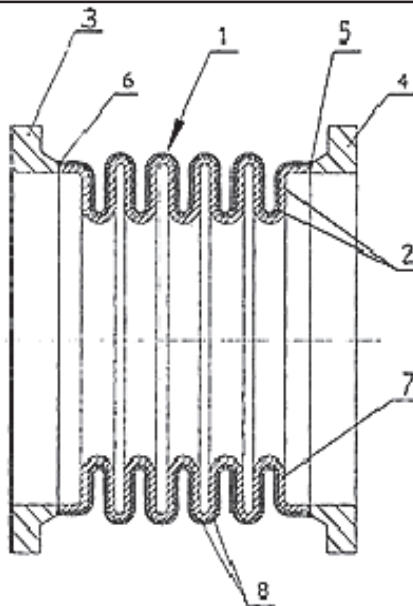


Рис. 3. Эскиз компенсатора для трубопроводов

Компенсация температурных деформаций является важной и актуальной задачей в России, так как нежелательным расширениям подвержены металлические трубопроводы, составляющие 90 % изготавливаемой на территории нашей страны трубной продукции. Из остальных же 10 % труб [6], изготовленных из других материалов, не подвержены удлинению лишь трубопроводы из стеклопластика, коэффициент линейного температурного расширения которого составляет  $9 - 12 (\cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$  [7]. Этот факт еще раз доказывает необходимость применения компенсаторов, чей ассортимент в настоящее время очень велик.

По конструктивным особенностям выделяют П-образные, линзовые, волнистые и сальниковые компенсаторы.

Широкое применение при надземной прокладке технологических трубопроводов независимо от их диаметра нашли П-образные компенсаторы. Их преимущество состоит в удобстве эксплуатации и простоте изготовления. Основными недостатками являются значительный расход материала, повышенное гидравлическое сопротивление, а также необходимость сооружения дополнительных опорных конструкций.

В трубопроводах с диаметром 100 – 1600 мм, транспортирующих неагрессивные и малоагрессивные вещества, когда давление не превышает 2,5 МПа, применяются линзовые компенсаторы. По сравнению с П-образными компенсаторами линзовые отличаются небольшими размерами и массой. Несмотря на это достоинство, у компенсаторов этого типа есть существенные недостатки, которые заключаются в небольших допускаемых давлениях, малой компенсирующей способности и больших распорных усилиях, передаваемых на неподвижные опоры.

При температуре в пределах от  $-70$  до  $+700$  °С и давлении до 6,3 МПа надежно работают волнистые компенсаторы. Эти компенсаторы имеют значительные преимущества по сравнению с П-образными: на 15 – 25 % меньший расход труб и тепловой изоляции, сравнительно малое гидравлическое сопротивление, а также относительно малое количество опор и опорных конструкций, поддерживающих трубопровод. Применение волнистых компенсаторов вместо линзовых расширяет диапазон допускаемых давлений, увеличивает компенсирующую способность, а также значительно уменьшает продольные усилия, передаваемые на неподвижные опоры.

В случае работы трубопровода диаметром 100 – 1000 мм при давлении до 1,6 МПа и температуре до 300 °С используют сальниковые компенсаторы, отличающиеся высокой компенсирующей способностью и небольшими размерами. Однако применение таких компенсаторов не допускается в трубопроводах горючих, токсичных и сжиженных газов из-за трудности герметизации саль-

никовых уплотнений. Также к основным недостаткам сальниковых компенсаторов относятся необходимость систематического наблюдения и ухода за ними в процессе эксплуатации, сравнительно быстрый износ сальниковой набивки и, как следствие, отсутствие надежной герметичности [8].

Изучив данный материал, можно сделать вывод, что наиболее приемлемыми компенсаторами, используемыми для нефтегазовых трубопроводов в районах с высоким градиентом температур, являются волнистые. Однако такие компенсаторы применяются при диаметрах труб до 400 мм [9], а изготовление компенсаторов для труб больших диаметров сопровождается технологическими трудностями. Данное обстоятельство обуславливает проведение дальнейших научных исследований для поиска эффективных технологий по изготовлению таких видов компенсаторов, а также проведения исследований по применению новых материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Экологический Центр «Экосистема». Физическая география России и СССР / А. С. Боголюбов [Электронный ресурс] [2001-2016]. – Режим доступа: <http://www.ecosystema.ru/08nature/world/geoussr/2-2-2.htm> (дата обращения 13.01.2017).
2. Thermalinfo.ru [Электронный ресурс]: Коэффициенты линейного расширения строительных материалов [2012-2017]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/strojmaterialy/koeffitientsienty-temperaturnogo-rasshireniyaktr-stroitelnyh-materialov> (дата обращения 08.02.2017).
3. Пат. 2249750 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> F 16 L 51/03. Сильфонный компенсатор сдвиговых и угловых перемещений / Исхаков Р. Г., Хангильдин Т. В., Вычеров А. Н., Полушин В. Г. – № 2002127297/06; заявл. 14.10.2002; опубл. 10.04.2005. Бюл. № 10. – 8 с.
4. Пат. 2272954 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> F 16L 51/02. Многослойный сильфонный компенсатор / Полушин В. Г., Семенов В. Н., Бобков В. И., Зыков М. И. – № 2002134729/06; заявл. 27.09.2004; опубл. 27.03.2006. Бюл. № 9. – 5 с.
5. Пат. 2265769 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> F 16 L 51/00. Компенсатор для трубопроводов / заявители Чавевский М. И., Бледнова Ж. М., Вотинов А. В., Стрелевский Д. А.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет». – № 2004128659/06; заявл. 27.09.2004; опубл. 10.12.2005. Бюл. № 34. – 5 с.
6. KLAG.RU. Строительный портал [Электронный ресурс] [2009 – 2014]. – Режим доступа: <http://www.klag.ru/analyst/detail.php?ID=15300> (дата обращения 09.02.2017).
7. ГОСТы, СНиПы, СанПиНы – Нормативные документы – Стандарты [Электронный ресурс]: Выбор материалов для окон // Ценообразование и сметное нормирование в строительстве. – 2009. – № 11. – Режим доступа: <http://base1.gostedu.ru/58/58443/> (дата обращения 09.02.2017).
8. Помощь по ГОСТам [Электронный ресурс]: Технологические трубопроводы нефтебаз. Государственный комитет Российской Федерации по высшему образованию: справ. издание / Земенков Ю. Д., Малюшин Н. А., Маркова Л. М., Лощинин А. Е. – Тюмень, 1994. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/technologicheskietruboprov.html> (дата обращения 09.02.2017).
9. ПромЭнергоСтрой. Инженерные системы: Компенсаторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://service-teplo.ru/?page\\_id=962](http://service-teplo.ru/?page_id=962) (дата обращения 09.02.2017).

**Ким В. А., Башков О. М., Гадоев Г. А.**  
**V. A. Kim, O. V. Bashkov, G. A. Gadoev**

**МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ**

**THE MORPHOLOGY OF THE SURFACE STRUCTURE DURING  
PULSED LASER PROCESSING OF STEELS AND CAST IRONS**

**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Mr. Vladimir A. Kim** – Doctor of Engineering, Professor, Materials Technology and New Materials Technology Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Башков Олег Викторович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ckr@knastu.ru.

**Mr. Oleg V. Bashkov** – Doctor of Engineering, Professor Head of Materials Technology and New Materials Technology Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ckr@knastu.ru.

**Гадоев Голибшо Айнуудинович** – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Республика Таджикистан, г. Душанбе). E-mail: ttu-2814@mail.ru.

**Mr. Golibsho A. Gadoev** – a post-graduate student, Materials Technology and New Materials Technology Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Tajikistan). E-mail: ttu-2814@mai.ru.

**Аннотация.** Выполнен сравнительный анализ поверхностного рельефа неравновесных структур, полученных лазерной обработкой сталей и чугунов в режиме оплавления и закалки из жидкофазного состояния. В основу классификации положены упорядоченность поверхностного рельефа, соотношение темных и светлых микроструктурных образований и степень их яркости. Числовая оценка цветовой сегментации серого оттенка является информативным показателем структурной организации материала в арсенале количественных показателей компьютерной металлографии.

**Summary.** A comparative analysis of the surface topography of non-equilibrium structures, obtained by laser treatment of steels and irons in the mode of melting and quenching from a liquid phase state was carried on. The classification is based on the regularity of the surface topography, the ratio of dark and light microstructuring formation and the degree of brightness. Numerical evaluation of color segmentation of the gray shade is an informative indicator of the structural organization of the material in the arsenal of quantitative indicators of computer metallography.

**Ключевые слова:** поверхностный рельеф, микроструктура, лазерная обработка, цветовая сегментация, конструкционная сталь, чугун.

**Key words:** surface topography, microstructure, laser processing, color segmentation, structural steel, cast iron.

УДК 621.375.826

**Введение**

Структурные превращения при лазерной обработке материалов протекают в неравновесных условиях, вызванных высокими температурами и их градиентами, скоростями нагрева и охлаждения. Неравновесные условия развития структур возникают в результате того, что возникающие

потоки энергии, тепла и массопереноса не в состоянии компенсировать поглощаемую обрабатываемым материалом энергию лазерного излучения. В результате в материале формируются особые пространственные диссипативные структуры, создание которых требует определенных энергетических затрат, а их функционирование приводит к образованию новых высокоэффективных каналов рассеивания энергии. Образующаяся при этом структура материала отличается развитостью внутренних границ раздела, высокой степенью самоорганизации, охватывающей все масштабные уровни. Такие структуры наиболее активно возникают в жидкофазных системах и продолжают развиваться после кристаллизации расплава [1; 2; 3; 4]. Структуры, сформированные в режиме жидкофазной закалки, отличаются более высокой неравновесностью, и они легче образуются при лазерной обработке материалов, подверженных полиморфным превращениям. Неравновесные структуры характеризуются высоким содержанием свободной энергии и обладают набором уникальных физико-механических и функциональных свойств. Поэтому лазерная обработка широко используется не только для упрочнения и модифицирования, а также как способ подготовки поверхностей для последующего нанесения на них различных функциональных покрытий.

Создание необходимой микрогеометрии поверхности лазерной обработкой представляет самостоятельную научно-практическую задачу. Известно, что повышенные триботехнические и эксплуатационные характеристики деталей машин и изделий обеспечиваются не только структурным состоянием поверхностных слоев, но и за счет микронеровностей определенного рельефа. Фактические контактные нагрузки, адсорбционные и маслоудерживающие свойства поверхностей трения главным образом определяются геометрическими характеристиками микрорельефа. Реакции отторжения организмом металлических имплантатов в значительной степени зависят от микрогеометрии их поверхностей, при этом существует оптимальный микрорельеф, на котором легче приживается живой биоматериал [5; 6].

В статье приведены результаты исследований морфологии поверхностей образцов из сталей и чугунов после импульсной лазерной обработки, выполненные с использованием количественных показателей, определяемых методами компьютерной обработки изображений.

### Методика исследования

Исследовались образцы из армко-железа, быстрорежущей стали Р6М5К5, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧ35. Выбранные материалы охватывали широкий диапазон варьирования механических, теплофизических и химических свойств, которые в совокупности обеспечивали разные условия взаимодействия с лазерным излучением, развития структур и морфологии поверхностей. Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 1. Обработка осуществлялась технологическим импульсным лазером LRS-300 с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм.

Таблица 1

Химический состав исследуемых материалов

Материал	C	Si	Mn	W	Mo	Cr	Ni	Co	S	P
Р6М5К5	0,86	0,5	0,5	6,2	4,9	4,2	0,4	5,1	0,03	0,025
Армко-железо	0,004	0,05	0,04	–	0,01	0,038	0,06	–	0,005	0,005
12Х18Н10Т	0,12	0,8	2,0	–	–	18,2	10,9	–	0,002	0,005
ВЧ35	3,42	2,02	0,34	–	–	–	0,67	0,04	0,02	0,05

Микроструктура поверхностного слоя после лазерной обработки исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа HITACHI S3400n.

Для количественного анализа состояния поверхностного слоя после лазерной обработки использовалась программа обработки изображений микроструктур Image.Pro.Plus.5.1. Для этого с изображения поверхности снималась контрастная маска, а само изображение представлялось в ви-

де диаграммы яркости. Далее производились вычисления площадей темных и светлых объектов, диапазона изменения и медианы распределения диаграммы яркости изображения.

### Результаты исследования и их анализ

Лазерная обработка поверхностей сопровождается изменением ее рельефа. Наиболее сильные изменения имеют место при оплавлении поверхностного слоя. Между микрогеометрией поверхности и ее структурной организацией имеется тесная взаимосвязь, поэтому развитие поверхностного рельефа необходимо рассматривать как единый процесс структурообразования. Структурные превращения при лазерной обработке в оплавленном слое определяются характером кристаллизации, который зависит от температурного фона, теплофизических свойств материала и активности энергетических и массовых потоков.

Рассмотрим возможные варианты структурных превращений при высокоскоростной кристаллизации металлического расплава при разных температурах перегрева. При температуре кипения в ванне расплава создаются турбулентные вихревые потоки. С понижением температуры турбулентность массовых потоков переходит в ламинарный режим, а затем – в жидкофазный диффузионный массоперенос.

Структура твердого тела, полученная кристаллизацией, определяется активностью образования центров кристаллизации и скоростью роста кристаллов. В зависимости от температуры перегрева скорость образования центров кристаллизации и скорость роста кристаллов носят экстремальный характер, а их диапазоны распределения и моды смещены по температурной шкале [2]. С повышением температуры перегрева величина температурного смещения максимумов возрастает. Следовательно, при кристаллизации оплавленного слоя, находящегося при температуре кипения, влияние фактора скорости образования центров кристаллизации на структурообразование преобладает над фактором роста кристаллов. Турбулентные массовые потоки в жидкофазной системе вносят хаос в характер объемного распределения образующихся центров кристаллизации. Неоднородное распределение температуры на пятне лазерного воздействия приводит к выбросам расплавленного и кипящего металла в микролокальных зонах, которые отражаются на характере поверхностного рельефа.

На рис. 1 – 3 представлены изображения поверхностей образцов из исследуемых металлических материалов, обработанных лазерным излучением с различной удельной энергией. Типичная морфология поверхности, сформированная из расплава, охваченного турбулентными массовыми потоками и неоднородным распределением температуры (см. рис. 1).

а)



б)

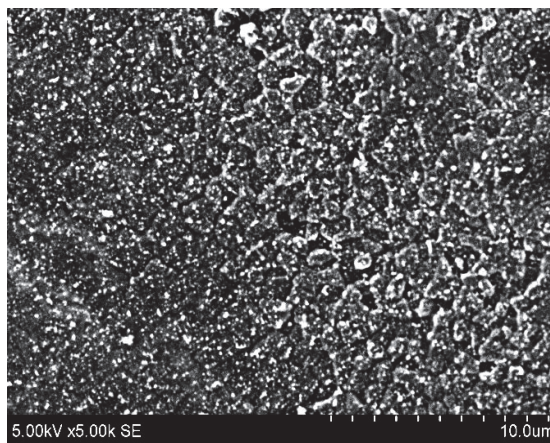


Рис. 1. Поверхности железа-армко (а) и быстрорежущей стали Р6М6К5 (б) на пятне лазерного воздействия, сформированные из оплавленного слоя с турбулентными массовыми потоками

Железо-армко обладает более высокой жидкотекучестью по сравнению с расплавленной быстрорежущей сталью, поэтому на ее поверхности видны следы каплеобразования и их выброса

при кипении. На отдельных участках присутствуют мелкие столбчатые дендриты, подтверждающие высокую скорость образования центров кристаллизации.

На поверхности образца из Р6М5К5 также присутствуют мелкие столбчатые дендриты, объединенные в колонии в виде замкнутых цепочек неправильной формы. Форма замкнутых цепочек наследственно копирует турбулентность массовых потоков в кипящем расплаве. В целом для поверхностей, сформированных из расплава с активными турбулентными потоками, характерно наличие упорядоченности на наномасштабном уровне и их нарушение на микроуровне.

При температуре расплава ниже точки кипения в жидкофазной среде могут возникать ламинарные массовые потоки, ориентированные по направлению градиентов температур. Процесс кристаллизации в этом случае реализуется при высоких температурах перегрева со всеми вытекающими из этого последствиями. В результате образуются дендриты первого порядка. Ориентация таких дендритов определяется главным образом направлением градиентов температур. При этом первичные зародыши кристаллов образуются в низкотемпературной области, а сам кристалл растет в направлении, противоположном градиенту температуры. В центральной области пятна лазерного воздействия на дендриты первого порядка ориентированы перпендикулярно поверхности. При этом сами дендриты представляют плотно упакованные столбчатые кристаллы, а их вершины образуют узор, подобный брусчатке (см. рис. 2, а – б). Соотношение скоростей образования центров кристаллизации и роста кристаллов определяет диаметральные размеры дендритов.

На периферии пятна лазерного воздействия на градиенты температур имеют радиальное направление. В этом же направлении ориентируются образующиеся дендриты. На рис. 2, в показан участок, состоящий из таких дендритов, оси которых располагаются на поверхности.

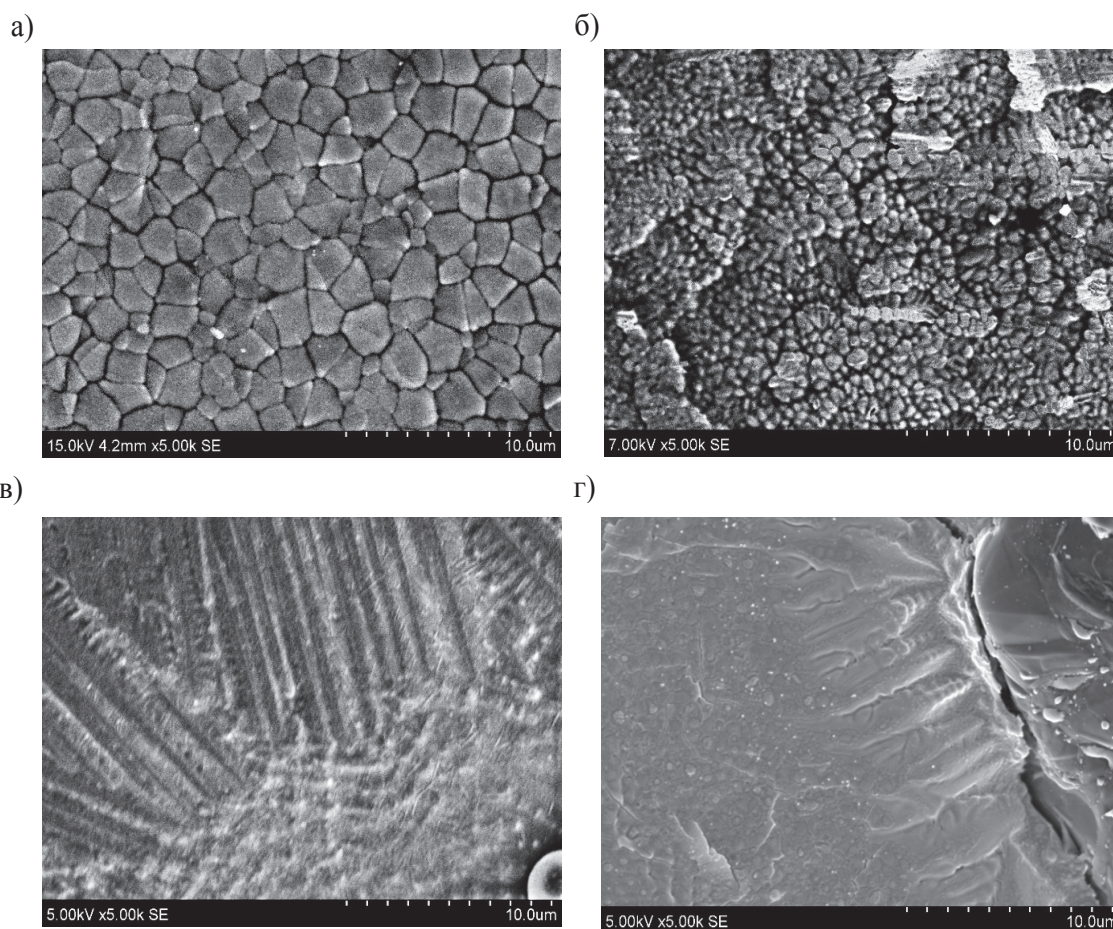


Рис. 2. Дендриты первого порядка, ориентированные по направлению теплового потока:  
а – нержавеющая сталь; б – быстрорежущая сталь; в – высокопрочный чугуун;  
г – высокопрочный чугуун вблизи частицы шаровидного графита

Наличие микролокальных тепловых стоков может активно влиять на ориентацию дендритов. На рис. 2, *г* показана поверхность ковкого чугуна после импульсной лазерной обработки, в структуре которого присутствует шаровидный графит. В расплавленной матрице они играют роль тепловых стоков, и вокруг них формируются колонии из дендритов, ориентированных перпендикулярно поверхности шаровидного графита.

В поверхностных зонах с более низкой температурой перегрева могут развиваться дендриты второго и более высоких порядков. Образование таких дендритов происходит, когда фактор скорости роста кристаллов превалирует над фактором скорости образования центров кристаллизации. На рис. 3 приведены различные виды дендритов высоких порядков. Ориентация основного осевого дендрита определяется направлением градиента температуры или теплового потока. Для железа-армко (см. рис. 3, *а*) отростки дендритов второго порядка имеют диаметральные размеры, близкие к основному осевому дендриту. Это означает, что рост дендритов второго порядка начинается сразу после образования дендрита первого порядка, который сам становится активным тепловым стоком. Такая закономерность сохраняется при развитии дендритов более высоких порядков.

Дендриты высоких порядков, образующиеся в структуре нержавеющей стали, показаны на рис. 3, *б*. Низкий температурный интервал между ликвидусом и солидусом приводит к высокой скорости роста кристаллов, поэтому образующиеся дендриты высоких порядков в поперечном сечении образуют фигуры листообразной формы.

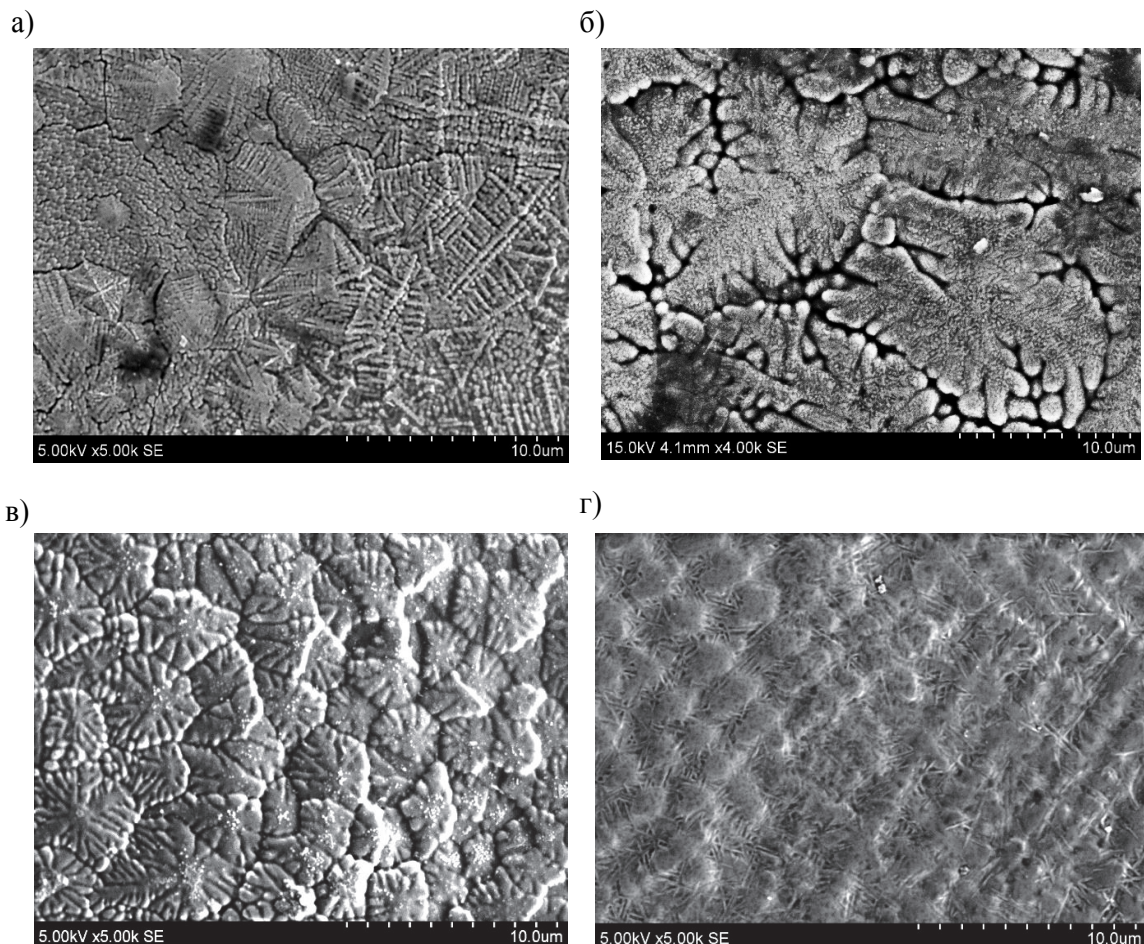


Рис. 3. Дендриты второго порядка: а – железо-армко; б – нержавеющая сталь; в – быстрорежущая сталь; г – высокопрочный чугун

Образование дендритов высоких порядков при лазерной обработке быстрорежущей стали отличается тем, что их развитие ограничивается отростками дендритов второго порядка, которые начинают образовываться после того, как осевой дендрит достигнет определенного сечения. Относительно высокая скорость образования центров кристаллизации обеспечивается присутствием в жидкофазной матрице тугоплавких карбидов вольфрама и других металлов, поэтому дендриты достигают небольших сечений (см. рис. 3, в).

Дендриты высоких порядков в структуре ковкого чугуна имеют сечения значительно меньшие по сравнению с осевым фрагментом (см. рис. 3, г). Это означает, что осевой фрагмент становится активным тепловым стоком только после достижения определенного размера, и только когда образующиеся тепловые потоки инициируют развитие дендритов второго и более высоких порядков.

После кристаллизации процесс структурообразования продолжается, но уже реализуется в твердофазной среде. Наиболее выражено эти процессы проявляются, если материал подвержен полиморфным превращениям или рекристаллизации. Высокие внутренние напряжения, возникающие при кристаллизации, релаксируются через пластическую деформацию. В результате на поверхности образуется регулярный рельеф в виде волнистых складок и пересечений двойниковых границ. Такие образования наглядно представлены на рис. 4.

а)



б)



Рис. 4. Поверхность после лазерной обработки и твердофазных структурных превращений:  
а – железо-армко; б – быстрорежущая сталь

Важным элементом структурной организации поверхностного слоя являются межзеренные границы, которые являются, с одной стороны, барьерами для скользящих дислокаций, а с другой – каналами активной диффузионной проводимости. На границах чаще всего образуются концентраторы напряжений, вокруг которых аккумулируется внутренняя энергия и высока вероятность образования адгезионных связей при контактном взаимодействии и осаждении на них износостойких и функциональных покрытий.

Рельеф поверхностного слоя формируется таким образом, что центральная часть кристаллита становится более выпуклой по сравнению с ее периферией. Границы кристаллитов принимают более темный оттенок не только из-за особенностей их геометрического строения, но и в результате менее активной эмиссии вторичных электронов. Исходя из этого, в качестве комплексных количественных показателей морфологии поверхности можно использовать относительную площадь темных участков на изображении, полученном на растровом электронном микроскопе, и отношение медианы к диапазону рассеивания, определяемые по диаграмме распределения яркости. Значения указанных показателей приведены в табл. 2

Количественные показатели изображений поверхностей после лазерной обработки

Тип структуры	Относительная площадь темных объектов	Относительная яркость
Структура после кристаллизации турбулентного слоя	0,691...0,825	0,624...0,989
Дендриты первого прядка в поперечном сечении	0,632...0,659	0,150...0,944
Дендриты первого порядка в продольном сечении	0,562...0,774	0,909...1,031
Дендриты высоких порядков в поперечном сечении	0,547...0,614	0,547...0,657
Дендриты первого порядка в поперечном сечении после твердофазных структурных превращений	0,522...0,431	0,485...0,626

На основании представленных в табл. 2 значений можно сделать заключение, что чем выше относительная площадь темных объектов в структурной организации поверхностного слоя, тем активнее каналы диффузионной проводимости и выше адгезионное сцепление покрытия, наносимое на эту поверхность [5, 9]. Наиболее благоприятной структурой в этом отношении являются дендриты первого порядка независимо от их ориентации. При нанесении поверхностных покрытий методом КИБ первичные островки осаждаемых карбидов и нитридов металлов образуются на границах зерен и в зонах с повышенной величиной химического потенциала [5]. Поэтому, если подготовку поверхностей для осаждения ионно-вакуумных покрытий осуществлять лазерной обработкой, то наиболее высокая сцепляемость покрытия с основой может быть обеспечена на режимах излучения, вызывающих плавление поверхности с активными турбулентными массовыми потоками.

#### **Заключение**

Рельеф поверхностей, обработанных лазерным излучением, несет важную информацию о ее структурной организации. В зависимости от энергии лазерного воздействия и теплофизических свойств обрабатываемого материала различают пять морфологических типов поверхностей:

- 1) рельеф, сформированный при кристаллизации жидкофазного материала с турбулентными массовыми потоками;
- 2) рельеф, состоящий из дендритов первого порядка, ориентированных перпендикулярно поверхности;
- 3) рельеф, состоящий из дендритов первого порядка, ориентированных вдоль поверхности;
- 4) рельеф, состоящий из дендритов высоких порядков разной ориентации;
- 5) рельеф, сформированный в результате твердофазных структурных превращений.

Каждый морфологический тип можно количественно оценить набором показателей, определяемых обработкой РЭМ-изображений с помощью специальной компьютерной программы. Предлагаемые показатели позволяют прогнозировать потенциальные свойства поверхностей при нанесении на них защитных и функциональных покрытий, а также раскрывают их эксплуатационные свойства при работе в триботехнических условиях.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров, В. И. Конов, И. Урсу, И. Н. Михэилеску. – М.: Наука, 1988. – 538 с.
2. Григорьянц, А. Г. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – М.: Высш. шк., 1987. – 191 с.



3. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
4. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь [и др.]; отв. ред. В. Е. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
5. Быковский, Ю. А. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов / Ю. А. Быковский, В. Н. Неволин, В. Ю. Фоминский. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
6. Чихос, Ч. Системный анализ в трибонике / Ч. Чихос; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 352 с.
7. Ким, В. А. Цветовая сегментация изображения микроструктуры как элемент компьютерной металлографии / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – № III-1(23). – С. 46-53.
8. Лазерное упрочнение железа-армко / В. А. Ким, Э. А. Дмитриев, М. С. Кочетков, С. Е. Матвеев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – № IV-1(24). – С. 74-81.
9. Мерер, Х. Диффузия в твердых телах / Х. Мерер. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 536 с.

**Ким К. К., Спичкин Г. Л., Иванов С. Н.**  
**K. K. Kim, G. L. Spichkin, S. N. Ivanov**

## **МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ**

## **MATERIAL PROPERTY MODIFICATION UNDER THE LOW-TEMPERATURE PLASMA INFLUENCE**

**Ким Константин Константинович** – член-корреспондент АЭН РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Mr. Konstantin K. Kim** – member of Russian Academy of electrical engineering, Dr. Sc. (Eng), professor, Head of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Спичкин Георгий Леонидович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 9. E-mail: speechkin@inbox.ru.

**Mr. George L. Speechkin** – Dr. Sc. (Eng), leading researcher, Theoretical Foundations of Electrical Engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: speechkin@inbox.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681021, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Sergey N. Ivanov** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681021, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av., 27. E-mail: kem@knastu.ru.

**Аннотация.** Модификация свойств металлов, полимеров и других материалов при воздействии низкотемпературной плазмы представляет технологический процесс, обеспечивающий прогнозируемое изменение их эксплуатационных характеристик. Перспективность процессов плазменной обработки обусловлена возможностью активизации частиц основного материала или примесей. В зависимости от свойств модифицируемого материала активатором является ток (смещения для диэлектриков, проводимости для проводников). Особый случай представляют полупроводниковые пленки, поскольку при этом возникает необходимость учета их толщины. Скорость и эффективность рассматриваемых процессов определяется величиной энергии в каналах концентрации разнотипно (например, диссоциации или ионизации) химически активных частиц. Полученные оценки показывают, что напряженность электрического поля является базовой характеристикой и должна соответствовать минимальному порогу формирования однородного разряда. Существенное влияние на локальные процессы протекания разряда в нормальных условиях оказывают реакции отрыва, в некоторых случаях весьма значительно снижающие потери электронов. Основными проблемами технической реализации рассматриваемого процесса являются нейтрализация активных относительно долгоживущих продуктов плазмохимических реакций и обеспечение требований электромагнитной совместимости.

**Summary.** Property modification of the metals, polymers and other materials when exposed to low temperature plasma is a technological process that provides a predictable change in their performance. The prospect of the processes of plasma treatment is due to the possibility of particle activation of the basic material or impurities. Depending on the properties of the material being modified, the activator is the current (bias for dielectrics, conductivity for conductors). A special case is the semiconductor film, as there is the necessity of considering their thickness. The speed and efficiency of these processes are determined by the amount of energy in the channels of the different reactive particle concentration (e.g., dissociation or ionization). The estimates show that the electric field strength is the basic characteristic and must meet a minimum threshold of homogeneous discharge formation. Separation reac-

tions have significant impact on local processes of the discharge in normal conditions, in some cases, very significantly reducing the loss of electrons. Main problems of technical realization of this process is the neutralization of relatively long-lived active products of plasma chemical reactions and ensure the requirements of electromagnetic compatibility.

**Ключевые слова:** объемный газовый разряд, низкотемпературная газоразрядная плазма, газоразрядный реактор.

**Key words:** space gas charge, low temperature plasma, gas-discharge generator.

УДК 533.9

## Введение

В статье представлена информация о возможности модификации свойств материалов (металлов, полимеров и других) воздействием низкотемпературной плазмы, применяемой для изменения эксплуатационных характеристик, особенностью которой является меньшее значение средней энергии электронов относительно основного потенциала ионизированного атома. Описываются результаты исследования на установке для ее формирования в больших активных объемах, приводятся параметры и трудности, которые могут возникнуть при создании и эксплуатации таких установок. Даются сведения о механизме формирования однородного объемного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Рассмотрены примеры возможного применения газового разряда – низкотемпературной плазмы – для управляемого синтеза структуры (поверхностной и объемной) обрабатываемого объекта.

**Постановка задачи получения низкотемпературной газоразрядной плазмы в воздухе при нормальном атмосферном давлении.** Технологически обработка поверхностных слоев модифицируемых материалов в газоразрядном реакторе с целью субоптимальной оптимизации их структуры является весьма эффективной, так как в низкотемпературном газовом разряде имеет место интенсивная генерация не только электронов или ионов, но и активных атомных частиц и радикалов, которые получают дополнительную возможность для вступления в поверхностную реакцию с молекулами примесей или основного материала. Более того, частицы поверхности попадают под действие ультрафиолетового (УФ) и длинноволнового (иначе мягкого) рентгеновского излучений, генерируемых в отрицательно поляризованном (катодном) слое разряда.

В плазменном реакторе – основном элементе, входящем в состав установки для модификации поверхностей, могут использоваться различные типы разрядов, но из всех возможных только объемный разряд способен обеспечить высокую степень однородности воздействия на модифицируемую поверхность материала. В воздушной среде при атмосферном давлении создание однородного самостоятельного разряда затрудняется процессами развития нескольких видов неустойчивостей (например, ионизационной или так называемой прилипательной) [1], для компенсации которых используется емкостная стабилизация. Эффективным средством являются диэлектрические барьеры, покрывающие электроды, через которые ток смещения в разрядном промежутке шунтирует ток носителей. Процесс имеет свойство саморегулирования, поскольку если в какой-нибудь зоне разрядного промежутка плотность тока увеличивается, то повышается и напряжение на емкости барьеров, что приводит к понижению напряженности электрического поля в столбе разряда, а следовательно, к уменьшению плотности тока.

Для повышения эффективности стабилизации разряда диэлектрическими барьерами необходимо использовать конструкции с низким значением удельной поверхностной емкости  $C_{уд}$ . Анализ литературных источников показывает, что структура разряда может рассматриваться как однородная, если порядок  $C_{уд}$  составляет величину единиц пФ/см<sup>2</sup> или менее, а относительная амплитуда импульсного напряжения, приложенного к разрядному промежутку, превышает базовое напряжение статического пробоя не менее чем вдвое. Температура газа в большинстве случаев не превышает 50...100 °С, а отношение температуры электронов к температуре газа составляет 60 – 100,

при этом следует учитывать, такой разряд низкотемпературной плазмы носит неравновесный характер [1].

При воздействии газового разряда основной ток замыкается и через модифицируемый материал. Очевидно, что если в качестве модифицируемого материала используется диэлектрик, то этот ток – ток смещения, а если проводник – ток проводимости. Если же модифицируемый материал представляет собой полупроводящую пленку, то задача изменения эксплуатационных характеристик существенно усложняется, поскольку возникает необходимость учета толщины пленки. В частном случае, если толщина значительно меньше разрядного зазора, то условия формирования разряда можно считать неизменными.

Импульсному объемному разряду емкостного типа, относящемуся к высоковольтным, свойственна повышенная напряженность электрического поля около поверхности модифицируемого материала, причем на саму поверхность активно воздействуют ионы и электроны со средней энергией от 2 до 5 эВ. Одновременно с этим модифицируемая поверхность обрабатываемого материала облучается квантами УФ и длинноволнового рентгеновского излучения, которые возникают при соударении активизированных электронов с поверхностью или атомами остаточного газа. При перечисленных условиях поверхность материала интенсивно модифицируется за счет ускорения взаимодействия с плазмой.

Скорость и степень воздействия определяющих факторов плазмохимических реакций на молекулы модифицируемого материала в воздухе может быть обусловлена изменением количества энергии, накопленной в аккумулирующих элементах источника электропитания высокого напряжения и поступающей в каналы образования химически активных частиц вследствие ионизационных, диссоциативных и других процессов. С целью интенсификации плазмохимических реакций необходимо увеличивать частоту переменного напряжения, являющегося регулируемым параметром источника электропитания реактора газового разряда, или использовать импульсно-периодический режим, при этом необходимо обеспечить согласование частот протекания плазмохимических реакций и следования импульсов.

**Основы теории плазмохимических процессов, протекающих при модификации материала.** Процессы, которые протекают при модификации материала, можно условно разделить на три основных временных этапа [2 – 4]:

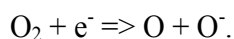
- 1) собственно газоразрядный этап с характерным временем порядка  $10^{-9} \dots 10^{-6}$  с;
- 2) атомно-молекулярный этап с характерным временем порядка  $10^{-6} \dots 10^{-5}$  с;
- 3) этап течения газа в реакторе, диффузии атомных и молекулярных частиц в потоке и «медленных» химических реакций с характерным временем порядка  $10^{-5} \dots 10^{-1}$  с.

При атмосферном давлении в воздухе главным источником электронов и положительных ионов в импульсном разряде является ионизация атомов (А) электронным ударом (ударная ионизация), которая описывается следующим уравнением:

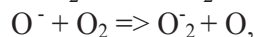
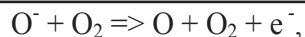


Характерное время ионизации  $t_i = 1 / (n K_i)$ , где  $n$  – концентрация молекул;  $K_i$  – константа скорости ионизации, в значительной степени зависит от напряженности электрического поля. Сделанные авторами предварительные оценки показывают, что для возникновения разрядных процессов в воздухе характерная напряженность электрического поля ориентировочно составляет  $E = 30$  кВ/см, при этом ожидаемое время ионизации составляет величину порядка 10 нс, а при напряженности  $E = 50$  кВ/см, соответствующей минимальному порогу формирования однородного разряда  $t_i$ , – порядка 1 нс.

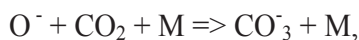
Следует отметить, что при атмосферном давлении отрицательные ионы появляются в большей мере в результате диссоциативного (декомпозиционного) прилипания



В сильных электрических полях главным образом регистрируются ионы  $O^-$ . В слабых полях они вступают как в реакции отрыва и перезарядки

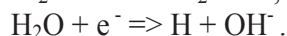
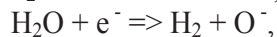
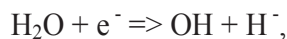


так и в другие реакции, в результате которых образуются ионы  $O_2^-$  и кластеры  $O_3^-$ ,  $CO_3^-$ :



где M – нейтральная молекула.

Повышенная влажность приводит к появлению ионов трех типов в результате реакций



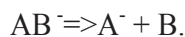
Аналогично характерному времени ионизации  $t_i$  вводится понятие характерного времени прилипания. Для напряженности поля, типичной для области столба объемного разряда, характерное время прилипания составляет величину порядка  $10^{-8}$  с.

Важным механизмом протекания разряда в нормальных условиях являются реакции отрыва, так как они частично компенсируют процесс прилипания, т.е. снижают потери электронов, причем в некоторых случаях весьма значительно. Константа отрыва ( $K_d$ ), опосредованно характеризующая реакцию  $O^- + M \Rightarrow O + M + e^-$ , находится в диапазоне  $10^{-12} \dots 10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с (характерное время отрыва –  $t_d = 10^{-8}$  с). Основным процессом рекомбинации электронов и положительных ионов обычно является диссоциативная рекомбинация  $AB^+ + e^- \Rightarrow A + B$ . Характерное время рекомбинации имеет порядок  $10^{-6}$  с, что соответствует уменьшению степени ионизации в два раза.

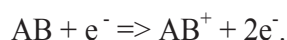
Одним из основных механизмов деградации ионных зарядов в низкотемпературной плазме в воздухе при атмосферном давлении является ион-ионная рекомбинация [3]. Для того чтобы произошла взаимная нейтрализация без участия молекул среды, ионам необходимо пролететь на определенном расстоянии, которое при нормальной температуре значительно меньше кулоновского радиуса. Другой сопряженный эффективный механизм рекомбинации – тройное столкновение, в результате которого ион теряет энергию при упругом столкновении с молекулой и перемещается ионом противоположного знака на эллиптическую орбиту. Примером такого механизма является реакция образования озона  $O^- + O_2^+ + M \Rightarrow O_3 + M$  с характерным временем рекомбинации менее  $10^{-6}$  с.

Таким образом, на этапе газового разряда протекают процессы с характерной длительностью  $10^{-6}$  с и менее с участием заряженных частиц  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O^-$ ,  $O_2^-$ ,  $O_3^-$ ,  $CO_3^-$ . В результате реакций с участием этих элементов появляются и активные нейтральные частицы O, N.

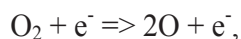
При значительных концентрациях электрически отрицательно заряженных молекул на поверхности модифицируемого материала важными становятся взаимодействия электронов с этими молекулами. Как правило, процессы, происходящие при низких энергиях электрона, сводятся к резонансному захвату электрона  $AB + e^- \Rightarrow AB^-$ . Этот ион может диссоциировать на нейтральный атом и отрицательный ион



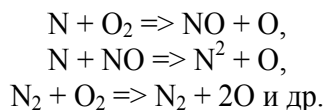
При высоких энергиях образование ионов может происходить в результате следующей реакции:



Как показали исследования кинетики химических реакций в воздушной среде, азот не является инертным разбавителем и активно участвует в плазмохимических реакциях [2], что, например, приводит к увеличению степени конверсии кислорода в озон. По одному из мнений, данный эффект возможно объясняется тем, что запасенная в молекулах кислорода энергия идет на их дополнительную диссоциацию. Наряду с основной для чистого кислорода реакцией



диссоциация возможна в реакциях



Характеристические времена вышеуказанных реакций находятся в диапазоне от 1 до 50 мкс. Атомарный кислород участвует в образовании озона согласно реакции  $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \Rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$  с характерным временем 3...8 мкс [2].

В присутствии озона монооксид азота NO в цепи реакций переходит в азотный ангидрид  $\text{N}_2\text{O}_5$ , поэтому основными продуктами атомно-молекулярных процессов в азотно-кислородных смесях считаются O,  $\text{O}_3$ , N,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ , которые могут вступать в реакции с молекулами органических соединений.

Вклад высокоскоростной вторичной (темновой) реакции озона с органическими молекулами ( $\text{O}_3 + \text{RH}$ ) в газоразрядном реакторе невелик ( $K = 10^{-17} \dots 10^{-23} \text{ см}^3/\text{с}$  в зависимости от типа RH). Значительно эффективнее реакции взаимодействия органических молекул с атомарным кислородом и радикалом OH, образующимся при взаимодействии молекул воды с возбужденным атомарным кислородом. Константа таких реакций –  $K = 10^{-11} \dots 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ . Сильнейший реагент – атомарный кислород – вступает в реакцию с органическими соединениями водорода, углерода и кислорода с отщеплением H в начале реакции.

В результате диссоциации органических молекул могут появляться радикалы (осколки) органических молекул. Наиболее вероятным механизмом такого процесса является удаление атома, например отрыв атома от алифатических или ароматических углеводородов или отщепление галогена серы или кислорода. Данный процесс может дать выход радикалам типа  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5$ ,  $\text{CCl}_3$ , OH. Однако отщеплен может быть и более чем один атом, например  $\text{CH}_4 \Rightarrow \text{CH}$ , или может быть разорван скелет молекулы, как при образовании радикалов  $\text{CH}$  и  $\text{CH}_2$  из алифатических углеводородов.

**Проблемы, возникающие при работе с низкотемпературной плазмой.** При работе с газоразрядными реакторами, работающими в среде атмосферного воздуха, часто возникает вопрос нейтрализации активных относительно долгоживущих продуктов плазмохимических реакций (озона, окислов азота и др.) с тем, чтобы не допустить попадание их в производственное помещение в количестве выше предельно допустимых концентраций (ПДК). Учитывая значительные размеры реактора, его принципиальную негерметичность и относительно низкие уровни ПДК по озону (не более 0,1 мг/м<sup>3</sup>) и окислам азота в смеси с озоном (не более 0,05 мг/м<sup>3</sup>), обеспечение санитарно-гигиенических требований становится чрезвычайно сложной технической задачей. Более того даже в случае использования мощной вытяжной вентиляции в зоне газоразрядного реактора вопрос нейтрализации агрессивных продуктов плазмохимических реакций при расходах вентиляционных потоков  $10^3 - 10^4 \text{ м}^3/\text{час}$  не достаточно эффективен.

Из-за значительных размеров реактора и использования знакопеременного высокочастотного высоковольтного напряжения газоразрядный реактор является источником интенсивных внешних электромагнитных полей, что недопустимо с позиции электромагнитной экологии. На практике данная проблема решается с помощью экранировки высоковольтных электродов дополнительным заземленным проводящим электродом или выбора специальной конструкции газоразрядного реактора. Кроме этого, при обработке материалов в условиях повышенной влажности их часть, находящаяся вне газоразрядного реактора, представляет опасность для технического персонала, поскольку может оказаться под высоким напряжением.

**Результаты технического применения низкотемпературной плазмы газоразрядного реактора с целью поверхностной обработки и модификации некоторых материалов.** Описание и характеристики установки для плазменной обработки материалов, ее функциональная схема и основные параметры блока газоразрядных реакторов приведены в [5].

На данной установке выполнена модификация отполированных пластинчатых подложек, изготовленных из поликристаллической окиси алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (поликора ТУ 6366-000-07593894-2013), находящей широкое применение в самых различных техпроцессах, в частности для после-



дующей металлизации и изготовления микросхем. Рабочая камера блока газоразрядного реактора имеет рабочий объем  $1 \text{ дм}^3$ , величина технологического зазора между барьерами обеспечивается величиной, равной 8 мм. На электроды камеры, заполненной воздухом (величина давления равна атмосферному), подается импульсное напряжение с амплитудой порядка 40 кВ при скорости нарастания напряжения около 1 кВ/нс. Импульсы следуют с частотой, соответствующей номинальной частоте питающего напряжения 50 Гц, длительность воздействия от 1 до 10 мин. Пластины после обработки помещаются для нанесения тонких пленок в вакуумную камеру промышленной установки типа УВН-74-ПЗ, где осуществляется нанесение покрытия Cr (0,1 мкм) – Cu (5,0 мкм) по стандартизованному технологическому процессу. Качество покрытия производится методом отрыва с использованием разрывной машины 2167 НПК «Техмаш» и сводится к исследованию адгезии нанесенных пленок к обработанным пластинам. По результатам испытаний величина адгезии составляет  $(140...150) \times 10^5 \text{ Па}$ , такая величина соответствует параметрам адгезии медных пленок к подложкам, изготовленным по существующим методикам, использующих процесс кипячения модифицируемого материала в перекисно-аммиачном растворе, и достаточна для практического использования медных пленок при реализации технологии изготовления микросхем.

Также установка использована для подготовки контактирующих площадок микросхем, предварительно покрытых слоем металлов Cr (0,1 мкм) – Cu (5 мкм) – Au (2 мкм) для последующей микросварки. Подготовленные микросхемы также размещаются в вакуумной камере апертурой  $1 \text{ дм}^3$  и величиной между барьерного зазора 8 мм. Камера заполняется воздухом при давлении  $10^5 \text{ Па}$ . На электроды камеры, как и в предыдущем случае, подается импульсное напряжение со следующими параметрами: амплитуда напряжения – 40 кВ, скорость возрастания – 1 кВ/нс. Кроме этого, частота чередования импульсов составляет 50 Гц, длительность воздействия – 10 мин. После обработки к контактирующей площадке привариваются дополнительные элементы прямоугольной формы из фольги (Au) толщиной 20 мкм, длиной 1 мм и шириной 0,5 мм. Для оценивания эффекта к контрольной микросхеме, не обработанной плазмой, привариваются такие же контактные полоски. Проверка качества сварки выполняется путем увеличения усилия отрыва контактных пластин из золота до их разрушения. По результатам испытаний установлено, что разрушение контактов необработанных перед сваркой в разряде пластин происходит путем отделения золотых пластин от контактных полосок. Анализ образцов, полученных в результате рассматриваемой обработки разрядом емкостного типа, показал, что разрушение контактов микросхем происходит уже в виде потери поперечной устойчивости дополнительных элементов. Всего была протестирована совокупная выборка из 10 микросхем.

Еще одной прикладной областью исследований на установке для модификации материалов является исследование влияния обработки плазмой на качество склейки деталей из фторсодержащего синтетического полимерного материала (фторопласта), широко используемого в настоящее время в самых различных отраслях промышленности. Известно, что не активированный фторопласт не склеивается. Для очистки и активации поверхностей детали из фторопласта помещаются в камеру газового разряда с увеличенным объемом до  $2 \text{ дм}^3$  и величиной между барьерного зазора, составляющей 15 мм. В камеру, так же, как и в предыдущих случаях, подается воздух при нормальном атмосферном давлении. Методика подачи на электроды камеры импульсного напряжения с повышенной до 50 кВ амплитудой, остальные параметры остаются прежними: скорость нарастания напряжения – 1 кВ/нс, частота следования импульсов – 50 Гц, длительность воздействия составляет 10 мин. Так как поверхность фторопласта высокоинертна, детали перед склеиванием обрабатываются активирующим составом, улучшающим адгезию с клеевыми композициями или вступающим с материалом непосредственно в химическое взаимодействие. Для активации контрольных образцов используется натрий-нафталиновый комплекс и традиционная технология обработки (ОСТ 4ГО.054.210-83). Склейка фторопласта производится с латунью, гальванизированной покрытием из никеля и олово/висмута с использованием клея ВТ-25-200 ОСТ 6-06-5100-96 на основе эпокси-кремнийорганической смолы и аминного отвердителя без наполнителя. После склейки и просушки в течение пяти часов проводится механическое испытание (на отрыв) модифицированных образцов на разрывной машине 2167. Результаты испытаний показали, что, хотя ориентиро-

вочный предел прочности клееного образца из фторопласта, полученного с использованием промышленного натрий-нафталинового комплекса, составляет  $30 \text{ кг/см}^2$  и превышает прочностные показатели образцов, обработанных импульсным объемным разрядом емкостного типа, на 15...17 % (предел прочности составляет приблизительно  $25 \text{ кг/см}^2$ ), предлагаемый метод обработки поверхности существенно проще и экономичнее.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Велихов, Е. Л. Физические явления в газоразрядной плазме / Е. Л. Велихов, А. С. Ковалев, А. Т. Рахимов. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
2. Никандров, Д. С. Низкочастотный барьерный разряд в таунсендском режиме / Д. С. Никандров, Л. Д. Цендин // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75(№ 10). – С. 29-38.
3. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 736 с.
4. Masuda, S. Pulse corona induced plasma chemical process: a horizon of new plasma chemical technologies / S. Masuda // Pure and Applied Chemistry. – 1988. – Vol. 60 (№ 5). – pp. 727-731.
5. Ким, К. К. Плазменная установка для повышения гидрофильности бумажных изделий / К. К. Ким, Г. Л. Спичкин, С. Н. Иванов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2017. – № I-1(29). – С. 66-71.



**Химухин С. Н., Гостищев В. В., Меднева А. В., Ри Хосен, Ри Э. Х.**  
**S. N. Khimukhin, V. V. Gostishchev, A. V. Medneva, Hosen Ri, E. H. Ri**

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ NiAl ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

### THE USE OF ALLOYS BASED ON NiAl TO GET HEAT-RESISTANT COATINGS

**Химухин Сергей Николаевич** – доктор технических наук, заведующий лабораторией «Конструкционные и инструментальные материалы» Института материаловедения ХИЦ ДВО РАН (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; 89242030609. E-mail: ximuxin@yandex.ru.

**Mr. Sergei N. Khimukhin** – Dr. of Engineering, Head of the Laboratory for Structural and Tooling Materials, Institute for Materials Technology, Khabarovsk Research Centre, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 153, Tikhookeanskaya Str.; Khabarovsk 680042; 89242030609. E-mail: ximuxin@yandex.ru.

**Гостищев Виктор Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Конструкционные и инструментальные материалы» Института материаловедения ХИЦ ДВО РАН (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; 89145450026. E-mail: V-gostishev@mail.ru.

**Mr. Victor V. Gostishchev** – PhD in Engineering, Senior Researcher, Laboratory for Structural and Tooling Materials, Institute for Materials Technology, Khabarovsk Research Centre, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 153, Tikhookeanskaya Str.; 680042 Khabarovsk; tel. 89145450026. E-mail: V-gostishev@mail.ru.

**Меднева Анастасия Витальевна** – инженер УНИР Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; 89141920709. E-mail: anasta-91@mail.ru.

**Ms. Anastasiya V. Medneva** – engineer, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel.: 89141920709. E-mail: anasta-91@mail.ru.

**Ри Хосен** – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; 89144048877. E-mail: ri@mail.khstu.ru.

**Mr. Ri Hosen** – Dr. of Engineering, Professor, Department of Foundry Engineering and Metal Technology, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel.: 89144048877. E-mail: ri@mail.khstu.ru.

**Ри Эрнст Хосенович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, г. Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; 89242024953. E-mail: erikri999@mail.ru.

**Mr. Ri Ernst Hosenovich** – Dr. of Engineering, Professor, Head of the Department of Foundry Engineering and Metal Technology, Pacific National University (Khabarovsk, Russia); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel.: 89144048877. E-mail: erikri999@mail.ru.

**Аннотация.** Исследовали жаростойкость образцов стали 30 с покрытиями, полученными методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Испытания на жаростойкость проводили в условиях нагрева и изотермической выдержки при температуре 900 °С. В качестве материала для покрытий использовались интерметаллидные сплавы на основе NiAl с добавками легирующих элементов (Cr, Mo, W), выплавленные методом металлотермии из оксидных систем. Эффективность формирования покрытий при ЭИЛ оценивали по коэффициенту массопереноса (K). Максимальный K достигается при использовании сплавов NiAl-Cr, что объясняется наличием по границам зерен основы (NiAl-Cr) повышенного содержания Cr (до масс.% 80) и хромсодержащих включений (до масс.% 93). Максимальной жаростойкостью обладали образцы стали с покрытиями, сформированными сложнелегированными интерметаллидными сплавами NiAl-Cr-Mo-W. После испытаний на жаростойкость вздутий и отслоений покрытий не обнаружено, что позволяет рекомендовать исследуемые составы для использования в качестве материалов для создания покрытий

методом ЭИЛ. Установлено, что повышение жаростойкости образцов стали 30 с покрытиями составляет от 8 до 10 раз.

**Summary.** Heat resistance of the samples from steel 30 with coatings obtained by electrospark deposition (ESD) was investigated. Tests on heat resistance were conducted under heating and isothermal exposure to the temperature of 900 °C. Intermetallic alloys, based on NiAl with additions of alloying elements (Cr, Mo, W) produced by the metallothermy method from oxide systems, were used as the coating materials. The efficiency of coating formation at the ESD was evaluated by the mass transfer coefficient (K). Its maximum was achieved by using NiAl-Cr alloys. This fact could be explained by the presence of Cr in high content (up to wt.% 80) and chromium-containing inclusions (up to wt.% 93) at the grain boundaries of the base (NiAl-Cr). The steel samples, having coatings made from complexly alloyed intermetallic alloys NiAl-Cr-Mo-W demonstrated maximum value of heat resistance. Neither heat blistering nor peeling of coatings were detected after the resistance tests. So the investigated compounds could be recommended to use as materials for producing coatings by ESD. It was found that heat resistance of the steel 30 samples with such coating increased 8-10 times.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, жаростойкость, никелиды алюминия.

**Key words:** electrospark deposition, heat resistance, aluminum nikelida.

УДК 669.017(076.5)

*Исследования проводились на оборудовании ЦКП «Прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «ТОГУ» При финансовой поддержке со стороны Минобрнауки РФ в рамках гос. задания (№ гос. рег. 114042440015).*

### **Введение**

В современном высокотехнологичном производстве широко используются функциональные покрытия на поверхности деталей из конструкционных и инструментальных материалов. Наряду с традиционными методами получения покрытий в последнее время широкое распространение получают методы, ранее не достаточно широко использовавшиеся, что обусловлено постоянным совершенствованием автоматизации, расширением спектра использования материалов и потребностями инновационного производства. Наиболее интенсивно наблюдается развитие технологий, основанных на использовании концентрированных потоков энергии (плазма, лазер, взрыв и др.). Одной из таких современных технологий формирования покрытий является электроискровое легирование (ЭИЛ) [1]. В основе технологии ЭИЛ лежит электроэрозионный процесс, возникающий между двумя электродами: катодом (деталь) и анодом (материал покрытия). В зависимости от разности потенциалов между электродами различают высоковольтный и низковольтный процесс. До настоящего времени механизм возникновения низковольтного процесса (до 70 В) не установлен и является предметом дальнейших исследований [2]. В литературе накоплен в основном экспериментальный материал, позволяющий получать покрытия с необходимыми свойствами. Метод ЭИЛ обладает рядом преимуществ, из которых наиболее существенными являются простота технологии и незначительный нагрев поверхности детали при формировании покрытия, что предотвращает термические деформации. При этом процесс структурообразования в покрытиях проходит фактически закалкой расплава из жидкого состояния, и вследствие этого структурные составляющие достигают наноструктурного размера. На процесс структурообразования и свойства покрытий влияние оказывает не только скорость охлаждения, но и состав, структура и свойства анодных материалов [3]. В литературных источниках приведены основные критерии отбора анодных материалов для ЭИЛ, хотя окончательные выводы о соответствии вновь созданных электродных материалов заданным критериям можно сделать только после проведения эксперимента. Большое количество публикаций в последнее время посвящено повышению жаропрочности и жаростойкости материалов, использующихся в газотурбинных установках и двигателях. В качестве жаростойких материалов используют сплавы на основе интерметаллидов, в том числе и алюминиды никеля (NiAl, Ni<sub>3</sub>Al). При этом более широкое применение имеют интерметаллиды Ni<sub>3</sub>Al. В

отличие от NiAl интерметаллиды Ni<sub>3</sub>Al обладают большей пластичностью, но при этом их жаростойкость ниже [4]. Поэтому актуальными являются исследования по получению жаростойких покрытий из сплавов на основе NiAl. При этом можно влиять на свойства анодных материалов, параметры процесса ЭИЛ и свойства формируемых покрытий [5], используя добавки легирующих металлов в интерметаллидный сплав. Таким образом, настоящие исследования направлены на получение жаростойких покрытий из интерметаллидных легированных сплавов.

### Материалы и методы исследования

Новые анодные материалы на основе алюминидов никеля (NiAl, NiAl-Mo, NiAl-Cr, NiAl-W, NiAl-Cr-Mo-W) были синтезированы методом металлотермии из оксидов [6]. Содержание легирующих элементов в сплавах приведено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание легирующих элементов в сплавах и коэффициент массопереноса

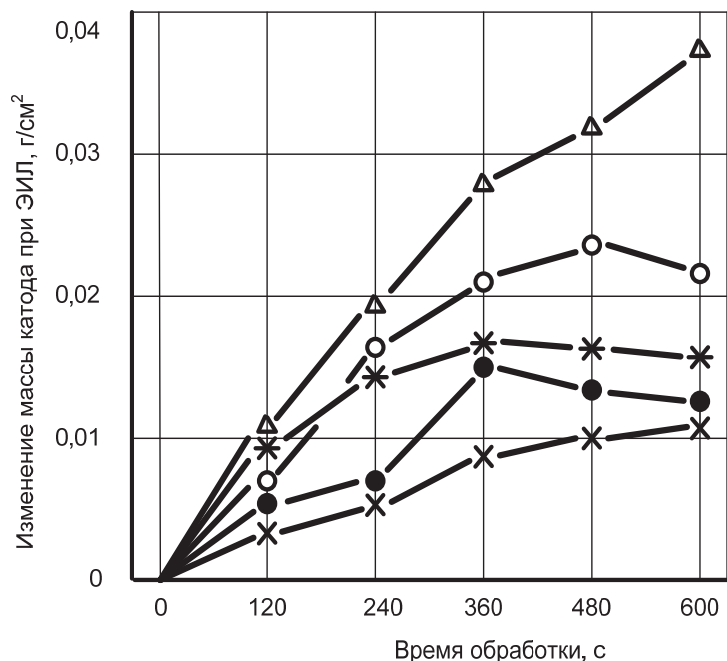
Анодный материал	NiAl	NiAl-Cr	NiAl-W	NiAl-Mo	NiAl-Cr-Mo-W
Содержание легирующего элемента, масс.%	–	33	11	9	Cr – 11 Mo – 13 W – 36
Коэффициент массопереноса (K)	0,2	0,43	0,19	0,16	0,2

Покрытия были получены с использованием электроискровой установки заводского изготовления Элитрон 22 А. В качестве катодов применяли образцы стали 30 с одинаковой площадью поверхности. Для определения оптимального времени электроискровой обработки строились кинетические зависимости изменения масс электродов с использованием метода гравиметрии. Гравиметрический метод заключается во взвешивании электродов через каждую минуту обработки на аналитических весах АW 220. Сравнение эффективности массопереноса при ЭИЛ различными анодными материалами проводили по известному параметру – коэффициенту переноса (K). Для получения достоверных результатов гравиметрии образцов анодов и катодов после каждого этапа нанесения покрытия (60 с) электроды охлаждали до температуры окружающей среды естественным путем [7]. Дополнительно методом визуально-оптического контроля оценивали наличие оксидных плен на поверхности, с учетом этого и зависимостей массопереноса устанавливали оптимальное время обработки данным анодным материалом. Структуру и свойства покрытий изучали методами металлографии на поперечных шлифах с использованием оптических микроскопов МБС 10 и Planar Micro-200. Микрорентгеноспектральным методом с использованием растрового электронного микроскопа SU-70 Hitachi исследовали концентрацию элементов в точках основы и покрытия. Жаростойкость изучалась на дериватографе Q 1000. Скорость нагрева составляла 10 °С/мин до температуры 900 °С, далее проводилась выдержка. Микроструктурное строение покрытий, полученных методом ЭИЛ, в большинстве случаев не выявляется, причина этого заключается в формировании структуры в виде так называемого «белого слоя» [8]. Поэтому изучение особенностей структурного строения покрытий проводили на образцах после их испытания на жаростойкость.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости изменения массы катодов при электроискровой обработке стали 30. Как видно из представленных результатов, минимальный массоперенос показали электроды NiAl без добавок легирующих элементов. Микроструктура материала этих анодов является гомогенной (см. рис. 2, б), без отдельных выделений по границам зерен. Проведенным

микрорентгеноспектральным анализом установлено, что в точках анализа по границам зерен анодного материала (1 – 3) содержание никеля несколько больше, а алюминия – меньше (ат.%, Ni – 53; Al – 46). В то же время непосредственно в зернах анодного материала (4 – 7) концентрация никеля уменьшается, а алюминия возрастает (ат.%, Ni – 50; Al – 49). Установленная разница в стехиометрическом составе интерметаллидных фаз в зернах и по их границам, по-видимому, существенного влияния на прочностные свойства анодного материала NiAl не оказывает, что объясняет относительно невысокие значения массопереноса и К.



Образцы стали с покрытиями  
 —○— — NiAl-Cr-Mo-W; —△— — NiAl-Cr; —×— — NiAl;  
 —\*— — NiAl-Mo; —●— — NiAl-W

Рис. 1. Изменение массы катодов стали 30 при электроискровой обработке интерметаллидными анодными материалами

Наиболее высокие показатели массопереноса получены при использовании анодов NiAl-Cr. Максимальный массоперенос и К анодных материалов, содержащих хром, объясняется особенностями микроструктуры сплава (размер зерен, межзеренные границы) (см. рис. 2, в). Как известно, на эрозионные свойства анодных материалов влияние оказывает не только прочность материала, зависящая в том числе от размеров зерен, но и наличие разупрочняющей фазы по границам зерен. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что границы зерен содержат повышенное содержание хрома (ат.%, Ni – 17,7; Al – 5,4; Cr – 76,9). Еще большее количество хрома содержат включения, локализованные в граница зерен (точка 7 и 8 на рис. 2, в) (ат.%, Ni – 5,5; Al – 1,8; Cr – 92,6). При этом среднее содержание хрома в зерне сплава значительно ниже (ат.%, Ni – 51; Al – 43,3; Cr – 5,6). Таким образом, максимальный массоперенос анодного материала на основе NiAl, легированного хромом, можно объяснить разупрочняющей ролью хромсодержащих включений по границам зерен, что согласуется с известными данными повышенной хрупкости хромсодержащих анодных материалов при ЭИЛ [9].

Микроструктура сплава алюминид никеля, легированного молибденом, приведена на рис. 2, в. Сплав состоит из интерметаллида, содержащего молибден (ат.%, Ni – 61,3; Al – 38; Mo – 0,24), и квазиэвтектики переменного состава (ат.%, Ni – от 56,6 до 60,6; Al – от 1,1 до

6,2 – 3,6; Mo – от 33,2 до 42,1). Необходимо отметить минимальное значение К для этого материала, что свидетельствует о максимальных потерях эродированного анодного материала.

Никель-алюминиевый сплав, легированный вольфрамом (см. рис. 2, *д*), состоит из матрицы NiAl постоянного состава (ат.%, Ni – 65, Al – 34) и локальных включений (ат.%, Ni – от 11,5 до 14,2; W – 85,7 до 88,4). Округлые включения никелида вольфрама свидетельствуют о их первоочередном формировании в процессе кристаллизации анодного материала. Необходимо отметить неоднородное расположение этих включений в анодном материале в виде скоплений, что возможно объясняет немонотонность изменения массопереноса при электроискровой обработке (см. рис. 2, *а*).

Сложнолегированный интерметаллидный сплав NiAl-Cr-Mo-W состоит из NiAl матрицы, легированной Cr (ат.%, Ni – 55; Al – 39; Cr – 5), и включений более светлого вида и переменного состава (ат.%, Ni – 5,8; Cr – 4,7; Mo – 23,6; W – 65,8), (ат.%, Ni – от 4,6 до 4,9; Al – от 4,6 до 4,8; Cr – от 15,7 до 25,8; W – от 8 до 10,3).

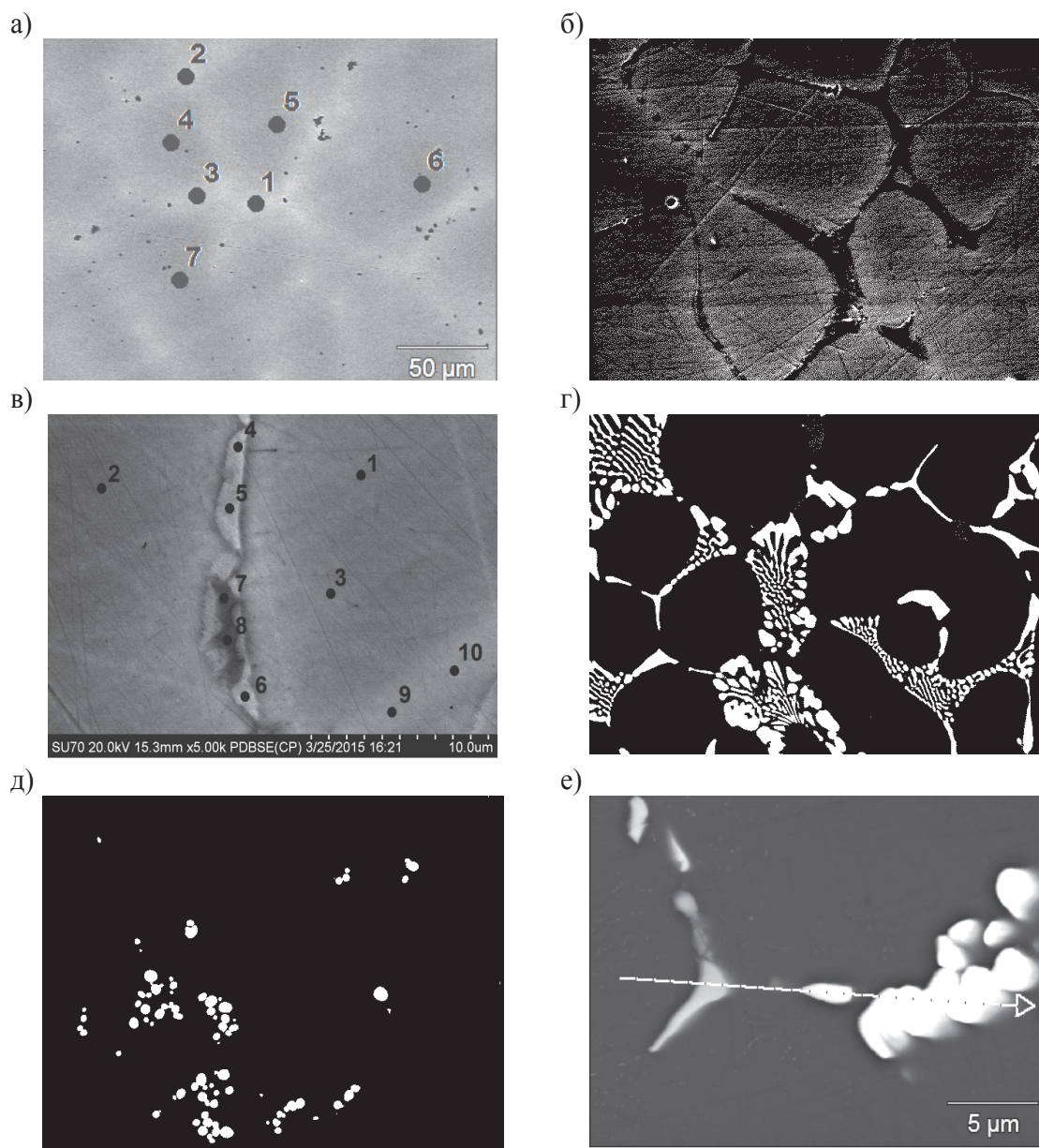
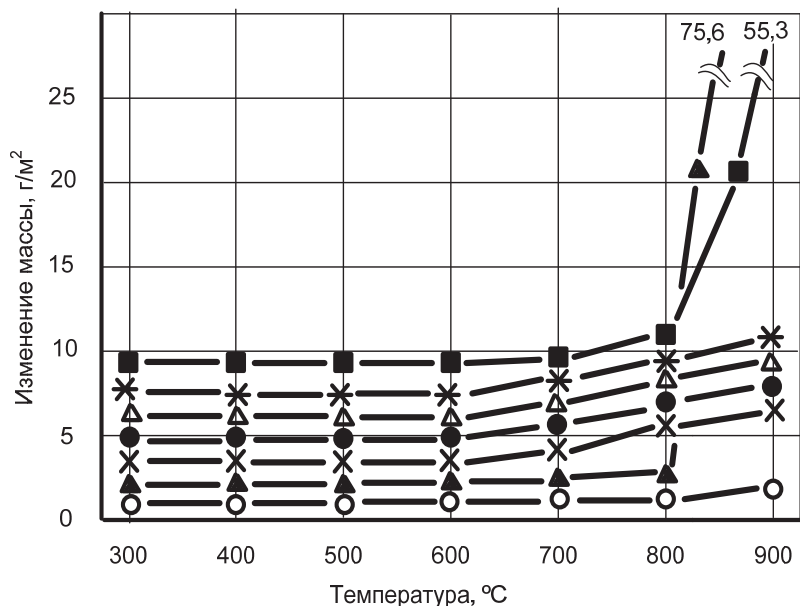


Рис. 2. Микроструктура анодных материалов: а – NiAl; б – NiAl-Cr ( $\times 1000$ ); в – границы зерен NiAl-Cr; г – NiAl-Mo ( $\times 1000$ ); д – NiAl-W ( $\times 1000$ ); е – NiAl-Cr-Mo-W

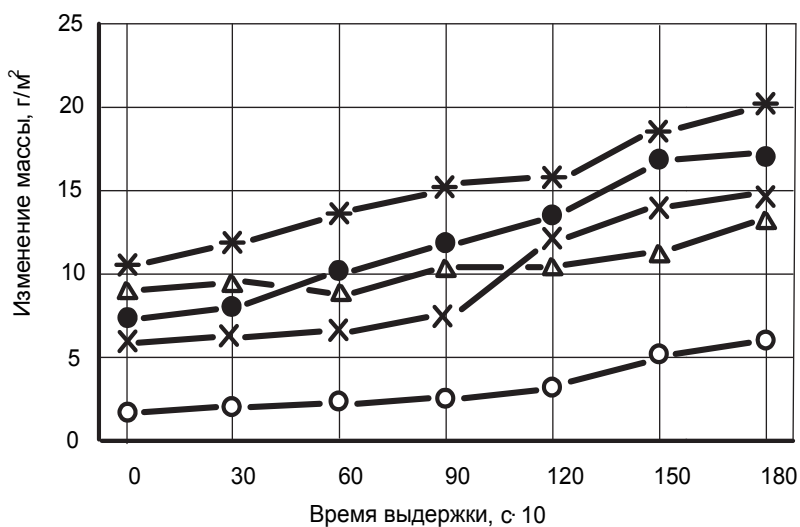
Сравнивая анодные материалы, в целом необходимо отметить высокий коэффициент массопереноса сплава, легированного Cr, почти половина этого материала переносится на катод, образуя покрытие. Остальные анодные материалы имеют значения в два и более раза ниже.

Результаты испытаний на жаростойкость образцов стали 30 приведены на рис. 3.

а)



б)



Поверхность образцов: —▲— — полированная; —■— — шлифованная

Образцы стали с покрытиями

—○— — NiAl-Cr-Mo-W; —△— — NiAl-Cr; —×— — NiAl;  
—×— — NiAl-Mo; —●— — NiAl-W

Рис. 3. Жаростойкость образцов стали 30: а — при нагреве до 900 °C;  
б — при выдержке, температура 900 °C

Исходя из известного факта о повышенной шероховатости покрытий, полученных методом ЭИЛ, представляет интерес изучить степень этого влияния на жаростойкость. Для этого были ис-

пытаны образцы стали без покрытий с предварительно подготовленной поверхностью методом шлифовки и полировки. Как видно из приведенных зависимостей, скорость окисления полированных образцов до 800 °С значительно ниже не только шлифованных, но и большинства образцов, покрытых различными жаростойкими сплавами. При повышении температуры более 800 °С скорость окисления шлифованных, и особенно полированных, образцов существенно возрастает. Причина минимальной скорости окисления шлифованной поверхности (до 800 °С) заключается в том, что после полировки на поверхности создается мелкозернистый наклепанный слой, затрудняющий диффузионные процессы (O, C) в поверхностном слое. Нагрев выше полиморфных превращений (и особенно выше  $A_{c3}$ ) приводит к отслаиванию поверхностного слоя окалины полированных образцов в большей степени, чем шлифованных. Поэтому скорость окисления полированных образцов значительно выше.

Скорость окисления образцов с интерметаллидными покрытиями заметно увеличивается при нагреве более 600 °С, исключение составляют образцы со сложнелегированными никеллидами (NiAl-Cr-Mo-W). Интересно, что скорость окисления в этом случае начинает увеличиваться только при нагреве выше 800 °С. При последующей выдержке (см. рис. 3, б) скорость окисления существенно не изменяется, что свидетельствует о сохранении адгезионных связей основа – покрытие и сплошности покрытия.

При выдержке в течение 1800 с максимальную жаростойкость, как и в режиме нагрева, показали образцы с покрытием NiAl-Cr-Mo-W. Необходимо отметить, что образцы с покрытиями NiAl-Cr в процессе выдержки (900 с) заметно снижают скорость окисления, что объясняется диффузией атомов хрома на поверхность и формированием защитной пленки.

После проведения испытаний на жаростойкость были изучены поверхности образцов с покрытиями. Практически на поверхности всех исследуемых образцов признаков вздутия и отслоения покрытий не обнаружено, что позволяет рекомендовать использование легированных по отдельности (Cr-Mo-W) и в комплексе для использования в качестве материалов при ЭИЛ.

Отдельно необходимо отметить, что изменение массы шлифованных и полированных образцов стали 30 без покрытий в режиме выдержки (на рис. 3 не приведено из-за высокой скорости окисления) значительно выше (шлифованные – 170 г/м<sup>2</sup>, полированные – 240 г/м<sup>2</sup>).

## Выводы

1. Сплавы на основе NiAl, полученные методом металлотермии из оксидных систем, легированные (Cr, Mo, W) по отдельности и в комплексе, опробованы и рекомендованы к использованию в качестве анодных материалов для получения жаростойких покрытий на стали 30 методом ЭИЛ.

2. Максимальный коэффициент массопереноса при формировании покрытий сплавами NiAl-Cr объясняется повышенным содержанием Cr (до масс.% 80) и хромсодержащими включениями (до масс.% 93) по границам зерен.

3. В процессе выдержки при 900 °С максимальную жаростойкость показали образцы стали с покрытиями, сформированными анодными сложнелегированными интерметаллидными сплавами NiAl-Cr-Mo-W.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Химухин, С. Н. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии: моногр. / С. Н. Химухин, Хосен Ри, Э. Х. Ри. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 127 с.
2. Химухин, С. Н. Условия возникновения искрового процесса при низковольтной электроискровой обработке / С. Н. Химухин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 1. – С. 12-15.
3. Кондратьев, А. И. Влияние исходной структуры электродов на параметры процесса электроискрового легирования / А. И. Кондратьев, Е. В. Муромцева, С. Н. Химухин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 6. – С. 26-30.
4. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанозернистым упрочнением: моногр. / Ю. Р. Колобов [и др.]; под науч. ред. Е. Н. Каблова и Ю. Р. Колобова. – М.: МИСиС, 2008. – 326 с.

5. Фаткулин, О. Х. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов дисперсными частицами тугоплавких соединений / О. Х. Фаткулин, А. А. Офицеров // Литейное производство. – 1993. – № 4. – С. 13-14.
6. Высокотемпературный синтез композитов на основе алюминидов никеля / В. В. Гостищев, И. А. Астапов, А. В. Середюк [и др.] // Неорганические материалы. – Т. 52. – № 4. – 2016. – С. 464-467.
7. Гиль, А. В. Влияние нагрева электродов на изменение их массы при электроискровой обработке / А. В. Гиль, С. Н. Химухин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 3. – С. 26-30.
8. Кудряков, О. В. Структурный критерий коррозионной стойкости «белых слоев» / О. В. Кудряков, В. Н. Пустовойт // Материаловедение. – 1998. – № 7. – С. 33-39.
9. Безбах, Н. В. Влияние температуры стальной подложки при электроискровом легировании хромом на изменение структуры и усталостной прочности / Н. В. Безбах, Н. Н. Дубовицкая, Л. Д. Коленченко // Электронная обработка материалов. – 1981. – № 1. – С. 20-24.



**Востриков Я. А., Верхотуров А. Д., Бурков А. А., Рыбалкин А. А., Коновалова Н. С.**

**Ya. A. Vostrikov, A. D. Verkhoturov, A. A. Burkov, A. A. Rybalkin, N. S. Konovalova**

## **ПОВЫШЕНИЕ ЖАРСТОЙКОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩИХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ЭИЛ**

## **INCREASING THE HEAT RESISTANCE AND WEAR RESISTANCE OF HARD TUNGSTEN ALLOYS BY SPARK ALLOYING**

**Востриков Ярослав Алексеевич** – аспирант Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск). E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

**Mr. Yaroslav A. Vostrikov** – a post-graduate student, Far Eastern state transport university (Russia, Khabarovsk). E-mail: ya-vostrikov@mail.ru.

**Верхотуров Анатолий Демьянович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Хабаровск). E-mail: verhoturov36@mail.ru.

**Mr. Anatoly D. Verkhoturov** – doctor of engineering, professor, senior research Fellow, institute for water and environmental problems, the far eastern branch of the Russian academy of sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: verhoturov36@mail.ru.

**Бурков Александр Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Хабаровск).

**Mr. Alexander A. Burkov** – PhD in Physics and Mathematics, researcher at the Institute for Materials, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk).

**Рыбалкин Антон Андреевич** – аспирант кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mmc727@rambler.ru.

**Mr. Anton A. Rybalkin** – a post-graduate student, Foundry Industrial Machinery and Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

**Коновалова Наталья Сергеевна** – научный сотрудник Института тектоники и геофизики имени Ю. А. Косыгина Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Хабаровск); 680000, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65.

**Ms. N. S. Konovalova.** – research Fellow, Institute for Tectonics and Geophysics named after Y.A. Kosygin, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680000, Khabarovsk, Kim Yuchen str., 65.

**Аннотация.** В работе исследован процесс формирования легированного слоя на вольфрамсодержащих твердых сплавах. Установлено повышение жаростойкости и износостойкости при упрочнении твердых сплавов жаростойкими и износостойкими металлами и твердыми сплавами. Определено оптимальное время упрочнения вольфрамсодержащих твердых сплавов в зависимости от используемого анода.

**Summary.** This article describes the study of getting a protective layer on a hard tungsten alloys. The authors established that an increase in heat resistance and wear resistance is possible with carbide hardening heat-resistant and wear-resistant metals and hard alloys. The paper determines the optimal time of hardening tungsten hard alloys depending on the anode.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, поверхностный слой, твёрдый сплав, жаростойкость, износостойкость, эффективность, оптимальное время, упрочнение, микротвердость.

**Key words:** electric spark alloying, the surface layer, hard alloy, heat resistance, durability, efficiency, optimum time, hardening, micro-hardness.

УДК 621.793

### **Введение**

В машиностроении, металлообработке, горном деле на железнодорожном транспорте и других отраслях народного хозяйства вольфрамсодержащие твёрдые сплавы (ВТС) получили распространение в качестве штамповой оснастки, режущего инструмента, пар трения, подшипников скольжения, буровых коронок, и ряда других деталей. Однако при эксплуатации ВТС при температуре более 740 – 800 °С наблюдается снижение их работоспособности в связи с уменьшением их жаростойкости, твердости, износостойкости [1]. Попытки решения этой проблемы сводились к двум основным направлениям: созданию новых твердых сплавов, в том числе и безвольфрамовых, за счет изменения состава, а также созданию на поверхности ВТС защитных упрочняющих покрытий. Новые твердые сплавы на основе TiC имеют высокую твердость, сравнительно высокую жаростойкость, но и высокую хрупкость. В связи с этим ВТС во многих случаях является безальтернативным материалом.

В настоящее время более 80 % режущего инструмента из ВТС выпускается с жаростойкими покрытиями (толщиной  $\leq 7$  мкм), наносимыми методами газофазного осаждения. Защитные и упрочняющие покрытия используются для повышения работоспособности ВТС, однако, как показали исследования, они оправданы только при серийном производстве вследствие высокой ресурсоемкости используемых установок для нанесения покрытий. Альтернативой таким методам может служить метод нанесения защитных и упрочняющих покрытий – электроискровое легирование (ЭИЛ). Этот метод обладает рядом преимуществ, в том числе возможностью переноса на обрабатываемую поверхность любых токопроводящих материалов, в том числе тугоплавких соединений (карбидов, боридов, нитридов, силицидов) [2]. Однако метод ЭИЛ, как и все другие методы, имеет ряд недостатков, в том числе и низкую толщину покрытия ( $\geq 10$  мкм), что ограничивает образование зоны взаимной кристаллизации на упрочняемой поверхности.

Известны работы авторов [3; 4; 5], которые предлагали различные варианты повышения жаростойкости и износостойкости методом ЭИЛ за счет выбора режимов и электродных материалов. Однако исследования формирования защитного слоя на ВТС (металлами, вольфрамсодержащими твердыми сплавами и композиционными материалами) с целью повышения их толщины слоя, жаростойкости и износостойкости являются малоизученными. На основе вышесказанного, целью работы является исследование и установление закономерностей формирования легированного слоя при упрочнении вольфрамсодержащих твердых сплавов и получение жаростойких и износостойких покрытий. В связи с этим представляет интерес упрочнение поверхности ВТС методом ЭИЛ электродами, материал которых способен образовывать на упрочняемой поверхности жаростойкие и износостойкие покрытия.

В основу работы включены результаты, полученные в ходе НИР УМНИК № 7887ГУ/2015: «Разработка и исследование защитных покрытий режущего инструмента из вольфрамсодержащих твердых сплавов для повышения их работоспособности применительно к промышленности Дальневосточного региона» (2015 – 2017 гг.).

### **Методы, материалы и оборудование**

Для исследований в качестве упрочняемых материалов использованы отечественные промышленные образцы ВТС двух групп: ВК (ВК3, ВК8, ВК15), ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4). Выбранные марки твёрдых сплавов отражали в значительной мере состав и свойства наиболее применяемых марок для режущего инструмента, содержащих только карбиды вольфрама (WC) либо карбиды титано-вольфрама (WC-TiC).

В качестве электродов, способных образовывать жаростойкие и износостойкие покрытия, предлагаются сплавы, основные легирующие элементы которых (Zr, Ti, Co) [3]. Предполагается, что перечисленные металлы способны к образованию неограниченных твёрдых растворов с упрочняемым материалом. В связи с этим для упрочнения выбраны следующие электродные материалы:

- электрод из сплава  $ZrSiO_4$ , полученный в лаборатории кафедры «Подвижной состав железных дорог» ДВГУПС, синтезированный из минерального сырья Алгаминского месторождения на основе  $ZrSiO_4$ ;

- вольфрамсодержащий твердосплавный электрод ТТ10К8 (основу сплава составляет TiC, TaC, WC) и вольфрамсодержащий специальный электрод ВК15\*, спеченный при температуре  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  в Институте Химии ДВО РАН, имеющий фазовый состав  $Co_3W_3C$ ;  $Co_3W_6C$ ; WC;

- электрод из стали 45, используемый для получения защитной оксидной пленки, повышающей жаростойкость вольфрамсодержащих твердых сплавов.

Для упрочнения поверхности ВТС и исследования массопереноса в процессе электроискрового легирования использовали установку Корона 1101 с режимом работы  $I_{ср.} = 0,7\text{ A}$ ;  $U_{ср.} = 40\text{ B}$ ;  $t_{имп} = 12 \cdot 10^{-5}$ ;  $\gamma_{имп/с} = 50$ ;  $W = 10,08\text{ Дж/мин}$ .

Исследования микроструктуры проводились на растровом электронном микроскопе HITACHI S3400p и оптическом микроскопе NIKON MA200. Исследования микротвердости образцов проводились методом индентирования микротвердомером SHIMADZUHMV-2T ГОСТ 2999-75. Исследования образцов по температурному окислению выполняли на дериватографе Q-1000 в соответствии с ГОСТ 6130-71 и ГОСТ 21910-76. Изменение массы упрочняемых ВТС определялось гравиметрическим методом при пятикратном измерении с использованием прецизионных весов exellece XS Mettler Toledo и стандартных весов «ВЛР-200» класса 2 с точностью 5 мкг, ГОСТ 24104-88. Износостойкость образцов определялась по удельному износу упрочненных твердых сплавов относительно неупрочненных образцов по схеме диск – колодка. Контртело представляет собой диск диаметром 53 мм толщиной 5 мм из стали марки 60 микротвердостью 42 HRC. Образец (колодка) представляет собой прямоугольный брусок, подставленный к контртелу таким образом, чтобы боковая поверхность диска (контртела) соприкасалась с ним без зазора.

Для выявления закономерностей формирования поверхностного слоя исследовали кинетику массопереноса гравиметрическим методом. При этом удельную эрозию электрода  $\Delta a$  и удельный привес катода  $\Delta k$  оценивали взвешиванием образцов до и после ЭИЛ. Учёт массы образцов производился в период от 10 до 30 с в зависимости от определения оптимального времени упрочнения. Суммарное время легирования поверхности, отнесённое к  $1\text{ см}^2$ , варьировалось в зависимости от достигаемых параметров от 7 до 9 мин [6]. Значения массы электродов после ЭИЛ определяли как среднеарифметическую величину  $\Delta m$  после 5-кратных измерений.

Для оценки эффективности процесса ЭИЛ использовали критерий  $\gamma_{\Phi}$ , учитывающий как критерий формирования ЛС ( $\gamma_{ЛС}$ ), так и коэффициент эффективности свойств ЛС ( $\gamma_{Св}$ ). Коэффициент  $\gamma_{Св}$  может быть оценен как отношение величин, характеризующих те или иные физико-химические и эксплуатационные свойства ( $S_{ЛС}$ ) поверхностного слоя, к аналогичным величинам свойств ВТС в качестве основы ( $S_{ВО}$ ) без покрытия, которые могут быть представлены величинами, характеризующими свойства твёрдости, жаростойкости, износостойкости и так далее, либо величиной одного из них. Таким образом, для более полной оценки эффективности ЭИЛ следует учитывать коэффициент повышения эксплуатационных свойств ( $\gamma_{Св}$ ):  $\gamma_{Св} = S_{ЛС}/S_{ВО}$ . Тогда эффективность процесса ЭИЛ может быть представлена формулой функционального критерия [7]

$$\gamma_{\Phi} = \gamma_{ЛС} \times \gamma_{Св}.$$

При этом значение основы всегда соответствует 100 %, а коэффициент эффективности может быть больше или меньше этого значения.

В связи с вышесказанным предметом исследования в данной работе являлись процессы формирования легированного слоя на ВТС, состав, структура и свойства легированного слоя, физико-химические, механические и эксплуатационные свойства ВТС до упрочнения и после упрочнения, а также сравнение эффективности свойств легированного слоя после упрочнения вольфрамсодержащих твердых сплавов методом электроискрового легирования.

### Результаты и обсуждения

На рис. 1 представлена кинетика процесса формирования измененного поверхностного слоя вольфрамсодержащего твердого сплава ВК8 различными электродами. Видно, что на начальном

этапе формирования легированного слоя (I участок) наблюдаются положительные значения прироста катода  $\Delta k$ , которые наблюдаются в среднем до  $t = 120 \text{ с/см}^2$ , а далее происходит периодическое разрушение легированного слоя, при этом на втором участке кинетической кривой  $\Delta k - \text{BK8}$ , начиная с  $t > 210 \text{ с/см}^2$  (см. рис. 1, а), он принимает отрицательные значения. Такой характер формирования измененного поверхностного слоя связан с образованием на поверхности электрода «вторичной» структуры за счет переноса материала электрода на катод и от взаимодействия с межэлектродной средой, в частности с кислородом  $\text{O}_2$ , связанной с образованием оксидов и нитридов в легированном слое [8].

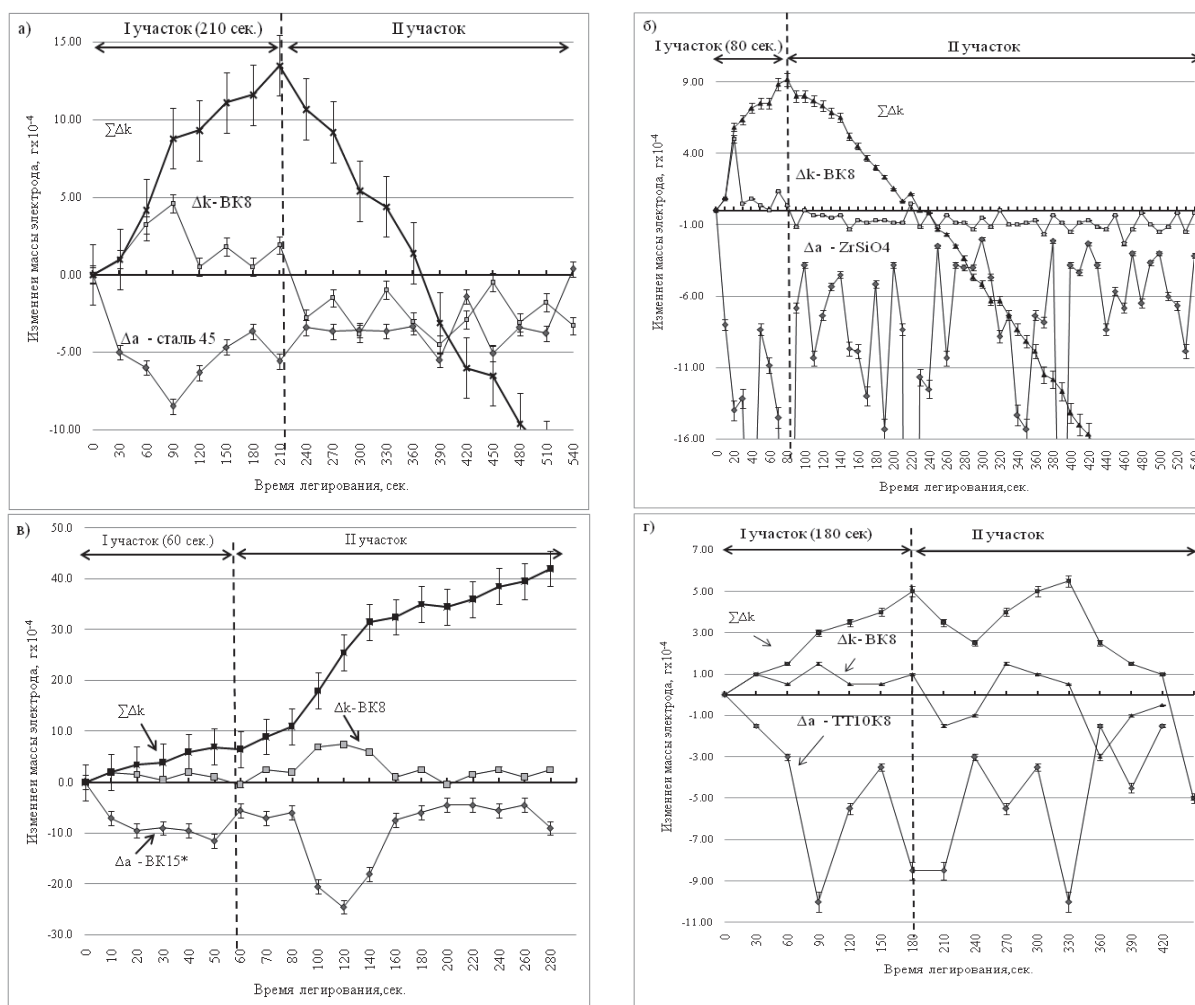


Рис. 1. Кинетика формирования легированного слоя на BK8 различными электродами

Показано, что при достижении времени окончания первого участка формирования легированного слоя (в среднем  $120 \text{ с/см}^2$ ), когда заканчивается образование «вторичной» структуры на поверхности электрода, происходит разрушение этой вторичной структуры под влиянием накопившихся внутренних напряжений. Разрушение поверхности электрода за счет воздействия импульсных, тепловых и механических нагрузок от действий искровых разрядов влияет на периодическое разрушение легированного слоя и образование дефектов на его поверхности. Ранее было показано [1], что такой переход из одного участка в другой был обозначен как время хрупкого разрушения ЛС ( $t_x$ ). В нашем случае мы обозначили как участки формирования «вторичных» структур (I участок), так и участок ЭИЛ, сформированный «вторичными структурами» (II участок).

На примере исследования формирования легированного слоя на твердом сплаве BK8 при упрочнении электродом из стали 45 показано, что количество дефектов на поверхности увеличивается прямо пропорционально увеличению времени электроискрового легирования. На приве-

денных графиках (см. рис. 1) наблюдаются низкие значения массопереноса  $\Delta k$  – ВК8. Это объясняется образованием с углеродом карбидных соединений, которые обладают высокой хрупкостью, что способствует снижению эрозионной стойкости измененного поверхностного слоя и приводит к его периодическому разрушению под воздействием импульсных и механических нагрузок. В связи с этим наблюдается незначительный массоперенос на первом участке и разрушение поверхностного слоя на втором участке. Однако суммарный массоперенос ( $\sum \Delta k$ ) имеет положительный характер, что свидетельствует о постоянном формировании легированного слоя. На рис. 2 приведены результаты исследований макроструктуры легированного слоя.

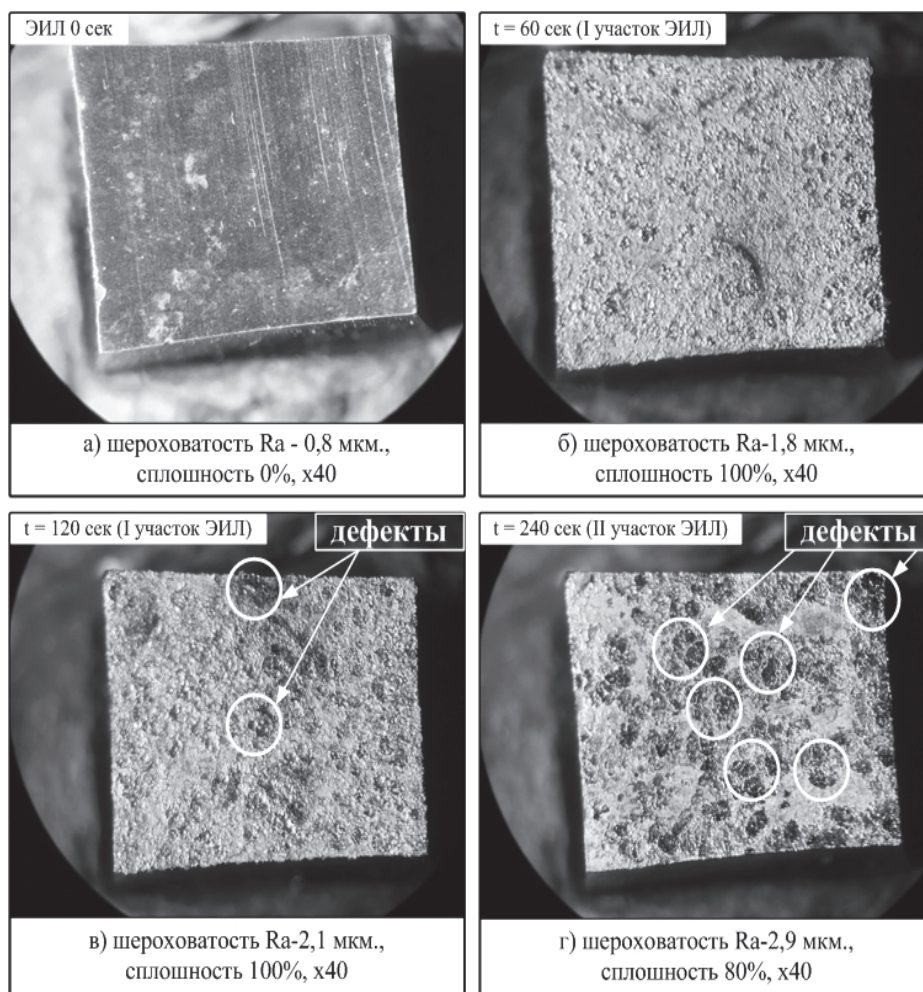


Рис. 2. Формирование защитного слоя на ВК8 методом ЭИЛ сталью 45 к площади 1 см<sup>2</sup>:  
 а – исходная поверхность; б – упрочненный ЛС через  $t = 60$  с (дефекты отсутствуют);  
 в – упрочненный ЛС через  $t = 120$  с (наличие незначительного количества дефектов);  
 г – упрочненный ЛС через  $t = 240$  с (наличие значительного количества дефектов)

Как видно из рис. 2, с увеличением времени легирования возрастает количество дефектов, заключающихся в изменении физико-механических свойств под действием температуры в зоне искрового разряда. Данные дефекты снижают эффективность формирования слоя и ухудшают сплошность покрытия. При этом установлено, что в течение первого участка кинетической кривой  $\Delta k$  – ВК8 (см. рис. 1, а) формируется легированный слой со сплошной поверхностью, в которой отсутствуют дефекты. На приведенных макроструктурах (см. рис. 2, в, г) наблюдаются дефекты в виде кратеров, ухудшающих физико-химические свойства поверхностного слоя (сплошность, шероховатость, жаростойкость), что снижает эффективность формирования легированного слоя. Процесс образования кратеров объясняется свойствами материала электрода, изготовленного из

стали 45, который имеет более низкую температуру плавления, чем твердый сплав, и быстрее расплавляется при локальном воздействии электрического тока. Температура искрового разряда достигает 20 000 °С, что способствует быстрому образованию поверхностной структуры и ее последующему разрушению.

Далее проводилось исследование микроструктуры легированного слоя (см. рис. 3). Показана структура поперечного шлифа и поверхности вольфрамсодержащего твердого сплава ВК8 после электроискрового легирования электродом из стали 45.

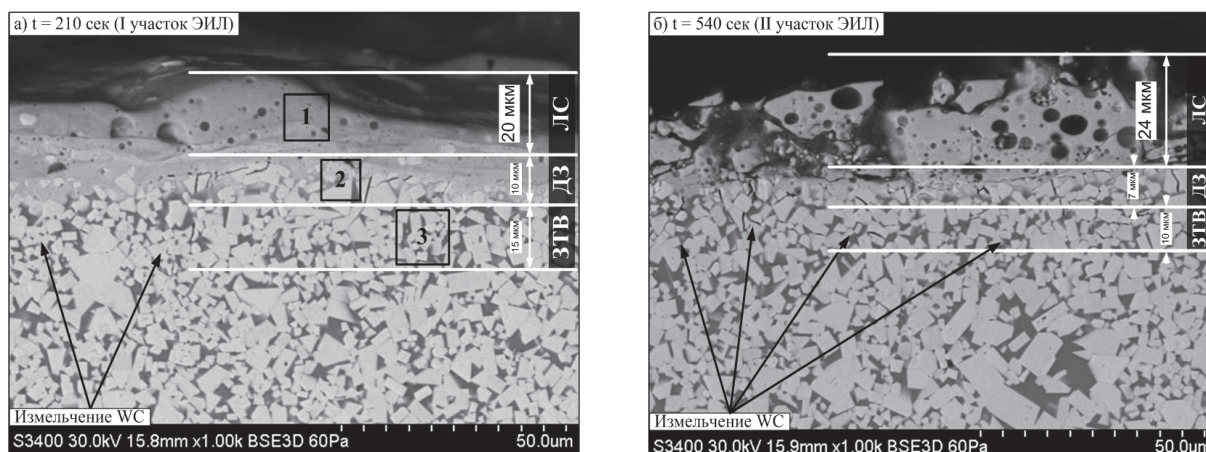


Рис. 3. Микроструктура поперечного шлифа легированного слоя  $\times 1000$ : а – упрочненный слой, сформированный за 210 с; б – упрочненный слой, сформированный за 540 с; ЗТВ – зона термического влияния; ДЗ – диффузионная зона; ЛС – легированный слой

На рис. 3 показано, что слой, нанесенный электродом сталь 45, имеет пористую структуру. Установлено, что при использовании стальных электродов слой преимущественно формируется на электроде с большим содержанием углерода, что объясняется уменьшением температуры плавления. Как видно из рис. 3, а, б, в ЗТВ наблюдается измельчение зерен карбидов вольфрама (WC) вследствие воздействия импульсных нагрузок искрового разряда. Также в легированном слое образуются поры, что обусловлено выделением газа  $\text{CO}_2$ , их количество и размер существенно уменьшаются по мере приближения к поверхности упрочняемого материала.

Кроме того, в целях выявления перехода легирующих элементов в поверхностный слой проведен химический анализ измененного поверхностного слоя в участках 1, 2, 3 рис. 3, а. Результаты химического анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав измененного поверхностного слоя на ВК8 после ЭИЛ сталью 45

Химический элемент	Участок 1 (ЛС), %	Участок 2 (ДЗ), %	Участок 3 (ЗТВ), %
С	20,85	11,24	13,18
О	21,89	14,23	4,58
Fe	11,91	13,42	0,86
Co	3,00	4,22	3,70
W	40,21	53,04	75,35

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что материал электрода (сталь 45) переходит в основу, тем самым образуя измененный поверхностный слой. В целях определения фазового состава проводился рентгеноструктурный анализ легированного слоя, полученного при упрочнении твердого сплава (ВК8) электродом сталь 45. Данные рентгеноструктурного анализа показали наличие в легированном слое карбида железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), который способствует повышению физико-химических

и механических свойств упрочняемого материала на первом участке кинетической кривой  $\Delta k$  – BK8 (см. рис. 1, *a*). В то же время  $Fe_3C$  способствует разрушению легированного слоя при дальнейшем упрочнении твердого сплава BK8 (более 210 с), что соответствует второму участку кинетической кривой  $\Delta k$  – BK8 (см. рис. 1, *a*).

Для оценки жаростойкости легированного слоя проводили нагрев упрочненного твердого сплава (BK8) до температуры 1000 °С в целях определения наростообразования. Установлено, что на легированном слое, соответствующем первому участку кинетической кривой  $\Delta k$  – BK8, дефекты в виде наростов не обнаружены (см. рис. 4, *a*). Однако на месте образования кратеров (дефектов легированного слоя), появившихся в процессе упрочнения на втором участке кинетической кривой, в результате нагрева наблюдаются наросты в виде отслоения поверхности твердого сплава (BK8) (см. рис. 4, *б*).

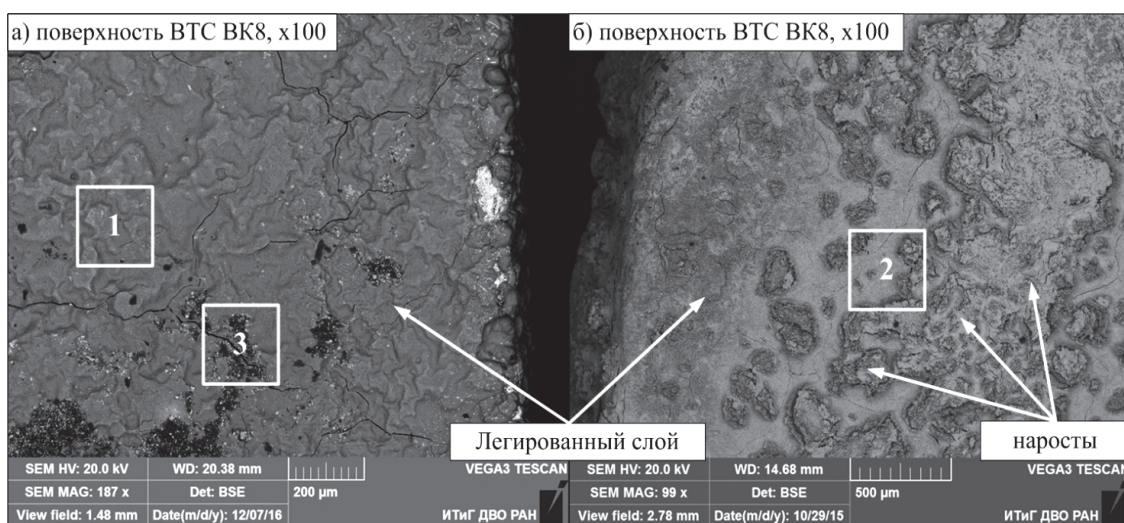


Рис. 4. Макроструктура легированного слоя после нагрева до 1000 °С:

*a* – легированный слой, сформированный за 210 с;

*б* – легированный слой, сформированный за 540 с

Данные наросты образуются вследствие активного взаимодействия кислорода (O) с вольфрамом (W) и кобальтом (Co). В результате проведения термогравиметрического анализа на поверхности упрочненного твердого сплава (первый участок кинетической кривой на рис. 4, *a*) обнаружены элементы, соединения которых с кислородом образуют наиболее вероятные оксиды –  $FeO$  /  $Fe_2O_3$ , способствующие сдерживанию образования нароста на поверхности твердого сплава, что подтверждается химическим анализом этой поверхности (см. табл. 2). Однако на поверхности упрочненного твердого сплава (второй участок кинетической кривой на рис. 4, *б*) на местах дефектов легированного слоя после нагрева до 1000 °С образовались наросты.

Таблица 2

Химический состав поверхности легированного слоя после нагрева до 1000 °С

Химический элемент	Участок 1, % (см. рис. 4, <i>a</i> )	Участок 2, % (см. рис. 4, <i>б</i> )	Участок 3, % (см. рис. 4, <i>a</i> )	Предполагаемый оксид
C	5,14	3,12	6,73	–
O	30,44	25,69	22,70	–
Fe	61,95	13,28	18,85	$FeO$
Co	–	7,02	1,27	$CoO$
W	1,70	51,25	49,55	$WO_3$

Предположительный состав образованных наростов – это оксиды в виде соединений  $WO_3$  и  $CoWO_4$ . В некоторых местах (участок 3 на рис. 4, а) защитное покрытие растрескалось, и на его поверхности начали образовываться оксиды – это подтверждается химическим анализом этого участка (см. табл. 2). Для устранения этого недостатка и создания жаростойкого и износостойкого защитных покрытий на твердых сплавах целесообразно использовать комбинацию электродов, содержащих железо и титан.

В результате исследований состава и структуры установлено, что наиболее высокими показателями обладает легированный слой, полученный в течение первого участка кинетической кривой (до 240 с) на твердых сплавах после упрочнения электродом из стали 45. Поэтому изучение физико-химических и эксплуатационных свойств выполняли только для данного участка кинетической кривой. При этом исследовалась жаростойкость и микротвердость измененного поверхностного слоя. Аналогичные результаты получены при исследовании других твердых сплавов (BK3, BK15, T5K10, T15K6 и T30K4).

На рис. 5 показана эффективность повышения жаростойкости ВТС при упрочнении методом ЭИЛ электродами ВТС BK15\*, ВТС TT10K8, сплавом сталь 45 и сплавом  $ZrSiO_4$ .

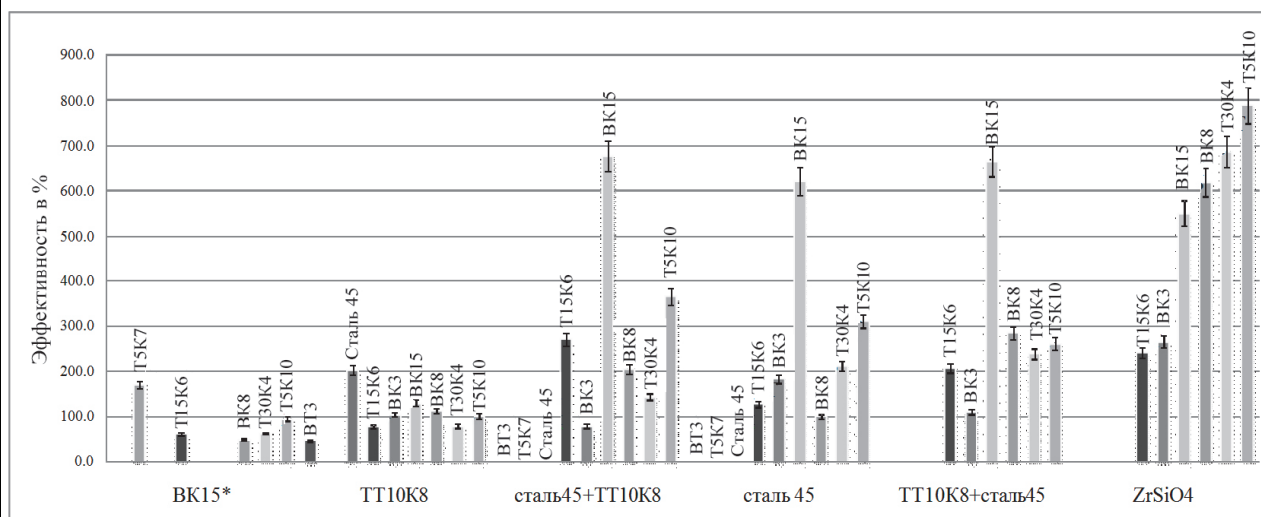


Рис. 5. Эффективность жаростойкости упрочненных ВТС при нагреве до 1000 °С

Установлено, что при упрочнении твердых сплавов электродом (сталь 45) жаростойкость повышается в шесть раз у BK15 и в три раза у T5K10. При упрочнении специальным электродом BK15\* жаростойкость всех исследуемых ВТС снизилась от 5 до 52 %. При этом после нагрева до 1000 °С наблюдается отслаивание у твердого сплава T30K4 по ребрам, у твердого сплава T15K6 – образование пористой окалины, наблюдаются отслаивания на ребрах и в местах прижогов во время ЭИЛ. Защитный слой, сформированный электродом TT10K8, повысил жаростойкость незначительно, например у материала BK15 на 20 %, при этом у некоторых ВТС она снизилась на 22 %. Установлено, что при упрочнении методом ЭИЛ в поверхностном слое ВТС образуются карбиды металлов, повышающие жаростойкость и износостойкость. В случае легирования цирконсодержащим электродом  $ZrSiO_4$  образуются карбиды циркония, превосходящие по своим физико-химическим и эксплуатационным свойствам (по Г. В. Самсонову) карбиды титана, тантала и вольфрама. При упрочнении ВТС, содержащем сплав циркония, жаростойкость твердых сплавов повышается почти в восемь раз у T5K10 и почти в шесть с половиной раз у BK8 и T30K4, что заметно выше, чем при упрочнении электродом сталь 45. На основе полученных данных о повышении эффективности жаростойкости легированного слоя выбранными электродами определены упрочняемые ВТС.

На рис. 6 показано повышение эффективности микротвердости легированного слоя на выбранных вольфрамсодержащих твердых сплавах при упрочнении методом электроискрового легирования.

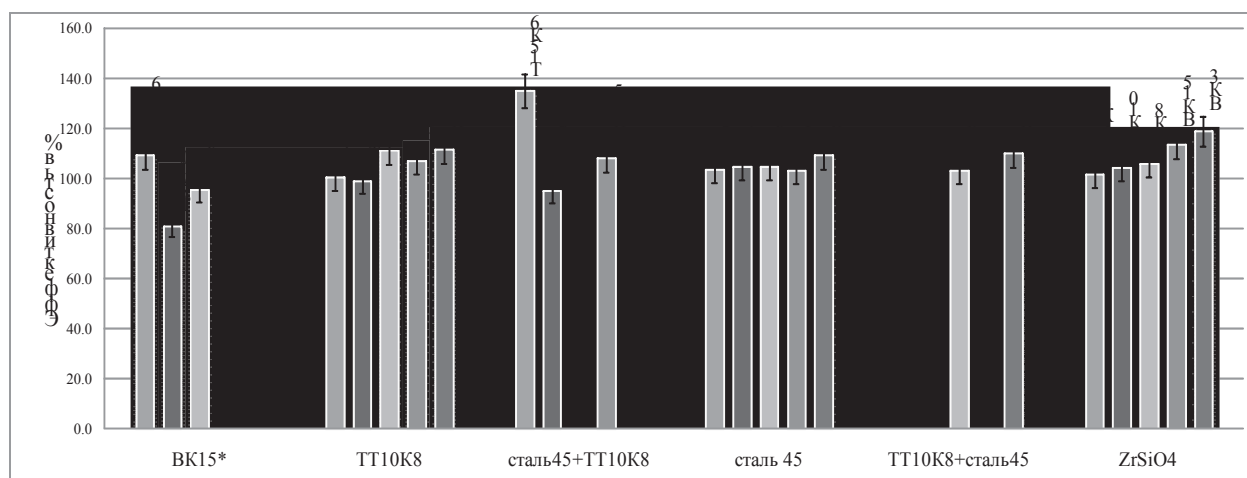


Рис. 6. Эффективность микротвердости легированного слоя упрочненных ВТС

Из приведенного рисунка видно, что микротвердость при упрочнении электродом сталь 45 у ВК15 повышается на 3 %, а у сплава ВК3 – на 9 %. При упрочнении ВТС электродом ZrSiO<sub>4</sub> микротвердость повысилась в среднем на 8 % у всех твердых сплавов, а при упрочнении электродом ТТ10К8 микротвердость упрочняемых ВТС повысилась в среднем на 6 %. Проведенные исследования износостойкости полученных покрытий показали повышение износостойкости ВТС Т15К6 в два раза при упрочнении электродом ZrSiO<sub>4</sub>, а при упрочнении электродом ТТ10К8 в шесть раз. Значения износостойкости объясняются образованием неограниченных твердых растворов в случае ТТ10К8 и повышением микротвердости ВТС от легированного слоя к основе.

Учитывая вышесказанное, оптимальное время упрочнения следующими электродами составляет: 210 с для материала из стали 45; 80 с для материала из сплава ZrSiO<sub>4</sub>; 280 с для разупрочненного ВТС ВК15\* и 180 с для ВТС ТТ10К8. После указанного времени рекомендуется зачищать используемый электрод от образовавшейся вторичной структуры.

Однако толщина легированного слоя, показатели эффективности физико-химических и механических свойств и его высокая эрозия указывают на необходимость комбинирования при электроискровом легировании электродов и методов поверхностного упрочнения. Упрочнение ВТС групп ВК и ТК одноименными твердыми сплавами рекомендуется проводить не более 120 с, так как дальнейшее упрочнение может привести к разрушению слоя и эрозии основы.

### Выводы

Определены два этапа формирования легированного слоя, позволяющие установить оптимальное время электроискрового легирования вольфрамсодержащих твердых сплавов, при котором будут наблюдаться положительные значения массопереноса.

Показано, что при электроискровом легировании на втором участке кинетической кривой, то есть при превышении оптимального времени упрочнения, повышается шероховатость легированного слоя, ухудшается его сплошность, снижаются эффективность формирования и эффективность его свойств.

При упрочнении ВТС установлено влияние состава упрочняемого материала, а также впервые установлено влияние состава и структуры упрочняющего электрода на формирование легированного слоя, его сплошность и физико-химические, механические и эксплуатационные свойства. Так показано, что при использовании разупрочненного электрода ВК15\* в течение всего периода упрочнения повышается массоперенос, при использовании электрода из сплава ZrSiO<sub>4</sub> наблюдается

малый массоперенос и сильная эрозия электрода, однако при этом повышается эффективность свойств легированного слоя.

Для повышения эффективности формирования легированного слоя и его толщины представляет интерес создание многослойных покрытий, например двумя электродами – сталью 45 и вольфрамсодержащим титано-танталовым твердым сплавом ТТ10К8, позволяющих повысить жаростойкость и износостойкость упрочняемого материала.

Коллектив авторов выражает благодарность Л. А. Коневцову, Е. С. Панину, О. В. Башкову за оказанную помощь в проведении исследований полученных покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение жаростойкости твердых сплавов при электроискровом легировании алюминием и титаном [текст] / А. Д. Верхотуров, В. М. Макиенко, Л. А. Коневцов, Я. А. Востриков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № IV-1(24). – С. 69-73. DOI журнала: 10.17084/uzknastu.
2. Самсонов, Г. В. Эрозионная стойкость металлов анода при ЭИЛ тех же металлов / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров // Электронная обработка материалов. – 1973. – № 6. – С. 37-38.
3. Химухин, С. Н. Разработка научных основ формирования измененного слоя на металлах и сплавах с заданными свойствами при низковольтной электроискровой обработке: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С. Н. Химухин. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 40 с.
4. Зависимость эрозии анода от состояния упрочняемой поверхности при электроискровом легировании / А. Д. Верхотуров [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1970. – № 6. – С. 29-31.
5. Верхотуров, А. Д. Научные основы формирования легированного слоя и создания электродных материалов при электроискровом легировании: дис. ... д-ра техн. наук / Верхотуров Анатолий Демьянович. – Киев, 1984. – 532 с.
6. Верхотуров, А. Д. К вопросу о критерии эффективности процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, Л. А. Коневцов, И. А. Астапов // Вестник АмГУ. – 2007. – № 39. – С. 6-9.
7. Самсонов, Г. В. Влияние межэлектродной среды на эрозию материала анода при электроискровом легировании / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров // Электронная обработка материалов. – 1974. – № 1. – С. 33-35.



Одинок В. И., Дмитриев Э. А., Евстигнеев А. И., Свиридов А. В., Севастьянов Г. М.

V. I. Odinokov, E. A. Dmitriev, A. I. Evstigneev, A. V. Sviridov, G. M. Sevastianov

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ПРИ ЛИТЬЕ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

## MATHEMATICAL MODELING OF THE MULTILAYER SHELL MOLD THERMAL STRESS STATE WITH PHASE TRANSITION WHEN STEEL CASTING

**Одинок Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор-консультант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8-912-271-88-58. E-mail: 79122718858@yandex.ru.

**Mr. Valeriy I. Odinokov** – Doctor of Engineering, Professor, Visiting Professor of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-912-271-88-58. E-mail: 79122718858@yandex.ru.

**Дмитриев Эдуард Анатольевич** – доктор технических наук, доцент, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8(4217)53-23-04. E-mail: rector@knastu.ru.

**Mr. Eduard A. Dmitriev** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Rector of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8(4217)53-23-04. E-mail: rector@knastu.ru.

**Евстигнеев Алексей Иванович** – доктор технических наук, профессор, советник при ректорате Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8-914-175-60-15. E-mail: diss@knastu.ru.

**Mr. Alexey I. Evstigneev** – Doctor of Engineering, Professor, University Administration Adviser, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-914-175-60-15. E-mail: diss@knastu.ru.

**Свиридов Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения и металлургии Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8-909-829-58-55. E-mail: andrey1979\_2009@mail.ru.

**Mr. Andrei V. Sviridov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanic Engineering and Metallurgy Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-909-829-58-55. E-mail: andrey1979\_2009@mail.ru.

**Севастьянов Георгий Мамиевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, исполняющий обязанности ученого секретаря Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 8-914-210-45-28. E-mail: akela.86@mail.ru.

**Mr. Georgiy M. Sevastyanov** – PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of machinery and metallurgy, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 8-914-210-45-28. E-mail: akela.86@mail.ru.

**Аннотация.** Рассматривается механизм влияния температурного перепада между слоями литейной формы на трещиностойкость оболочек. Исследуются факторы, оказывающие влияние на напряженно-деформированное состояние литейных оболочковых форм.

**Summary.** The mechanism of the influence of the temperature difference between the mold layers on the crack resistance of the shells is considered. Factors affecting the stress-strain state of cast shell molds are investigated.

**Ключевые слова:** многослойные формы, литье по выплавляемым моделям, структура формы, математическое моделирование.

**Key words:** multi-layer form, the casting, the mold structure, mathematical modeling.

УДК 621.74:001.891.573

Анализ тенденций развития технологических процессов формообразования литейных оболочковых форм (ОФ) показывает, что точность и чистота поверхности отливок являются одними из главных критериев уровня развития науки и технологии литейного производства. Высокие показатели по этим признакам обеспечивают неразъемные высокоогнеупорные негасящиеся ОФ по выплавляемым моделям (ВМ), материалы которых не взаимодействуют с заливаемыми сплавами. Одним из новых направлений повышения качества технологических и эксплуатационных свойств ОФ по ВМ является структурно-деформационный подход к управлению морфологическим строением и свойствами ОФ на основе их иерархии структур как отдельных элементов, отдельного слоя или группы слоев, а также оболочки в целом [1].

Трещиностойкость ОФ по ВМ зависит главным образом от их напряженно-деформированного состояния (НДС) на различных этапах формообразования. Известные методы снижения [2 – 5] НДС ОФ остаются малоизученными, так как нет четких сведений о параметрах различных структур ОФ и эффективности их влияния на изменение свойств последних. Таким образом, актуальным направлением исследования являются определение НДС на каждом этапе формообразования ОФ и разработка путей его снижения.

Поиск и выбор путей повышения трещиностойкости как многослойных, так и монослойных ОФ (форетических) за счет снижения НДС возможен на базе комплексного изучения закономерностей формирования структуры и свойств оболочек в процессе их формообразования, прокаливания, заливки расплавом и кристаллизации отливок, а также теоретического прогнозирования возможного образования трещин в оболочке за счет математического моделирования процессов формообразования и применения оболочек [6].

В работе исследовали НДС многослойных ОФ (плоская задача), осесимметричных многослойных ОФ (объемная задача) и монослойных ОФ (объемная задача) при их заливке и кристаллизации металла (см. рис. 1).

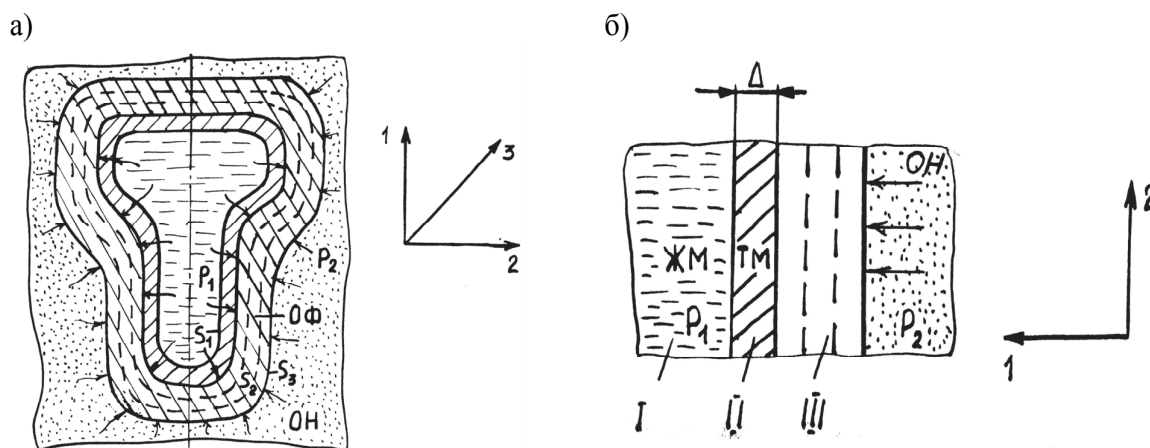


Рис. 1. Расчетная схема процесса заливки и кристаллизации отливки в ОФ:

а – сечение отливки и ОФ в горизонтальной плоскости; б – схема моделирования областей системы; ЖМ, ТМ – жидкий и твердый металл соответственно; ОН – опорный наполнитель;  $P_1$  – ферростатическое давление жидкого металла;  $P_2$  – гидростатическое давление со стороны опорного наполнителя;  $S_1$  –  $S_3$  – поверхности исследуемой области

На основе уравнений механики сплошных сред и уравнения теплопроводности была построена математическая модель процесса затвердевания металла после его заливки в многослойную оболочковую форму.

Реализация предложенной системы уравнений осуществляется численным методом, разработанным профессором В. И. Одиноким [1]. Суть метода состоит в разбиении исследуемой об-

ласти на криволинейные элементы ортогональной формы, составлении исходной системы дифференциальных уравнений по элементу в разностном виде через значения напряжений и перемещений (скоростей перемещений) по граням элемента, численного решения построенной алгебраической системы уравнений с учетом начальных и граничных условий по разработанной программе [2]. Для решения уравнения теплопроводности использовали разностную схему и алгоритм решения, описанный в работе [1].

Предполагалось, что температура в твердой фазе изменялась по линейному закону, а градиент температуры в жидкой фазе равен нулю.

В Эйлеровой системе координат рассматриваемый процесс описали следующей системой уравнений:

$$y_{ij,j} = 0, \quad \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G_p \varepsilon_{ij}^x, \quad \varepsilon_{ij}^x = \varepsilon_{ij} - (1/3)\varepsilon \delta_{ij},$$

$$\varepsilon = 3k_p \sigma + 3\alpha_p (\theta_n - \theta_p); \quad \varepsilon = \varepsilon_{ii},$$

$$\varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad \frac{d\theta}{d\tau} = a_p \Delta \theta; \quad i = 1, 2.$$

Здесь  $\sigma_{ij}$  – напряжения;  $\varepsilon_{ij}$  – деформации (малые);  $G_p$  – модуль сдвига в  $p$ -й оболочке;  $u_i$  – перемещения;  $\theta$  – температура;  $a_p$  – коэффициент температуропроводности;  $k_p$  – коэффициент объемного сжатия;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера. В уравнении имеет место суммирование по повторяющимся индексам  $i, j$ ;  $\theta_p$  – начальная температура в  $p$ -й оболочке;  $\theta_n$  – текущая температура;  $\alpha_p$  – коэффициент линейного расширения в области  $p$ ;  $\tau$  – время.

На каждом временном шаге  $\Delta\tau_n$  вычисляется толщина затвердевшей корочки металла.

### Начальные условия задачи:

$\Delta|_{t=0} = 0$  – отсутствие твердой фазы металла;

$\theta_1^*|_{t=0} = 0$  – температура заливаемого жидкого металла;

$\theta_3^*|_{t=0} = \theta^*$  – начальная температура формы;

$\theta_H$  – температура опорного наполнителя;

$\theta_2^*$  – температура кристаллизации металла.

### Граничные условия задачи:

Плоскости симметрии  $U_2 = 0, \quad \sigma_{21} = 0, \quad q_{\Pi} = 0.$

На поверхностях  $S_1, S_3$

$$\sigma_{11}|_{S_1} = -P; \quad \sigma_{12}|_{S_1} = 0; \quad \sigma_{11}|_{S_3} = -P_2;$$

$$\sigma_{12}|_{S_3} = -\Psi \frac{V_{ck}}{V^*} \cos(n_1 x_1); \quad q_{\Pi}|_{S_3} = \alpha^* (\theta_H - \theta_2),$$

где  $V_{ck}$  – скорость скольжения материала формы относительно опорного наполнителя;  $V^*$  – нормирующая скорость;  $\Psi$  – параметр, характеризующий условия трения между формой и опорным наполнителем;  $q_{\Pi}|_{S_3}$  – плотность теплового потока по нормали к поверхности  $S_3$ ;  $\alpha^*$  – коэффициент теплообмена между ОФ и опорным наполнителем.

В целом результаты моделирования показывают, что наибольшие перепады температур возникают между первым и вторым слоями ОФ, а максимальные значения напряжений и деформаций наблюдаются в первом слое формы.

Было установлено, что интервал времени на характер распределения температур влияния не оказывает. В первом слое ОФ наблюдается рост температуры в течение первых 10 с, во втором слое – 40 с, в третьем слое – 50 с с момента заполнения ОФ расплавом, после которого температу-



тической оболочковой формы, позволяющая рассчитывать температурные поля в форме и затвердевающей отливке, толщину затвердевшего слоя отливки, напряжения, деформации и перемещения слоев оболочки относительно друг друга, а также ферростатическое давление металла на форму.

Результаты расчетов показывают, что при заливке металла наибольшие перепады температур возникают между первым и вторым слоями формы, а максимальные значения напряжений и деформаций характерны для первого слоя формы.

Установлен механизм влияния температурного перепада между слоями ОФ на трещиностойкость оболочек и его критическая величина, при достижении которой происходит либо расслоение оболочки, либо образование сквозных трещин, приводящих к разрушению формы.

Процесс прокаливания ОФ в опорном наполнителе не оказывает существенного влияния на образование трещин, поскольку перепад температур между слоями оболочки не достигает критического значения.

В результате анализа расчетных данных установлено, что на НДС электрофоретических ОФ во время проковки большое влияние оказывает скорость нагрева ОФ и, как следствие, перепад температур по толщине формы. Установлено, что наибольшая вероятность образования трещин в электрофоретических формах возникает в средних слоях холодных форм, заливаемых жидким металлом за счет высоких напряжений, вызванных фазовым расширением кварца при температуре около 600 °С [7 – 9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинокоев, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. А. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
2. Евстигнеев, А. И. Решение проблем формообразования в литье по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко // Литейное производство. – 2012. – № 9. – С. 40-43.
3. Специальные технологии литейного производства: учеб. пособие. Ч. 2 / под общ. ред. А. И. Евстигнеева, Е. А. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2012. – 436 с.
4. Свиридов, А. В. Изготовление оболочковых литейных форм с использованием электрофореза / А. В. Свиридов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – № 1. – С. 61-66.
5. Литье по выплавляемым моделям / под ред. Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
6. Пат. 2481917 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Суспензия для изготовления форм точного литья методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КнАГТУ». – № 2011142658/02; заявл. 19.12.11; опубл. 20.05.13. Бюл. № 15. – 2 с.
7. Пат. 2488458 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Способ изготовления выплавляемых моделей для получения оболочковых форм методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КнАГТУ». – № 2011142658/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 13. – 3 с.
8. Пат. 115260 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Устройство для изготовления форм точного литья методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КнАГТУ». – № 2011142759/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 10. – 3 с.
9. Совершенствование технологии формообразования электрофоретических оболочек / А. И. Евстигнеев, А. В. Свиридов, Э. А. Дмитриев, В. В. Петров // Литейное производство. – 2014. – № 9. – С. 32-34.

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**  
**BUILDING AND ARCHITECTURE**

**Сысоев О. Е., Добрышкин А. Ю., Нейн Сит Наинг**  
**O. Ye. Sysoev, A. Yu. Dobryshkin, Sit Naing Nyein**

**ВЛИЯНИЕ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ И ТЕМПЕРАТУРНОГО СДВИГА  
НА СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТОНКИХ ПЛАСТИН (МЕМБРАН)**

**INFLUENCE OF ATTACHED MASS AND TEMPERATURE ON THE SHEAR  
VIBRATIONS OF THIN PLATES (MEMBRANES)**

**Сысоев Олег Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

**Mr. Oleg Ye. Sysoev** – D.Sc. in Engineering, Professor, Dean of Cadastre and Civil Engineering Faculty Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: fks@knastu.ru.

**Добрышкин Артем Юрьевич** – старший преподаватель кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

**Mr. Artem Yu. Dobryshkin** – Senior Lecturer, Civil Engineering and Architecture Department Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

**Нейн Сит Наинг** – аспирант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

**Mr. Nyein Sit Naing** – a post-graduate student, Civil Engineering and Architecture Department Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

**Аннотация.** Лаборатория, исследующая строительные конструкции Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ), позволяет проводить эксперименты влияния присоединенных масс на колебания конструкций. В данной статье рассмотрен поставленный эксперимент для изучения влияния присоединенной массы на собственные колебания шарнирно-опертой пластины при температурном сдвиге. С помощью эксперимента удалось выявить закономерности влияния градиента температур на собственные колебания пластины с присоединенной массой. С помощью индукционных акселерометров измерены вынужденные колебания тонкой пластины, несущей присоединенную массу, при температурном сдвиге. Пластина прямоугольная в плане. Способ закрепления – шарнирно-опертая по краям. Шарнирно-опертые пластины широко распространены в строительстве. Исследований подобного рода не существует. Расчет проводился на основании общего уравнения колебания пластин. Пластина идеализирована в плоскости, перпендикулярной поверхности. Присутствуют допущения о неидеальной упругости материала, о нелинейности колебаний.

**Summary.** The laboratory, which studies building constructions, of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (KnASTU) allows carrying out experiments of influence of attached masses on the structural vibrations. In this article, we consider the experiments performed to study the effect of an attached mass on the natural oscillations of a hinged-supported plate under a temperature shift. With the help of the experiment it was possible to reveal the regularities of the influence of the temperature gradient on the natural oscillations of a plate with an attached mass. With the help of induction accelerometers, forced oscillations of a thin plate bearing an attached mass are measured under temperature shear. The plate is rectangular in plan. The method of fastening is articulated at the edges. Hinged-supported plates are widely distributed in construction. There is no research of this kind. The calculation was based on the general equation of plate oscillation. The plate is idealized in a plane perpendicular to the surface. There are assumptions about the imperfect elasticity of the material, the nonlinearity of the oscillations.

**Ключевые слова:** пластина, нелинейные колебания, модель устойчивости.

**Key words:** plate, nonlinear oscillations, stability model.

УДК 624.074.434

Широкое использование пластин в строительстве и машиностроении обусловлено простотой изготовления и эффективности с точки зрения прочности геометрической формы пластин. Возникновение собственных колебаний от интенсивных динамических нагрузок при эксплуатации таких конструкций не ограничивает эксплуатацию шарнирно-опертых пластин. Явления данного рода зачастую сопровождаются изменением широкого спектра температур. Хотя данное обстоятельство изучено не в полной мере, эксплуатация пластин присутствует. И интерес к анализу динамики тонких пластин очень высок в широких сферах деятельности [1-4].

Для исследования влияния присоединенной массы при температурном сдвиге в лаборатории строительных конструкций КнАГТУ проведен специальный эксперимент. Опытный образец, находящийся в специальном стенде (см. рис. 1), подвергался резкому изменению температурного режима при наличии собственных колебаний.

Данная работа отражает исследования собственных колебаний тонкой прямоугольной пластины в плане, шарнирно-опертой с двух сторон. Получены уравнения собственных колебаний пластины, согласно общепринятой теории колебаний пластин, а также экспериментальные данные, отражающие зависимость влияния присоединенной массы на собственные частоты колебаний оболочки, при сдвиге температур. Колебания с умеренными амплитудами собственных колебаний были разложены, согласно уравнениям [5; 6]. Дискретная нелинейная модель колебаний тонкой пластины, опертой по краям, полученная при проведении исследований, исследовалась с применением метода многих масштабов.

Образец представляет собой тонкую пластину, прямоугольную в плане, из оцинкованной стали. Геометрические характеристики объекта:  $L = 890$  мм,  $B = 370$  мм,  $H = 0,4$  мм. Образец представлен на рис. 1.

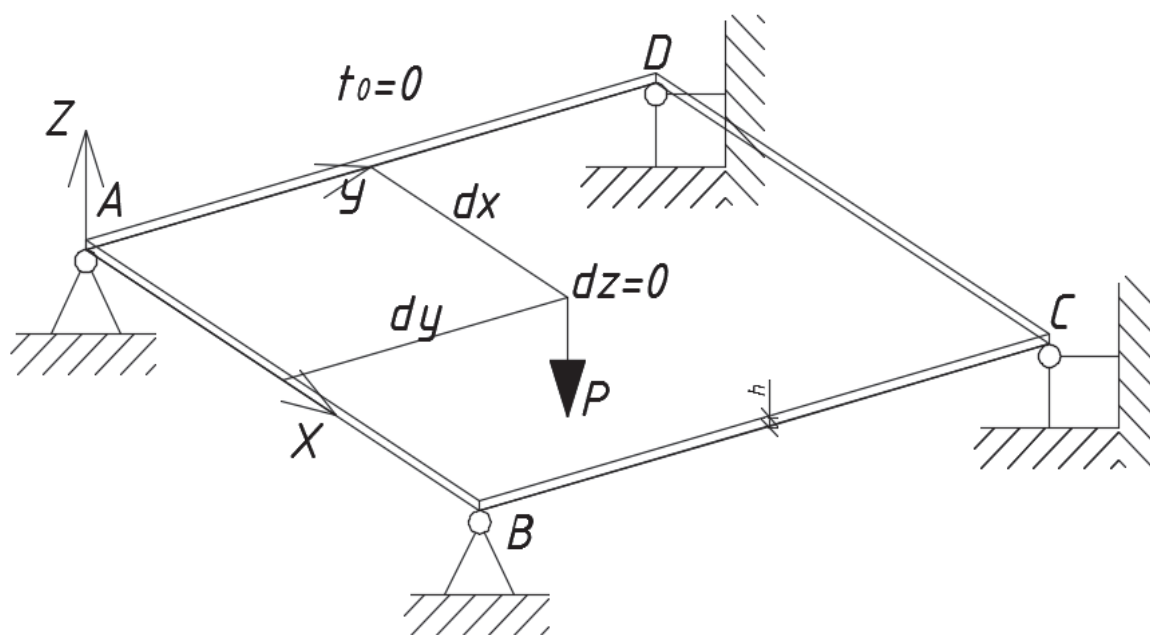


Рис. 1. Образец оболочки

Образец состоит из стали марки 3, полукипящей. Модель оболочки закрепляется в стальном стенде. Данный стенд имеет форму столика, изготовленного из равнополочных уголков L45×3 сталь ст3сп, специально для проведения данного эксперимента. Шарнирная опертость реализована с помощью стеклянных пластин 30×30 мм толщиной 4 мм, уложенных в форме уголка. Граничные условия максимально приближены к реальным. Присоединенную массу представляет акселерометр BC 110, расположенный на образце, согласно рис. 2. Акселерометр BC 110 измеряет частоту колебаний с максимальной точностью.



Рис. 2. Типовой акселерометр BC 110

Акселерометр BC 110 передаёт показания на усилитель сигнала, который, усиливая сигнал, передаёт далее по цепи на аналого-цифровой преобразователь, передающий сигнал далее на персональный компьютер. Термометр расположен максимально близко к оболочке, но не касается её, передаёт показания на программное обеспечение «Z-lab», где в купе с данными колебаний отражаются зависимости одних параметров от других в режиме реального времени. Программное обеспечение «Z-lab» позволяет отображать и записывать колебания в реальном времени. Нагревательный элемент создаёт градиент температур. Блок-схема экспериментальной установки для проведения эксперимента представлена на рис. 3.

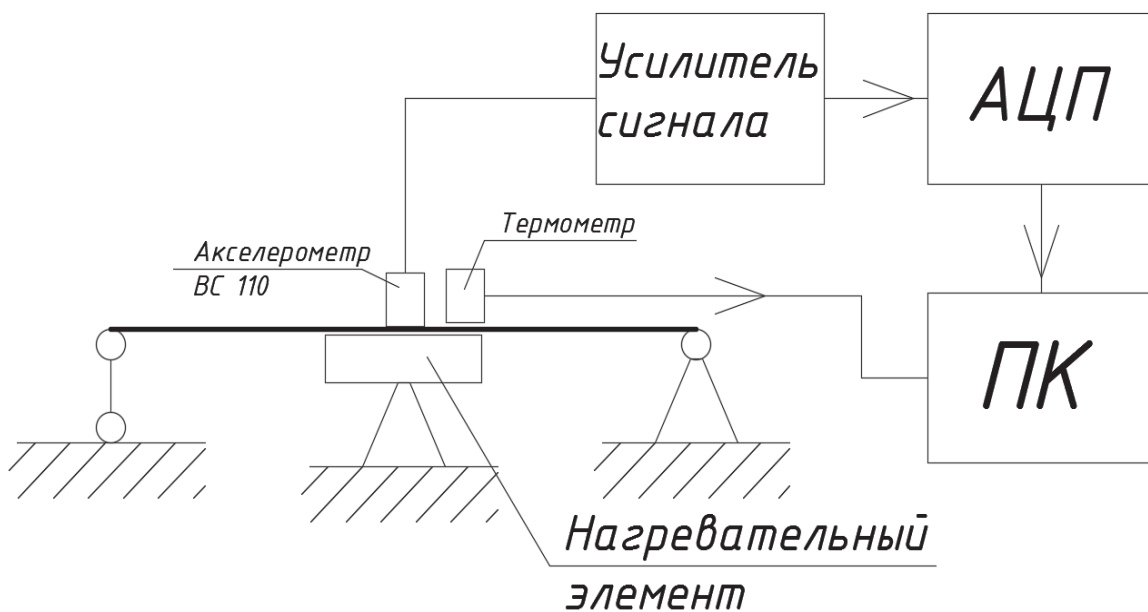


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки

Эксперимент направлен на изучение собственных колебаний пластины в «покое» и выявление зависимостей вынужденных и собственных колебаний от перепада температур. Вынужденные колебания, переходя в собственные колебания, задавались с помощью удара испытательным молотком AU03. Также присутствовал бесконтактный датчик измерения колебаний пластины, не отображенный на схеме. Данный датчик является проверяющим, служит для проверки и отбраковки ошибочных данных показаний акселерометра BC 110.

Перейдем к рассмотрению математической модели собственных колебаний пластины, прямоугольной в плане, шарнирно-опертой с двух сторон. Процесс колебания плоской тонкой однородной пластины описывается уравнением

$$u_{tt} = a^2 (u_{xx} + u_{yy}).$$

Функция  $u(x, y, t)$  характеризует прогиб пластины. Начальные условия описываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u(x, y, 0) &= \phi(x, y), \\ u_t(x, y, 0) &= \psi(x, y) \end{aligned} \right\}$$

а граничные условия

$$u_y(0, y, t) = 0, u_y(b_1, y, t) = 0,$$

$$u_x(x, 0, t) = 0, u_x(x, b_2, t) = 0.$$

$X''(x) + \nu X(x) = 0$  – уравнение второго порядка, однородное линейное дифференциальное с постоянными коэффициентами. Параметр  $\nu$  является значимым. Для решения следует рассмотреть случаи нахождения параметра  $\nu$  выше нуля, равным нулю, ниже нуля. Тогда, учитывая граничные условия, выражаем:

$$X'(x) = D_1 \sqrt{\nu} \sin \sqrt{\nu} x + D_2 \sqrt{\nu} \cos \sqrt{\nu} x;$$

$$X'(0) = \sqrt{\nu} D_2 = 0 \Rightarrow D_2 = 0, \text{ т.к. } \nu \neq 0;$$

$$X'(b_1) = -D_1 \sqrt{\nu} \sin \sqrt{\nu} b_1 = 0.$$

$D_1 \neq 0$ , т.к. значимыми являются нетривиальные решения,  $\nu \neq 0$ , следовательно

$$\sin \sqrt{\nu} b_1 = 0;$$

$$\sqrt{\nu} b_1 = \pi n, n \in Z;$$

$$\nu = \left( \frac{\pi n}{b_1} \right)^2, n \in Z.$$

Из этого следует, что только при значениях, равных  $\nu_n = \nu = \left( \frac{\pi n}{b_1} \right)^2$ , существует нетривиальное решение уравнений, имеющее вид

$$X_n(x) = \cos \frac{\pi n}{b_1} x.$$

Аналогично получаем решение задачи

$$Y_m(y) = \cos \frac{\pi m}{b_2} y;$$

$$\mu_m = \left( \frac{\pi m}{b_2} \right)^2.$$

Собственные значения  $\lambda_{n,m} = \left( \frac{\pi n}{b_1} \right)^2 + \left( \frac{\pi m}{b_2} \right)^2$ , соответствующие собственной функции:

$$v_{n,m} = A_{n,m} \cos \frac{\pi n}{b_1} y \cos \frac{\pi m}{b_2} y,$$

где  $A_{n,m}$  – некоторый постоянный множитель.

Представим его так, чтобы функция  $v_{n,m}$  была целократно единице:

$$\int_0^{b_1} \int_0^{b_2} v_{n,m}^2 dx dy = A_{n,m}^2 \int_0^{b_1} \cos^2 \frac{\pi n}{b_1} x dx \int_0^{b_2} \cos^2 \frac{\pi m}{b_2} y dy = 1.$$

Интегралы вычислены отдельно

$$\begin{aligned} \bullet \int_0^{b_1} \cos^2 \frac{\pi n}{b_1} x dx &= \int_0^{b_1} \frac{1 + \cos \frac{2\pi n}{b_1} x}{2} dx = \int_0^{b_1} \frac{1}{2} dx + \int_0^{b_1} \cos \frac{2\pi n}{b_1} x dx = \frac{1}{2} x \Big|_0^{b_1} + \frac{b_1}{2\pi n} \sin \frac{2\pi n}{b_1} x \Big|_0^{b_1} = \\ &= \frac{1}{2} b_1 + \frac{b_1}{2\pi n} \sin 2\pi n - \frac{b_1}{2\pi n} \sin 0 = \frac{1}{2} b_1; \end{aligned}$$

$$\bullet \int_0^{b_2} \cos^2 \frac{\pi m}{b_2} y dy = \frac{1}{2} b_2.$$

$$A_{n,m}^2 \frac{1}{2} b_1 \frac{1}{2} b_2 = 1 \quad ; \quad A_{n,m}^2 = \frac{4}{b_1 b_2} \Rightarrow A_{n,m} = \sqrt{\frac{4}{b_1 b_2}} ;$$

$$v_{n,m} = \sqrt{\frac{4}{b_1 b_2}} \cos \frac{\pi n}{b_1} y \cos \frac{\pi m}{b_2} y.$$

Количество целочисленных решений  $n$  и  $m$  уравнения

$$\lambda_{n,m} = \left( \frac{\pi n}{b_1} \right)^2 + \left( \frac{\pi m}{b_2} \right)^2$$

зависит от числа собственных функций, принадлежащих  $\lambda_{n,m}$ .

Значения  $\lambda_{n,m}$  принадлежат решению уравнения  $T'' + a^2 \lambda T = 0$

$$T_{n,m}(t) = \overline{B_{n,m}} \cos \sqrt{\lambda_{n,m}} a t + \overline{\overline{B_{n,m}}} \sin \sqrt{\lambda_{n,m}} a t,$$

где  $\overline{B_{n,m}}$  и  $\overline{\overline{B_{n,m}}}$  – произвольные константы.

Исходя из дополнительных условий, начальное решение задачи  $u_{t,t} = a^2 (u_{x,x} + u_{y,y})$  будет найдено с помощью частных решений, которые, в свою очередь, имеют представление

$$u_{n,m}(x, y, t) = v_{n,m}(x, y) \left( \overline{B_{n,m}} \cos \sqrt{\lambda_{n,m}} a t + \overline{\overline{B_{n,m}}} \sin \sqrt{\lambda_{n,m}} a t \right).$$

Вычисляем общее решение

$$u(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \overline{B_{n,m}} \cos \sqrt{\lambda_{n,m}} a t + \overline{\overline{B_{n,m}}} \sin \sqrt{\lambda_{n,m}} a t \right) v_{n,m}(x, y),$$

где  $v_{n,m}(x, y)$  определяется решением, а коэффициенты  $\overline{B_{n,m}}$  и  $\overline{\overline{B_{n,m}}}$  равны

$$\overline{B_{n,m}} = \int_0^{b_1} \int_0^{b_2} \varphi(x, y) v_{n,m}(x, y) dx dy = \sqrt{\frac{4}{b_1 b_2}} \int_0^{b_1} \int_0^{b_2} \varphi(x, y) \cos \frac{\pi n}{b_1} x \cos \frac{\pi m}{b_2} y dx dy,$$

$$\overline{\overline{B_{n,m}}} = \frac{1}{\sqrt{a^2 \lambda_{n,m}}} \sqrt{\frac{4}{b_1 b_2}} \int_0^{b_1} \int_0^{b_2} \psi(x, y) \cos \frac{\pi n}{b_1} x \cos \frac{\pi m}{b_2} y dx dy.$$

Данное уравнение показывает наличие зависимости прогиба пластины от граничных условий. Граничные условия отражают характеристики материала пластины, которые зависят от температуры пластины. Изменение градиента температуры влияет на колебания пластины.

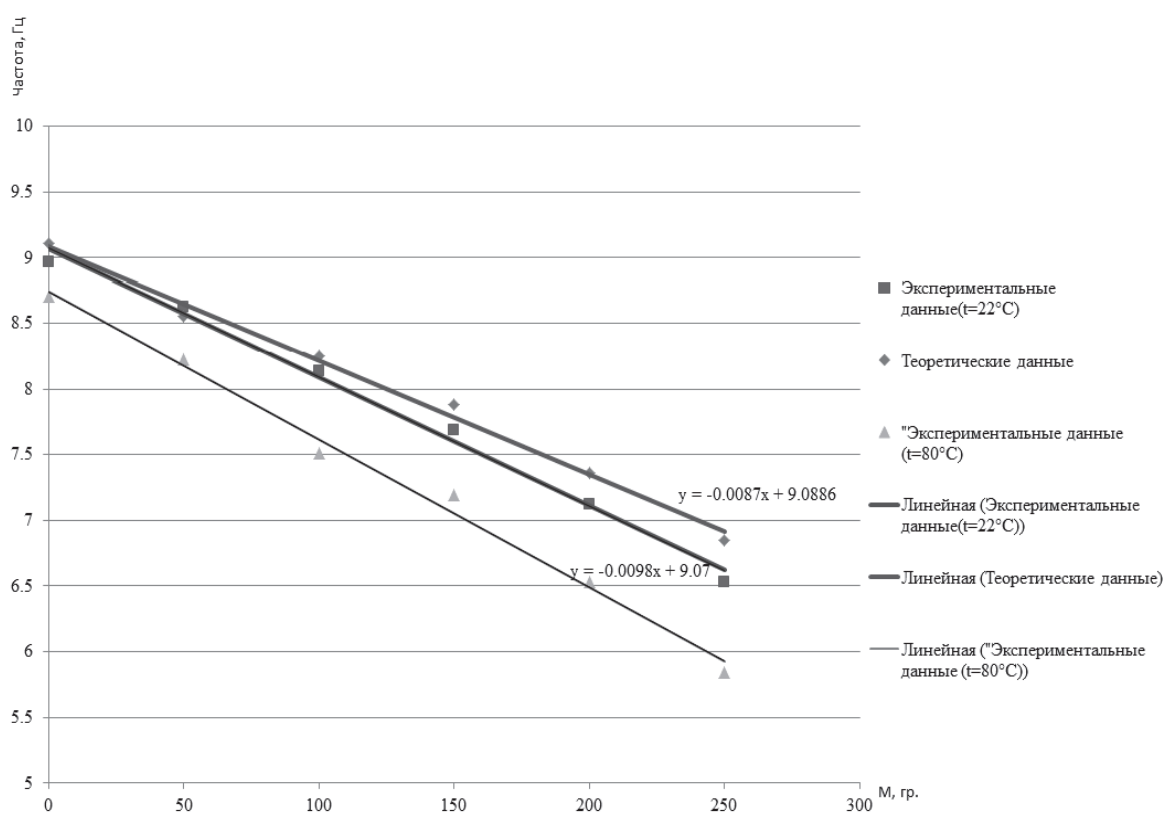


Рис. 4. Зависимость частоты колебаний оболочки от величины присоединенной массы

Рис. 4 отражает зависимость результатов расчета собственных частот и форм колебаний стальной прямоугольной в плане пластины от присоединенной массы. Частоты колебаний указаны в герцах. В результате становится понятно несовпадение теоретических данных и расчетных данных. Разница теоретических и экспериментальных данных при температуре  $t = 22^\circ\text{C}$  и при присоединенной массе менее 150 г составляет менее 5%. Данный факт говорит о точности расчета собственных колебаний пластины, несущей малую присоединенную массу, эксперимент проведен максимально точно. Разница в теоретических и экспериментальных данных при температуре  $t = 22^\circ\text{C}$  и при присоединенной массе более 150 г составляет более 5%. Это говорит о неточности современных теоретических данных, расчет с помощью которых приведет к данным, несоответствующим практическим более чем на 5%. Разница теоретических и экспериментальных данных при температуре  $t = 70^\circ\text{C}$  и при присоединенной массе любой величины составляет более 5%. Требуется уточнение расчетной модели колебаний пластин. Максимальное несовпадение теоретиче-

ских и расчетных данных происходит при максимальной присоединенной массе, использованной в исследовании – 250 г. Разница составляет 15 %. При присоединенной массе в 50 г разница составляет 1 %. Данное обстоятельство указывает на необходимость проведения дополнительных исследований колебаний пластин с участием присоединенной массы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, Л. В. Динамика пластин и оболочек с сосредоточенными массами / Л. В. Андреев, А. Л. Дышко, И. Д. Павленко. – М.: Машиностроение, 1988. – 195 с.
2. Малышев, А. П. Дифференциальная модель частотно-независимого рассеяния энергии при колебаниях / А. П. Малышев // ПММ. – 0000. – Т. 66, вып. 1. – С. 107-133.
3. Григолюк, Э. И. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин / Э. И. Григолюк, Г. М. Куликов. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
4. Куликов, Г. М. Нелинейные колебания многослойных пластин / Г. М. Куликов, Ю. В. Кулешов // Вестник Тамб. гос. ун-та. – 0004. – Т. 9, вып. 0. – С. 064067.
5. Вольмир, А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1970. – 430 с.
6. Сысоев, О. Е. Влияние присоединенной массы на вынужденные колебания разомкнутых оболочек / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, Сит Найнг Нейн // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2016. – № III-1(27). – 110 с.