

**Редакционный совет:**

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф.,  
председатель  
Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф.,  
зам. председателя  
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.,  
зам. председателя  
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.,  
секретарь  
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.  
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.  
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.  
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.  
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.  
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.  
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

**Редколлегия**

Главный редактор  
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.,  
заслуженный деятель науки Российской  
Федерации

**Заместители главного редактора:**

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.  
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.  
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

**Члены редколлегии:**

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)  
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Зубчанинов В.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Клименко С.А. д-р техн. наук, проф. (Украина)  
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф.,  
академик РАН (Россия)  
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Машин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)  
Мирсалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.  
(Азербайджан)  
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф., академик  
РАН (Россия)  
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф.  
(Беларусь)  
Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

**Адрес редакции**

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 54-15-19, 55-55-24, 41-98-48,  
41-98-03, +7(906)6639898  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: tiostu@mail.ru

Зарег. в Федеральной службе по  
надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № ФС77-47351  
от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс 29504  
по объединенному каталогу  
«Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2015

## Содержание

### Естественные науки

Лобанов И.Е. Аналитическое решение для плотности теплового потока при натекании турбулентной струи на плоскую стенку.....	3
Жердов В.А., Маркин Н.И., Москвитин С.А., Татарченков Н.В., Лунин К.С. Деформации пластического изгиба трубы на малый угол.....	9
Смирнов Н.Н., Савин Л.А., Майоров С.В., Попиков А.А. Решение задач нелинейной динамики ротора в активных магнитных подшипниках с учетом отклонений формы измерительных поверхностей.....	13
Шукина Н.А. Эффекты второго порядка в задаче о концентрации напряжений около треугольного отверстия.....	21
Машиков Е.А. Упруго-гидродинамическая задача моделирования лепесткового подшипника в высокоскоростных роторных системах.....	28

### Моделирование технологических процессов

Огородникова О.М., Мартыненко С.В., Проничев И.М. Компьютерное моделирование литой детали «рама боковая» с учетом усадочной пористости.....	36
Бабанков В.А., Добриков С.А. Особенности газовых взрывов в реверсивных жаротрубных газовых топках.....	41

### Конструирование, расчеты, материалы

Цепенников М.В., Сметанников О.Ю., Повышев И.А. Идентификация параметров численной методики расчета разрушения конструкций из композиционных материалов.....	46
Бердник А.Н. Пути согласования режимов совместной работы поршневого двигателя и системы воздухооборудования с двухступенчатым наддувом.....	54
Авраменко В.А., Флейта А.В., Эйсымонт Е.И., Акула И.П., Чекан Н.М., Овчинников Е.В. Нанокристаллические композиционные покрытия на основе карбонитридов рефракторных металлов и алмазоподобного углерода инженерно-технического назначения.....	62
Зибров Г.В., Старов В.Н., Смоленцев Е.В., Попов А.В. Варианты проектных решений и выбора оптимальных направлений, обеспечивающих генерирование новых технических решений.....	68
Корнеев Ю.С., Гордон В.А., Корнеева Е.Н., Играшкина Н.А., Корнеева Т.Ю. Влияние параметров пускозащитной муфты на величину фрикционного момента.....	75
Судник Л.В., Петров И.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Моисеев В.А. Перспективные направления применения биметаллов в машиностроении.....	80

### Машиностроительные технологии и инструменты

Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. Классификация конструктивно сложных поверхностей деталей как подготовительный этап проектирования технологии механической обработки.....	89
Трунов С.Н. Параметрическое макропрограммирование при реализации функций системы ЧПУ.....	95
Сычев Е.А., Муравьев А.А., Тарпанов А.С. Эффективность методов аддитивного формообразования деталей в машиностроении.....	102
Бочкарев П.Ю., Захаров О.В., Скляров И.А. Выбор технологических параметров при абразивно-струйной обработке внутренних поверхностей.....	107
Носенко В.А., Александров А.А. Распределения ширины зёрен шлифовальных порошков из карбида кремния черного различных зернистостей.....	111

### Приборостроение и биотехнические системы

Новикова И.Н., Искоростинский Е.В., Искоростинский Н.Е., Дунаев А.В. Исследование влияния общей воздушной криотерапии на параметры микроциркуляторно-тканевых систем организма человека.....	118
--	-----

### Контроль, диагностика, испытания

Баженов И.Н., Иванов Ю.Б. Способ двухпараметрического контроля толщины немагнитных металлических покрытий.....	127
Карпов И.Г., Зырянов Ю.Т., Рязанов И.Г. Одномерные распределения тринomialного типа для последовательности независимых испытаний.....	133
Рожков С.В., Шадский Г.В., Шадский В.Г. Диагностика опор шпиндельных узлов металлорежущих станков с использованием искусственных нейронных сетей.....	139
Зубарев Ю.М., Нечаев К.Н., Кочанов Ю.С., Лукс А.Э. Разработка технологии испытаний цилиндрических изделий.....	144

*Editorial council*

**Golenkov V.A.** *Doc. Sc. Tech., Prof., president*  
**Pilipenko O.V.** *Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president*  
**Radchenko S.Y.** *Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president*  
**Borzenkov M.I.** *Candidate Sc. Tech., Assistant Prof, secretary*  
**Astafichev P.A.** *Doc. Sc. Law., Prof.*  
**Ivanova T.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Kolchunov V.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Konstantinov I.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Novikov A.N.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Popova L.V.** *Doc. Sc. Ec., Prof.*  
**Stepanov Y.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

*Editorial Committee*

*Editor-in-chief*

**Stepanov Y.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof., honored worker of science of Russian Federation*

*Editor-in-chief Assistants*

**Barsukov G.V.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Gordon V.A.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Podmasteryev K.V.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

*Member of editorial board*

**Babichev A.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Buchach A.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)*  
**Vdovin S.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Dyakonov A.A.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Emelyanov S.G.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Subchaninov V.G.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Ivanov B.R.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Kirichek A.V.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Klimenko S.A.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)*  
**Kolesnikov K.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS (Russia)*  
**Kopylov Y.R.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Malinin V.G.** *Doc. Sc. Ph. - Math, Prof. (Russia)*  
**Mirsalimov V.M.** *Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Azerbaijan)*  
**Mulyukin O.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Osadchy V.Ya.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Panin V.E.** *Doc. Sc. Tech., Prof. Academician of RAS (Russia)*  
**Raspopov V.Ya.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Smolenzev V.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*  
**Starovoitov A.I.** *Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Belarus)*  
**Heifets M.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)*

*Executive secretary:*

**Tyukhta A.V.** *Candidate Sc. Tech.*

*Address*

302020 Orel,  
Naugorskoe Chosse, 29  
(4862) 54-15-19, 55-55-24, 41-98-48,  
41-98-03, +7(906)6639898  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: tiostu@mail.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-47351 from 03.11.2011

Index on the catalogue of the «*Pressa Rossii*»  
**29504**

© State University ESPC, 2015

## Contents

### Natural sciences

<i>Lobanov I.E.</i> The exact analytical decision for density thermal flow at accumulate turbulent of a jet on a flat wall.....	3
<i>Zherdov V.A., Markin N.I., Moskvitin S.A., Tatarchenkov N.V., Lunin K.S.</i> Deformation plastic bending pipes at a small angle.....	9
<i>Smirnov N.N., Savin L.A., Mayorov S.V., Popikov A.A.</i> Solution nonlinear rotor dynamics problems on active magnetic bearings with shape deviations of the measuring sleeve .....	13
<i>Shchukina N.A.</i> Second-order effects in the problem of the concentration voltage about triangular opening.....	21
<i>Mashkov Ye.A.</i> Elasto-hydrodynamic modeling in high-speed rotary foil-bearing systems .....	28

### Modelling of technological processes

<i>Ogorodnikova O.M., Martynenko S.V., Pronichev I.M.</i> Computer simulation of the molded part «frame side» taking into account the shrinkage porosity.....	36
<i>Babankov V.A., Dobrikov S.A.</i> Features of gas explosion in two-pass reverse fire-tube boiler.....	41

### Designing, calculations, materials

<i>Tsepennikov M.V., Smetannikov O.Yu., Povyshhev I.A.</i> Parameters identification numerical techniques calculation of fracture structures of composite materials.....	46
<i>Berdnik A.N.</i> Ways of coordination modes of the joint operation of the piston engine and system air supply with two-stage supercharged.....	54
<i>Avramenko V.A., Fleyta A.V., Eysymont Ye.I., Akula I.P., Chekan N.M., Ovchinnikov Ye.V.</i> Nanocrystalline composite coatings based carbonitride refractory metals and DLC engineering and technical purpose .....	62
<i>Zibrov G.V., Starov V.N., Smolentsev E.V., Popov A.V.</i> Project alternatives and selection optimal direction providing generation of new technical solutions.....	68
<i>Korneev Yu.S., Gordon V.A., Korneeva E.N., Igrashkina N.A., Korneeva T.Yu.</i> The influence of parameters of start-protective clutch on the size of the frictional moment .....	75
<i>Sudnik L.V., Petrov I.V., Galinovsky A.L., Kolpakov V.I., Moiseev V.A.</i> Advanced applications of bi-metal in mechanical engineering.....	80

### Machine building technology and toolware

<i>Kudryashov E.A., Smirnov I.M.</i> Classification of structural complex parts surfaces as preparatory stage design technology machining.....	89
<i>Trunov S.N.</i> Parametric macro programming in implementation of functions CNC.....	95
<i>Sychev E.A., Muravev A.A., Tarapanov A.S.</i> The efficiency of the methods of additive manufacturing details in mechanical engineering .....	102
<i>Bochkarev P.Yu., Zakharov O.V., Sklyarov I.A.</i> Choice of technological parameters with abrasive blasting inner surface.....	107
<i>Nosenko V.A., Aleksandrov A.A.</i> Width distribution of grain grinding powders silicon carbide black different grits.....	111

### Instrument making and biotechnological system

<i>Novikova I.N., Iskorostinskiy E.V., Iskorostinskiy N.E., Dunaev A.V.</i> The study of the influence of whole body cryotherapy on the parameters of microcirculatory-tissue systems of the human body....	118
---	-----

### Control, diagnostics, tests

<i>Bazhenov I.N., Ivanov Yu.B.</i> Two-parameter control thickness of the nonmagnetic metal coating method.....	127
<i>Karpov I.G., Zyryanov Yu.T., Ryazanov I.G.</i> Dimensional distribution trinomial type for sequence of independent trials.....	133
<i>Rozhkov S.V., Shadskiy G.V., Shadskiy V.G.</i> Diagnostics supports spindles of machine tools using artificial neural networks.....	139
<i>Zubarev Yu.M., Nechayev K.N., Kochanov Yu.S., Luks A.E.</i> Development of technology testing cylindrical products.....	144

**ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

УДК 532.517.4:536.24

И.Е. ЛОБАНОВ

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПРИ НАТЕКАНИИ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ НА ПЛОСКУЮ СТЕНКУ**

*Для условий камер сгорания энергетических установок, в которых используются тяжелофракционные жидкие топлива, имеющих плоскую поверхность, на которую происходит натекание высокотемпературного излучающего, поглощающего и рассеивающего тепловую энергию газа детерминируется локальная плотность теплового потока и ее профиль в турбулентном пограничном слое.*

**Ключевые слова:** теплообмен, тепловой поток, математическое моделирование, турбулентная струя, плоская стенка.

Условия камер сгорания энергетических установок, в которых используются тяжелофракционные жидкие топлива (топочные устройства, дизельные двигатели, и т.п.) характеризуются тем, что движущееся рабочее тело имеет в своем составе твердые микрочастицы сажи – мощные генераторы излучения. С целью детерминирования теплового потока в турбулентном пограничном слое с учетом сложного (радиационно–конвективного) характера теплообмена используются интегро–дифференциальные уравнения для турбулентного пограничного слоя на криволинейной поверхности при условии радиационно–конвективного теплообмена, которые являются обобщением известных интегральных соотношений Кармана–Кружилина. Подобный подход ранее с успехом использовался в работах [1–5]. Самым сложным случаем с точки зрения сложного теплообмена следует признать условия радиационно–конвективного теплообмена в полуразделенных камерах сгорания быстроходных дизелей, поэтому в рамках данной работы точное аналитическое детерминирование плотности теплового потока в турбулентном пограничном слое при радиационно–конвективном теплообмене для условий натекания турбулентной струи на криволинейную стенку было получено именно для этих условий.

**Теоретическое детерминирование профиля нестационарной плотности теплового потока в турбулентном пограничном слое для условий натекания турбулентной струи на криволинейную стенку при радиационно–конвективном теплообмене.**

Обобщенное интегральное соотношение Кружилина, в турбулентном пограничном слое для условий натекания турбулентной струи на криволинейную стенку при радиационно–конвективном теплообмене, использованное в работах [1–5], выглядит следующим образом:

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta_T} H_3^\gamma U (T_\infty - T) dy = \frac{H_{1_0} H_{3_0}^\gamma}{\rho c_p} (q_w + (E_- - E_+)_{l_0}^{\delta_T}), \quad (1)$$

где  $x, y$  – продольная и поперечная координаты соответственно;

$U$  – продольная составляющая скорости;

$T, T_\infty$  – текущая температура газа и температура газа за пограничным слоем соответственно;

$q_w$  – плотность теплового потока на стенке;

$\rho, c_p$  – плотность и теплоемкость газа при постоянном давлении соответственно;

$\delta_T$  – толщина теплового пограничного слоя;

$E_+, E_-$  – плотности потока радиационного излучения в направлении оси  $y$  и против оси  $y$  соответственно;

$H_{1_0}, H_{3_0}^\gamma$  – коэффициенты Ламе при  $y=0$  (для плоской постановки задачи  $\gamma=0$ ; для осесимметричной постановки задачи  $\gamma=1$ ).

Профили скоростей и температур моделируются согласно «степенным законам»:

$$U = U_m (y/\delta_m)^a; \quad (2)$$

$$T_\infty - T = (T_\infty - T_w) \left(1 - (y/\delta_T)^a\right), \quad (3)$$

где  $T_w$  – температура стенки;

$U_m$  – скорость на границе пограничного слоя;

$\delta_m$  – толщина динамического пограничного слоя;  $a$  – константа.

Для продольной составляющей скорости  $U$  в [1–5] выведено следующее соотношение:

$$U = Mb_0^{0,5} x^{-0,5} U_0 (y/\delta_m)^a, \quad (4)$$

где  $U_0 = U_m|_{x=R}$ ;

$R$  – расстояние до точки нарастания динамического пограничного слоя);

$b_0$  – текущая высота камеры сгорания;

$M$  – константа.

Выражение для плотностей потока радиационного излучения для рассматриваемых условий, согласно [1–5], равно:

$$E_+ - E_- = \varepsilon_w \sigma_0 (T_w^4 - T_\infty^4) e^{-\beta_K y}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_w$  – степень черноты рабочего тела;

$\sigma_0$  – постоянная Стефана–Больцмана (коэффициент излучения абсолютно черного тела);

$\beta$  – коэффициент диффузности излучения;

$K$  – коэффициент ослабления лучистой энергии.

В работах [1–5] было сгенерировано следующее интегральное соотношение, обобщающее (1):

$$\frac{d}{dx} \int_{y_1}^{y_2} H_{3_0}^\gamma U (T_\infty - T) dy = \frac{H_{1_0} H_{3_0}^\gamma}{\rho c_p} \left( q_k|_{y_1}^{y_2} + (E_- - E_+) |_{y_1}^{y_2} \right), \quad (6)$$

где  $y_2$  и  $y_1$  – соответственно верхний и нижний предел интегрирования части турбулентного пограничного слоя.

**Профиль нестационарной плотности теплового потока в турбулентном пограничном слое для условий натекания турбулентной струи на плоскую стенку при радиационно–конвективном теплообмене.**

После соответствующей подстановки коэффициентов Ламе для плоской поверхности, а также (2)–(5) в интегральное соотношение (6), получим:

$$\frac{d}{dx} \int_{y_1}^{y_2} x^{0,5} Mb_0^{0,5} U_0 (T_\infty - T_w) \left( \frac{y}{\delta_m} \right)^a \left( 1 - \frac{y}{\delta_T} \right)^a dy = \frac{x}{\rho c_p} \left( q_k|_{y_1}^{y_2} + \varepsilon_w \sigma_0 (T_w^4 - T_\infty^4) e^{-\beta_K y} |_{y_1}^{y_2} \right). \quad (7)$$

Преобразуем выражение (7) к следующему виду:

$$\frac{d}{dx} \int_{y_1}^{y_2} x^{0,5} Mb_0^{0,5} U_0 (T_\infty - T_w) \delta_m^{-a} (y^a - \delta_T^{-a} y^{2a}) dy = \frac{x}{\rho c_p} \left( q_k|_{y_1}^{y_2} + \varepsilon_w \sigma_0 (T_w^4 - T_\infty^4) e^{-\beta_K y} |_{y_1}^{y_2} \right). \quad (8)$$

В дальнейшем рассмотрим бесконечно малый участок турбулентного пограничного слоя, в пределах которого толщины динамического и теплового пограничных слоев можно признать постоянными:

$$\frac{d}{dx} \left( U_0 (T_\infty - T_w) \delta_m^{-a} x^{0,5} Mb_0^{0,5} (y^a - \delta_T^{-a} y^{2a}) \Big|_{y_1}^{y_2} \right) = \frac{x}{\rho c_p} \left( q_k \Big|_{y_1}^{y_2} + \varepsilon_w \sigma_0 (T_w^4 - T_\infty^4) e^{-\beta k y} \Big|_{y_1}^{y_2} \right). \quad (9)$$

После дифференцирования уравнение (9) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{1}{2} U_0 \delta_m^{-a} x^{-0,5} Mb_0^{0,5} (T_\infty - T_w) \left( \frac{y^{a+1}}{a+1} - \delta_T^{-a} \frac{y^{2a+1}}{2a+1} \right) \Big|_{y_1}^{y_2} = \frac{x}{\rho c_p} \left( q_k \Big|_{y_1}^{y_2} + \varepsilon_w \sigma_0 (T_w^4 - T_\infty^4) e^{-\beta k y} \Big|_{y_1}^{y_2} \right). \quad (10)$$

Для условий чистой конвекции, когда отсутствует излучение, при  $y_2 = \delta_T$ ,  $y_1 = y$  получим:

$$q_k(y) = -\frac{1}{2} \rho c_p U_0 \delta_m^{-a} x^{-0,5} Mb_0^{0,5} (T_\infty - T_w) \left( \frac{\delta_T^{a+1} - y^{a+1}}{a+1} - \frac{\delta_T^{2a+1} - y^{2a+1}}{2a+1} \delta_T^{-a} \right). \quad (11)$$

Преобразуем выражение (11) к следующему виду:

$$q_k(y) = -\frac{1}{2} \rho c_p U_0 \delta_m^{-a} x^{-0,5} Mb_0^{0,5} (T_\infty - T_w) \left( \frac{1}{a+1} (1 - (y/\delta_T)^{a+1}) - \frac{1}{2a+1} (1 - (y/\delta_T)^{2a+1}) \right). \quad (12)$$

Тепловой поток в стенку будет равен:

$$q_w = -\frac{1}{2} \rho c_p U_0 x^{-0,5} Mb_0^{0,5} (T_\infty - T_w) \delta_m^{a+1} \frac{a}{(a+1)(2a+1)}. \quad (13)$$

Профиль теплового потока характеризуется следующим отношением  $\bar{q} = q_k(y)/q_w$ :

$$\bar{q} = a^{-1} \left( (2a+1) (1 - (y/\delta_T)^{a+1}) - (a+1) (1 - (y/\delta_T)^{2a+1}) \right). \quad (14)$$

Профиль плотности теплового потока для плоской стенки при  $a=1/7$  приводится в [1].

Профиль плотности теплового потока в случае радиационно-конвективного теплообмена:

$$\bar{q} = \frac{\left[ \frac{1}{2} \rho c_p U_0 \delta_m^{-a} x^{-0,5} Mb_0^{0,5} (T_\infty - T_w) \delta_T^{a+1} \times \left( \frac{1}{a+1} (1 - (y/\delta_T)^{a+1}) - \frac{1}{2a+1} (1 - (y/\delta_T)^{2a+1}) \right) - \varepsilon_w \sigma_0 (T_\infty^4 - T_w^4) (e^{-\beta k \delta_T} - e^{-\beta k y}) \right]}{\left[ \frac{1}{2} \rho c_p U_0 \delta_m^{-a} x^{-0,5} Mb_0^{0,5} (T_\infty - T_w) \delta_T^{a+1} \frac{a}{(a+1)(2a+1)} - \varepsilon_w \sigma_0 (T_\infty^4 - T_w^4) (e^{-\beta k \delta_T} - 1) \right]}. \quad (15)$$

Анализ формулы (15) показывает, что наличие излучения увеличивает значение  $\bar{q}$  при прочих равных условиях, следовательно, оно делает профиль плотности теплового потока более заполненным. Последнее означает, что турбулентный пограничный слой при радиационно-конвективном теплообмене более заполнен, чем при чисто конвективном теплообмене [1–5].

Введя обозначение отношения радиационного теплообмена к конвективному:

$$\mathfrak{R} = \frac{E_+ - E_- \Big|_y^{\delta_T}}{q_k \Big|_0^{\delta_T}}, \quad (16)$$

получим следующий вид соотношения (15):

$$\bar{q} = \frac{1}{1 + \mathfrak{R}} \left\{ a^{-1} \left( (2a+1) (1 - (y/\delta_T)^{a+1}) - (a+1) (1 - (y/\delta_T)^{2a+1}) \right) + \mathfrak{R} \frac{E_+ - E_- \Big|_y^{\delta_T}}{E_+ - E_- \Big|_0^{\delta_T}} \right\}. \quad (17)$$

Теперь необходимо найти профиль плотности теплового потока при лучистом теплообмене:

$$\frac{E_+ - E_- \Big|_y^{\delta_T}}{E_+ - E_- \Big|_0^{\delta_T}} = \frac{\varepsilon_w \sigma_0 (T_\infty^4 - T_w^4) (e^{-\beta k \delta_T} - e^{-\beta k y})}{\varepsilon_w \sigma_0 (T_\infty^4 - T_w^4) (e^{-\beta k \delta_T} - 1)} = \frac{(e^{-\beta k \delta_T} - e^{-\beta k y})}{(e^{-\beta k \delta_T} - 1)}. \quad (18)$$

Для оптически тонкого слоя  $\beta k \delta_T \ll 1 \Rightarrow e^{-\beta k \delta_T} \approx 1 - \beta k \delta_T$ , поэтому профиль плотности теплового потока при радиационном теплообмене для оптически тонкого слоя бу-

дет равен:

$$\frac{E_+ - E_-|_y^{\delta_T}}{E_+ - E_-|_0^{\delta_T}} = 1 - \left( \frac{y}{\delta_T} \right). \quad (19)$$

Существенно, что профиль плотности теплового потока при радиационном теплообмене для оптически тонкого слоя не зависит от оптических свойств среды – от степени черноты рабочего тела и коэффициента диффузности, поэтому для оптически тонкого слоя профиль плотности теплового потока в случае радиационно–конвективного теплообмена будет равен:

$$\bar{q} = \frac{1}{1 + \Re} \left\{ a^{-1} \left( (2a + 1) \left( 1 - (y/\delta_T)^{a+1} \right) - (a + 1) \left( 1 - (y/\delta_T)^{2a+1} \right) \right) + \Re \left( 1 - (y/\delta_T) \right) \right\}. \quad (20)$$

Анализ формулы (20) показывает, что при увеличении доли лучистого теплообмена профиль плотности теплового потока при радиационно–конвективном теплообмене становится более заполненным, что указывает на большую заполненность турбулентного пограничного слоя при радиационно–конвективном теплообмене, чем при чисто конвективном теплообмене. Вышеуказанные профили для различных соотношений конвективной и радиационной составляющей теплообмена приведены в [1–5]. После получения профиля плотности теплового потока в турбулентном пограничном слое при радиационно–конвективном теплообмене при натекании турбулентной струи на плоскую поверхность, в дальнейшей перспективе можно решить аналогичную задачу для общего случая криволинейной поверхности вращения.

**Нестационарная локальная плотность теплового потока на стенке в турбулентном пограничном слое при натекании турбулентной струи на плоскую стенку при радиационно–конвективном теплообмене.**

В работах [1–5] при использовании модифицированной аналогии Рейнольдса, введении поправки Колбурна, учитывающей отклонение законов трения от законов теплообмена нестационарная локальная плотность теплового потока на стенке в турбулентном пограничном слое для условий натекания турбулентной струи на криволинейную стенку осесимметричной геометрии при радиационно–конвективном теплообмене детерминируется следующим выражением:

$$q_w = A (2a + 3 + 1/a)^{-b} \rho c_p (T_\infty - T_w) U_m^{1-b} \nu^b \text{Pr}^{-2/3} \text{Pr}_T^{-1} \xi^a [\delta_T^{**}]^b, \quad (21)$$

где  $A$  – константа;

$$b = 2a/(a+1);$$

$\nu$  – кинематическая вязкость;

$\text{Pr}$  и  $\text{Pr}_T$  – молекулярное и турбулентное числа Прандтля соответственно;

$\xi = 4,267 \cdot \text{Pr}^{-14/27} \text{Pr}_T^{-7/9}$  – отношение толщин теплового и динамического пограничных слоев;

$\delta_T^{**}$  – толщина потери энергии (энтальпии).

Толщина потери энтальпии для условий натекания турбулентной струи на криволинейную стенку осесимметричной геометрии при радиационно–конвективном теплообмене [1–5] детерминируется из решения следующего уравнения:

$$\frac{d \delta_T^{**}}{dx} - A (2a + 3 + 1/a)^{-b} U_m^{-b} \nu^b \text{Pr}^{-2/3} \text{Pr}_T^{-1} \xi^a [\delta_T^{**}]^b + \left( \frac{d(T_\infty - T_w)}{dx} \right) \frac{1}{(T_\infty - T_w)} + \frac{1}{U_m} \frac{dU_m}{dx} + \frac{1}{H_{3_0}^\gamma} \frac{\partial H_{3_0}^\gamma}{\partial x} + (2a + 3 + 1/a) \xi^{-a} \varepsilon_w \beta_K \frac{\sigma_0 (T_\infty^4 - T_w^4)}{\rho c_p (T_\infty - T_w) U_m} \delta_T^{**} = 0. \quad (22)$$

Для общего случая поверхности вращения решение может быть получено численным образом.

Точное аналитическое решение уравнения для толщины потери энтальпии может быть получено только для условий натекания турбулентной струи на плоскую стенку при радиационно–конвективном теплообмене.

Дифференциальное уравнение для вышеуказанных условий может быть записано в следующем виде [1–5]:

$$\frac{d\delta_T^{**}}{dx} + \left( C_1 + \frac{1}{2x} + C_2 x^{1/2} \right) \delta_T^{**} = C_3 x^{b/2} [\delta_T^{**}]^b, \quad (23)$$

где  $C_1 = C_w / (T_\infty - T_w)$

$C_w$  – константа, имеющая размерность К/м;

$$C_2 = (2a + 3 + 1/a) \xi^{-a} \varepsilon_w \beta_k \frac{\sigma_0 (T_\infty^4 - T_w^4)}{\rho c_p (T_\infty - T_w) U_0} R^{-1/2};$$

$$C_3 = A(2a + 3 + 1/a)^{-b} \text{Pr}^{-2/3} \text{Pr}_T^{-1} \xi^a \nu^b U_0^{-b} R^{-b/2}.$$

Точное аналитическое решение дифференциального уравнения (23) равно:

$$\delta_T^{**} = \frac{\left[ (1+b) C_3 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{C_1^m C_2^{n-m} (1+b)^n \left(\frac{2}{3}\right)^{n-m}}{m!(n-m)! \left(\frac{3}{2}n - \frac{1}{2}m + b + \frac{3}{2}\right)} x^{\frac{3}{2}n - \frac{1}{2}m + b + \frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{1+b}}}{\sqrt{x} \cdot e^{\left( C_1 x + \frac{2}{3} C_2 x^{\frac{3}{2}} \right)}}. \quad (24)$$

Таким образом, детерминировав толщину потери энтальпии по уравнению (24), можно детерминировать локальную плотность нестационарную теплового потока на стенке в турбулентном пограничном слое для условий натекания турбулентной струи на плоскую стенку при радиационно–конвективном теплообмене по формуле (21); следовательно, для этого случая задача детерминирования плотности теплового потока на стенке имеет точное аналитическое решение.

В данном исследовании аналитически детерминирована локальная нестационарная плотность теплового потока при радиационно–конвективном теплообмене, характерная для условий камер сгорания энергетических установок, в которых используются тяжелофракционные жидкие топлива, плоской поверхности: детерминированы как ее значения на поверхности камеры сгорания, так и ее профиль в турбулентном пограничном слое. Получено точное аналитическое решение толщины потери энтальпии в турбулентном пограничном слое для условий натекания турбулентной струи на плоскую стенку при радиационно–конвективном теплообмене, которое позволяет точным аналитическим образом детерминировать локальную нестационарную плотность теплового потока на стенке для этого случая теплообмена.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобанов, И.Е. Локальный радиационно–конвективный теплообмен в турбулентном пограничном слое в камерах сгорания быстроходных дизелей: Дисс. на соиск. уч. ст. кандидата технических наук. – М., 1998. – 173 с.
2. Kavtaradze, R.Z. Combined Radiative and Convective Heat Transfer between Two-Phase Substance and Combustion Chamber Wall in Diesel Engine / R.Z. Kavtaradze, N.A. Lapuskin, I.E. Lobanov // Proceeding of the International Symposium on the Heat Transfer in Boiling and Condensation and 11-th International School-Seminar of Young Scientists and Specialists. – Moscow (Russia). – 1997. – P. 525–532.
3. Кавтарадзе, Р.З. Некоторые основополагающие аспекты расчета пограничного слоя при радиационно–конвективном теплообмене / Р.З. Кавтарадзе, И.Е. Лобанов // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т. 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплооб-

мен. – М.: МЭИ. – 1998. – С. 286–292.

4. Кавтарадзе, Р.З. К вопросу расчета пограничного слоя и турбулентного числа Прандтля при радиационно-конвективном теплообмене / Р.З. Кавтарадзе, И.Е. Лобанов // Известия РАН. Энергетика. – 1999. – № 1. – С. 172–176.

5. Лобанов, И.Е. Некоторые основополагающие аспекты расчета пограничного слоя при радиационно-конвективном теплообмене при натекании турбулентной струи на криволинейную стенку / И.Е. Лобанов // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XII Школы–семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. – М.: МЭИ. – 1999. – С. 162–165.

6. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И.Леонтьева. – М.: МГТУ, 1997. – 683 с.

**Лобанов Игорь Евгеньевич**

Московский Авиационный институт (государственный технический университет), г. Москва

Доктор технических наук, ведущий н.с. Проблемной научно–исследовательской лаборатории ПНИЛ–204

Тел. (495)489–17–58

E–mail: lloobbaannooff@live.ru

---

I.E. LOBANOV

**THE EXACT ANALYTICAL DECISION FOR DENSITY THERMAL FLOW  
AT ACCUMULATE TURBULENT OF A JET ON A FLAT WALL**

*For conditions of chambers of combustion of power installations, in which are used heavyfractionary of liquid fuel having a flat surface, on which occurs accumulate high–temperature radiating, of gas, absorbing and disseminating a thermal energy, local density of a thermal flow and its structure in turbulent a boundary layer is determined.*

**Keywords:** heat exchange, heat stream, mathematical modeling, turbulent, flow, plane wall.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Lobanov, I.Ye. Lokalnyy radiatsionno–konvektivnyy teploobmen v turbulentnom pogranichnom sloye v kamerakh sgoraniya bystrokhodnykh dizeley: Diss. na soisk. uch. st. kandidata tekhnicheskikh nauk. – М., 1998. – 173 s.

2. Kavtaradze, R.Z. Combined Radiative and Convective Heat Transfer between Two–Phase Substance and Combustion Chamber Wall in Diesel Engine / R.Z. Kavtaradze, N.A. Lopuskin, I.E. Lobanov // Proceeding of the International Symposium on the Heat Transfer in Boiling and Condensation and 11–th International School–Seminar of Young Scientists and Specialists. – Moscow (Russia). – 1997. – P. 525–532.

3. Kavtaradze, R.Z. Nekotoryye osnovopolagayushchiye aspekty rascheta pogranichnogo sloya pri radiatsionno–konvektivnom teploobmene / R.Z. Kavtaradze, I.Ye. Lobanov // Trudy Vtoroy Rossiyskoy natsionalnoy konferentsii po teploobmenu. V 8 tomakh. T. 6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyy i slozhnyy teploobmen. – М.: MEI. – 1998. – S. 286–292.

4. Kavtaradze, R.Z. K voprosu rascheta pogranichnogo sloya i turbulentnogo chisla Prandtlya pri radiatsionno–konvektivnom teploobmene / R.Z. Kavtaradze, I.Ye. Lobanov // Izvestiya RAN. Energetika. – 1999. – № 1. – S. 172–176.

5. Lobanov, I.Ye. Nekotoryye osnovopolagayushchiye aspekty rascheta pogranichnogo sloya pri radiatsionno–konvektivnom teploobmene pri natekanii turbulentnoy strui na krivolinyeynuyu stenku / I.Ye. Lobanov // Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh: Trudy XII Shkoly–seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I.Leontyeva. – М.: MEI. – 1999. – S. 162–165.

6. Teoriya teplomassoobmena / Pod red. A.I.Leontyeva. – М.: MGTU, 1997. – 683 s.

**Lobanov Igor Evgenevich**

Moscow Aviation Institute (State Technical University), Moscow

Doctor of Technical Sciences, a leading NS Problem research laboratory PSRL–204

Tel. (495) 489–17–58

E–mail: lloobbaannooff@live.ru

УДК 621.774.6

В.А. ЖЕРДОВ, Н.И. МАРКИН, С.А. МОСКВИТИН, Н.В. ТАТАРЧЕНКОВ, К.С. ЛУНИН

## ДЕФОРМАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ИЗГИБА ТРУБЫ НА МАЛЫЙ УГОЛ

*Определяется максимальное относительное удлинение материального волокна изогнутой трубы в зависимости от угла изгиба.*

**Ключевые слова:** жесткопластический не упрочняемый материал, работа внутренних сил, аппроксимация координатной функции деформации.

Теоретический анализ пластического изгиба трубы [1 – 3] обычно предполагает наличие протяженного изогнутого участка с одинаковым радиусом оси  $R$  и максимальной деформацией материального волокна  $\varepsilon_{z \max} \approx 0,5d/R$ , ( $d$  – диаметр трубы). Дополнительное нагружение продольной силой добавляет к указанной деформации относительное удлинение оси [3 – 6]. На границах изогнутого участка значения  $\varepsilon_{z \max}$  существенно уменьшаются под влиянием соседних прямых участков [7, 8]. При малых углах изгиба это влияние распространяется на весь изогнутый участок, следовательно, вышеуказанная оценка  $\varepsilon_{z \max}$  и основанные на ней прочностные расчеты трубопроводов нуждаются в коррекции. Целью настоящей работы является теоретический вывод зависимости  $\varepsilon_{z \max}$  от малых углов изгиба трубы с использованием метода баланса работ внутренних сил на кинематически допустимых функциях деформаций.

Расчетная схема на рисунке 1 отражает экспериментальные данные [9] изгиба трубы на угол  $\varphi = 180^\circ$ .

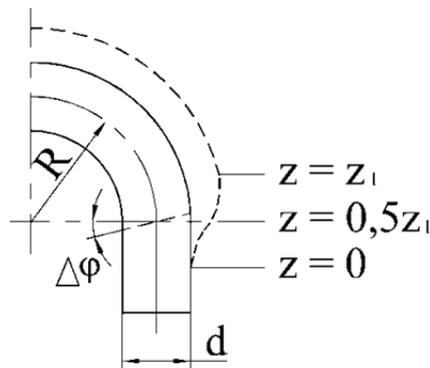


Рисунок 1 – Эпюра  $\varepsilon_{z \max}$  (пунктир) на половине изогнутой трубы

Пунктиром также показан поворот граничного сечения, изначально нормального к оси; значения  $\Delta\varphi$  на некотором удалении от границы изогнутого и прямого участков приближаются к нулю. Пренебрегая нарушением плоскостности сечений, аппроксимируем относительное изменение длины материального волокна функцией:

$$\varepsilon_z = \frac{\rho \sin \alpha}{2R} (1 - \cos \bar{z}) k, \quad (1)$$

где  $\rho, \alpha$  – полярные координаты сечения;

$\bar{z} = \pi \frac{z}{z_1}$ ; диапазон осевой координаты  $0 \leq z \leq z_1$ ;

$k$  – коэффициент, равный 1 при наличии стабильного участка эпюры на рисунке 1.

При  $z = z_1$  и  $k = 1$  имеем:  $\varepsilon_z = \rho \sin \alpha / R$ ,  $\varepsilon_{z \max} = 0,5d / R$ .

Принимаем  $\varepsilon_\rho = \varepsilon_\alpha = -0,5\varepsilon_z$ , формулы перемещений согласно (1) и [7]:

$$u_\rho = \frac{r^2 - \rho^2}{8R} \sin \alpha (1 - \cos \bar{z}) k; u_\alpha = \frac{r^2 + \rho^2}{8R} \cos \alpha (1 - \cos \bar{z}) k; u_z = \int \varepsilon_z dz;$$

деформации сдвига:  $\gamma_{\rho\alpha} = 0; \gamma_{\alpha z} = \frac{du_\alpha}{dz} + \frac{du_z}{\rho d\alpha}; \gamma_{z\rho} = \frac{du_z}{d\rho} + \frac{du_\rho}{dz}$ .

Неизвестную длину  $z_1$  нестабильного участка эпюры на рисунке 1 находим из условия приближенного равенства работ внутренних сил, подсчитанных по различным формулам:

$$A_1 = \sigma_s \int_0^{0,5\pi} \int_{r_2}^{r_1} \left( l \frac{\rho \sin \alpha}{R} + \frac{r^2 + \rho^2}{4\sqrt{3}R} \cos \alpha \right) \rho d\rho d\alpha$$

$$A_2 = \sigma_s \int_0^{0,5\pi} \int_{r_2}^{r_1} \int_0^{z_1} \frac{\varepsilon_z^2 + \frac{1}{3}(\gamma_{\alpha z}^2 + \gamma_{z\rho}^2)}{\varepsilon_i} dz \rho d\rho d\alpha \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести жесткопластического не упрочняемого материала;

$\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций;

$r_1$  и  $r_2$  – наружный и внутренний радиусы сечения трубы;

$l = 0,5z_1$  – длина части изогнутого участка трубы, в пределах которой деформация  $\varepsilon_z$  нестабильна.

Величина  $A_1$  является верхней оценкой работы внутренних сил при постоянном значении  $\varepsilon_{z\max}$  на изогнутом участке и  $\varepsilon_z = 0$  за его границами. Скачкообразное изменение деформаций на указанных границах сопровождается работой касательного напряжения текучести  $\sigma_s / \sqrt{3}$  на перемещении  $u_\alpha$  согласно второму слагаемому подынтегрального выражения формулы  $A_1$ .

Формула  $A_2$  предусматривает интегрирование произведений напряжений (напряжения  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\alpha$  считаются равными нулю) на соответствующие деформации в объеме длиной  $z_1$ , вдвое большем, по сравнению с формулой  $A_1$ . На этой длине деформация  $\varepsilon_{z\max}$  переменна при нулевых производных  $d\varepsilon_{z\max} / dz$  в начале и в конце интегрирования. Координатная функция (1), аппроксимирующая нестабильный участок эпюры на рисунке 1, выбрана таким образом, что уменьшение  $\varepsilon_{z\max}$  при  $0,5z_1 \leq z \leq z_1$  эквивалентно добавлению этой деформации в пределах  $0 \leq z \leq 0,5z_1$ .

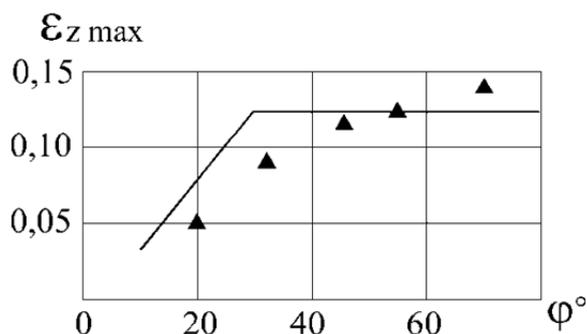
Вычисления интегралов  $A_1$  и  $A_2$  программой MathCAD с пробными значениями  $z_1$  обнаруживают их равенство при  $z_1 \approx 2,2(r_1 + r_2)$  в диапазоне толщин стенки трубы  $t = 0,05 \dots 0,2d$ . Относительный радиус изгиба  $R/d$  в данном случае не имеет значения, как, разумеется, и величина напряжения текучести  $\sigma_s$ . Таким образом, длина  $l$  приграничной области изогнутого участка трубы, в пределах которой деформация  $\varepsilon_{z\max}$  нестабильна, составляет  $\sim 0,9 \dots 1,0d$ , что согласуется с экспериментальными данными [9].

При малых  $\varphi < 2d/R$  эпюра  $\varepsilon_{z\max}$  нестабильна на всем протяжении, ее экстремум, совпадающий с биссектрисой угла  $\varphi$ , выражается формулой (1) с коэффициентом  $k < 1$ . Его значение определяется равенством:

$$\int_0^{z_1} \varepsilon_z dz = \frac{\varphi}{2} \rho \sin \alpha,$$

правая часть которого означает приращение длины материального волокна на половине угла  $\varphi$  при  $\varepsilon_z = \rho \sin \alpha / R$ . Подставляя в левую часть выражение (1), получаем  $k = \varphi R / z_1$ .

Расчет деформаций гибки на малый угол отличается от изложенного выше тем, что принимаем  $l = \varphi R / 2$  в формуле  $A_1$  (2) и снова добиваемся приблизительного равенства работ  $A_1$  и  $A_2$  подбором  $z_1$ . При этом согласно (1) максимальное относительное удлинение  $\varepsilon_{z \max}$  на биссектрисе угла гибки  $\varphi$  уменьшается, по сравнению с величиной  $0,5d/R$ , рисунок 2.



**Рисунок 2 – Рассчитанные и фактические деформации изгиба трубы с размерами:**  
 $d = 30$  мм,  $R = 120$  мм,  $t = 1,8$  мм; материал – сплав Д16М

Опытная гибка на различные углы  $\varphi$  выполнялась методом наматывания на круглый копир. Действительная деформация  $\varepsilon_{z \max}$ , которую определяли по изменению размеров делительной сетки, оказалась меньше расчетной при малых углах  $\varphi$ , однако при  $\varphi > 1$  картина обратная, несмотря на сплющивание сечения трубы до высоты  $\sim 26$  мм. Причина заключается в смещении нейтральной поверхности, не учитываемом формулой (1). Горизонтальный участок графика на рисунке 2 начинается при  $\varphi = 0,516$  и означает стабилизацию максимальных расчетных значений  $\varepsilon_z$ , в действительности это происходит при  $\varphi > 1$ .

Предлагаемая методика расчета  $\varepsilon_{z \max}$  позволяет рассчитывать максимальное по абсолютной величине утонение стенки  $\Delta t = -0,5\varepsilon_{z \max} t$  трубы, изогнутой на малый угол  $\varphi < 2d/R$ . Прогноз относительного утонения  $\Delta t / t$  имеет существенное значение для подготовки производства трубопроводов ответственного назначения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысов, М.И. Пластическое формообразование тонкостенных деталей авиатехники (теория и расчет) / М.И. Лысов, И.М. Закиров. – М.: Машиностроение, 1983. – 174 с.
2. Лукьянов, В.П. Параметры холодной гибки листовых заготовок, прутков и труб / В.П. Лукьянов, И.И. Маткава, В.А. Бойко, Д.В. Доценко. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 151 с.
3. Bai, Y. Tube Collapse under Combined Pressure, Tension and Bending/ Y. Bai, R. Igland and T. Moan. // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 1993. – Vol. 3(2). – p.p. 121 – 129.
4. Bai, Y. Tube Collapse under Combined Pressure, Tension and Bending/ Y. Bai, R. Igland and T. Moan // Journal of Marine Structures. – 1997. – Vol. 10. – № 5. – p.p. 389 – 410.
5. Dyau, J. Y. On the Response of Elastic-Plastic Tubes Under Combined Bending and Tension / J.Y. Dyau and S. Kyriakides // Offshore Mechanical and Arctic Engineering. – 1992, Volume 114. – Issue 1. – p.p. 50 – 62.
6. Corona, E. On the Collapse of Inelastic Tubes under Combined Bending and Pressure / E. Corona and S. Kyriakides // International Journal Solids Structures. – 1988. – Vol. 24. – № 5. – p.p. 505 – 535.
7. Вдовин, С.И. Теория и расчеты гибки труб / С.И. Вдовин. – М.: «Машиностроение», Орел: ОрелГТУ, 2009. – 96 с.
8. Pan, K. On the Plastic Deformation of a Tube During Bending / K. Pan, K.A. Stelson // Journal of Engineering for Industry. – 1995. – Vol. 117. – Issue 4. – p.p. 494 – 500.
9. Franz, W.-D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen / W.-D. Franz. – Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988. – 237 s.

**Жердов Владислав Анатольевич**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой  
«Автоматизированные процессы и машины бес-  
стружковой обработки материалов»  
Тел.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

**Москвитин Сергей Александрович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Авто-  
матизированные процессы и машины бесстружковой  
обработки материалов»  
Тел.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

**Лунин Константин Сергеевич**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
Аспирант кафедры «Автоматизированные процессы  
и машины бесстружковой обработки материалов»  
Тел.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

**Маркин Николай Иванович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Авто-  
матизированные процессы и машины бесстружковой  
обработки материалов»  
Тел.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

**Татарченков Николай Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
учебный мастер кафедры «Автоматизированные  
процессы и машины бесстружковой обработки мате-  
риалов»  
Тел.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

---

V.A. ZHERDOV, N.I. MARKIN, S.A. MOSKVITIN, N.V. TATARCHENKOV, K.S. LUNIN

**DEFORMATION PLASTIC BENDING PIPES AT A SMALL ANGLE**

*Determined maximum elongation fiber material bent pipe according to the angle of bending.*

**Keywords:** *not a rigid reinforcement material, the work of the internal forces, deformation function approximation coordinate.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Lvsov, M.I. Plasticheskove formoobrazovanie tonkostennykh detaley aviatsionnoy tekhniki (teoriya i raschet) / M.I. Lysov, I.M. Zakirov. – M.: Mashinostrovenive. 1983. – 174 s.
2. Lukvanov, V.P. Parametry kholodnoy gibki listovnykh zagotovok, prutkov i trub / V.P. Lukyanov, I.I. Matkava, V.A. Boyko, D.V. Dotsenko. – M.: Mashinostrovenive–1. 2005. – 151 s.
3. Bai, Y. Tube Collapse under Combined Pressure. Tension and Bending/ Y. Bai, R. Igland and T. Moan. // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 1993. – Vol. 3(2). – p.p. 121 – 129.
4. Bai, Y. Tube Collapse under Combined Pressure. Tension and Bending/ Y. Bai, R. Igland and T. Moan // Journal of Marine Structures. – 1997. – Vol. 10. – № 5. – p.p. 389 – 410.
5. Dvau, J. Y. On the Response of Elastic–Plastic Tubes Under Combined Bending and Tension / J.Y. Dyau and S. Kyriakides // Offshore Mechanical and Arctic Engineering. – 1992, Volume 114. – Issue 1. – p.p. 50 – 62.
6. Corona, E. On the Collapse of Inelastic Tubes under Combined Bending and Pressure / E. Corona and S. Kyriakides // International Journal Solids Structures. – 1988. – Vol. 24. – № 5. – p.p. 505 – 535.
7. Vdovin, S.I. Teoriya i raschet gibki trub / S.I. Vdovin. – M.: «Mashinostrovenive», Orel: OrelGTU, 2009. – 96 s.
8. Pan, K. On the Plastic Deformation of a Tube During Bending / K. Pan, K.A. Stelson // Journal of Engineering for Industr. – 1995. – Vol. 117. – Issue 4. – p.p. 494 – 500.
9. Franz, W.D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen / W.–D. Franz. – Düsseldorf: VDI–Verlag, 1988. – 237 s.

**Zherdov Vladislav Anatolyevich**

State University – ESPC  
Ph.D., Associate Professor, Head. Department «Auto-  
mated processes and material handling machines»  
Tel.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

**Moskvitin Sergey Aleksandrovich**

State University – ESPC  
Ph.D., Associate Professor, «Automated processes and  
material handling machines»  
Tel.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

**Lunin Konstantin Sergeyeovich**

State University – ESPC  
Post-graduate student of the department  
«Automated processes and material handling machines»  
Tel.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

**Markin Nikolay Ivanovich**

State University – ESPC  
Ph.D., Associate Professor, «Automated processes and  
material handling machines»  
Tel.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

**Tatarchenkov Nikolay Vladimirovich**

State University – ESPC  
Educational master of faculty «Automated processes and  
material handling machines»  
Tel.: 8–905–167–0517  
E-mail: vdovostu@mail.ru

УДК 621.313

Н.Н. СМИРНОВ, Л.А. САВИН, С.В. МАЙОРОВ, А.А. ПОПИКОВ

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ РОТОРА В АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ С УЧЕТОМ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Проведен анализ влияния геометрических отклонений измерительных поверхностей на появление нелинейных колебаний ротора при работе системы управления активным магнитным подвесом (АМП). Впервые, рассмотрена модель жесткого несимметричного ротора и метод решения системы дифференциальных уравнений с учетом влияния на управляющие сигналы отклонений формы поверхностей измерительных втулок. Проведены теоретические исследования колебаний ротора в АМП центробежного нагнетателя природного газа и высокоскоростного шпинделя металлорежущего станка.*

**Ключевые слова:** нелинейный динамический анализ, динамика ротора, активный магнитный подвес, отклонение формы, измерительная поверхность.

В настоящее время активные магнитные подшипники получили широкое распространение в различных областях науки и техники. Перспективные направления их применения связаны с использованием в качестве опор шпинделей металлорежущих станков и центробежных нагнетателей для транспортировки природного газа [1, 2].

Для обеспечения левитации ротора компрессора в заданном положении система управления магнитным подвесом (СУМП) регулирует токи в обмотках электромагнитов. Изменение токов происходит в соответствии с законом управления регулятора, входными величинами которого являются сигналы блоков датчиков положения ротора. При этом измерительной для радиальных датчиков служит радиальная поверхность алюминиевой втулки, напрессовываемой на ротор.

Реальная измерительная поверхность практически всегда неидеальна, т. е. втулка имеет некруглость. Кроме того имеет место несоосность втулки и ротора. Эта неидеальность при вращении ротора ведет к его параметрическим колебаниям. В большинстве случаев это выражается в увеличении амплитуды гармоник с оборотной частотой.

Чтобы измерительная втулка вносила минимальный вклад в виброактивность ротора нагнетателя, к обработке ее поверхности предъявляются высокие требования. Как правило, вводится ограничение по максимальному радиальному биению – разности наибольшего и наименьшего расстояний от точек реального профиля поверхности вращения до базовой оси в сечении плоскостью, перпендикулярной базовой оси. Так ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» для выпускаемых АМП устанавливает предельное допустимое значение радиального биения измерительных поверхностей 10 мкм. Это значение принято исходя из максимально достижимой в настоящее время точности механической обработки поверхности. Если в процессе монтажа выясняется, что допустимое значение биения превышено, роторная часть со втулкой подлежит обработке в соответствии с требованиями производителя АМП.

На практике часто оказывается, что ротор с измерительной втулкой, имеющей биение до 40 мкм, вращается с допустимыми виброперемещениями на всех режимах работы нагнетателя. Следовательно, возникает задача оценки виброактивности ротора на АМП с различными значениями радиальных биений. Особенно это актуально для случаев, если нагнетатель находится на компрессорной станции, не имеющей собственной ремонтной базы и с плохим транспортным сообщением (например, на территориях крайнего Севера). Принятие решения на основании моделирования системы о допуске нагнетателя к эксплуатации со втулкой, имеющей повышенное биение, позволит снизить затраты на повторную переборку компрессора, как это было бы в случае дополнительной обработки измерительной поверхности.

В данной работе рассматривается моделирование поведения жесткого ротора на АМП с учетом неидеальности измерительных поверхностей датчиковых втулок. Модель разработана для регулятора, применяемого в СУМП, производимых ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Динамическое поведение роторных машин с нелинейными опорами рассмотрено во многих работах [1–10]. Для описания поведения несимметричного жесткого ротора, имеющего массу  $M$  и вращающегося с постоянной угловой скоростью  $\omega$  в магнитном поле, наиболее подходящими на наш взгляд являются модели, предложенные в работах [3, 4].

Расчетная модель жесткого несимметричного ротора без учета влияния упорного и страховочных подшипников представлена на рисунке 1.

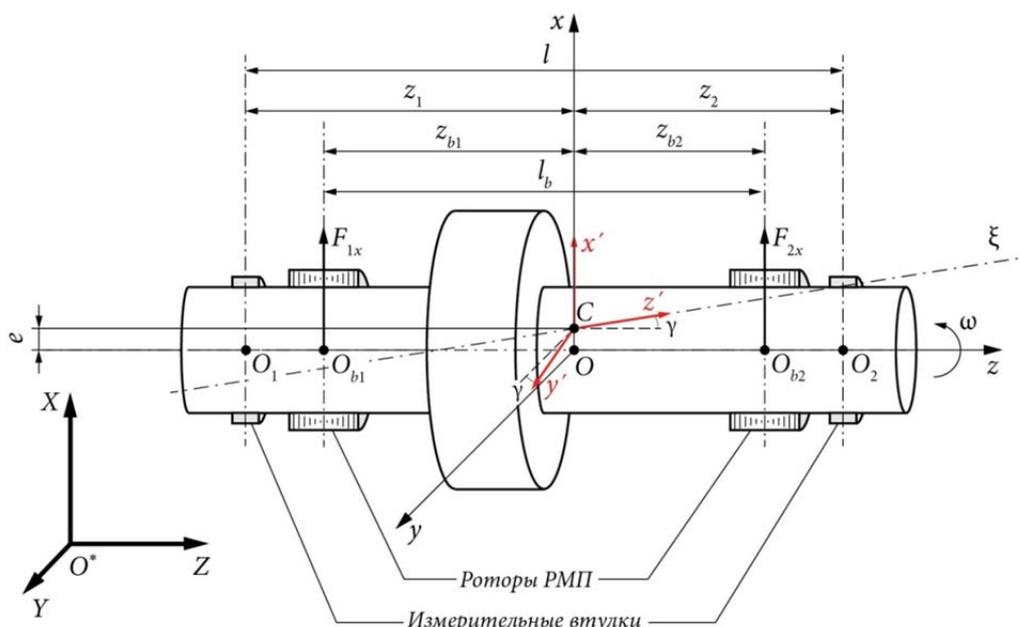


Рисунок 1 – Расчетная схема жесткого ротора на АМП

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:  $O^*XYZ$  – неподвижная система координат,  $C$  – центр масс ротора,  $\xi$  – его главная центральная ось инерции,  $OC = e$  – эксцентриситет.

С ротором связана подвижная система координат  $Oxuz$  таким образом, что центр масс находится на оси  $Ox$ , а ось  $Oz$  совпадает с продольной геометрической осью ротора, вокруг которой он вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ .  $Sxuz$  – система главных центральных осей инерции ротора. Главные центральные моменты инерции:  $J_x = J_y = J_1$  – экваториальный и  $J_z = J_3$  – осевой. Угол между осью  $\xi$  и плоскостями  $xu$  и  $xz$  равен  $\gamma$  и характеризует динамическую неуравновешенность ротора. Для упрощения принято, что ось  $\xi$  параллельна плоскости  $uz$ .

В неподвижной системе координат центры поперечных сечений измерительных втулок  $O_1$  и  $O_2$  имеют продольные координаты  $z_1$  и  $z_2$ . Для упрощения расчетов принимаем, что действие радиальных электромагнитов на вал приложено в точках  $O_{b1}$  и  $O_{b2}$ , т. е. продольными размерами подшипников пренебрегаем. Точки приложения электромагнитных сил определяются координатами  $z_{b1}$  и  $z_{b2}$ . Тогда расстояние между точками измерения  $l = z_2 - z_1$ , а между точками управления  $l_b = z_{b2} - z_{b1}$ .

Движение описывается координатами центров  $O_{b1}$  и  $O_{b2}$  поперечных сечений шихтованных роторов радиальных электромагнитных подшипников (РЭМП). Вектор их координат:

$$q_b = (q_{b1}, q_{b2}, q_{b3}, q_{b4})^T = (x_{b1}, y_{b1}, x_{b2}, y_{b2})^T. \quad (1)$$

Запишем уравнения динамики жесткого несимметричного ротора, полученные на основании выражения для полной кинетической энергии ротора и уравнения Лагранжа II рода в обобщенных координатах  $q_b$  [3, 4].

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_{b1} - m_{12} \ddot{x}_{b2} + h_0 (\dot{y}_{b1} - \dot{y}_{b2}) = F_{1x} + Q_{1x} + P_{1x}(t); \\ m_1 \ddot{y}_{b1} - m_{12} \ddot{y}_{b2} - h_0 (\dot{x}_{b1} - \dot{x}_{b2}) = F_{1y} + Q_{1y} + P_{1y}(t); \\ m_2 \ddot{x}_{b2} - m_{12} \ddot{x}_{b1} - h_0 (\dot{y}_{b1} - \dot{y}_{b2}) = F_{2x} + Q_{2x} + P_{2x}(t); \\ m_2 \ddot{y}_{b2} - m_{12} \ddot{y}_{b1} + h_0 (\dot{x}_{b1} - \dot{x}_{b2}) = F_{2y} + Q_{2y} + P_{2y}(t). \end{cases} \quad (2)$$

где  $m_1, m_2, m_{12}$  – инерционные коэффициенты;  
 $h_0$  – гироскопический коэффициент;  
 $F_{nx}, F_{ny}$  – управляющие электромагнитные силы опор ( $n = 1, 2$  – номер опоры);  
 $Q_{nx}, Q_{ny}$  – обобщенные внешние силы.  
 Обобщенные возмущающие силы  $P_{nx}, P_{ny}$  [3]:

$$\begin{aligned}
 P_{1x}(t) &= \frac{Me\omega^2 z_{b2}}{l_b} \cos \omega t + \frac{(J_1 - J_3)\gamma\omega^2}{l_b} \sin \omega t; \\
 P_{1y}(t) &= \frac{Me\omega^2 z_{b2}}{l_b} \sin \omega t - \frac{(J_1 - J_3)\gamma\omega^2}{l_b} \cos \omega t; \\
 P_{2x}(t) &= -\frac{Me\omega^2 z_{b1}}{l_b} \cos \omega t - \frac{(J_1 - J_3)\gamma\omega^2}{l_b} \sin \omega t; \\
 P_{2y}(t) &= -\frac{Me\omega^2 z_{b1}}{l_b} \sin \omega t + \frac{(J_1 - J_3)\gamma\omega^2}{l_b} \cos \omega t;
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Инерционные коэффициенты:

$$m_1 = (J_1 + Mz_{b2}^2)/l_b^2; \quad m_2 = (J_1 + Mz_{b1}^2)/l_b^2; \quad m_{12} = (J_1 + Mz_{b1}z_{b2})/l_b^2;
 \tag{4}$$

Гироскопический коэффициент:

$$h_0 = J_3\omega/l_b^2;
 \tag{5}$$

Силы, создаваемых электромагнитами можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 F_{n_x} &= \frac{L_0 i_{n_{xu}}^2}{2\delta_b(1 - \bar{x}_{bn})^2} - \frac{L_0 i_{n_{xl}}^2}{2\delta_b(1 + \bar{x}_{bn})^2}; \\
 F_{n_y} &= \frac{L_0 i_{n_{yu}}^2}{2\delta_b(1 - \bar{y}_{bn})^2} - \frac{L_0 i_{n_{yl}}^2}{2\delta_b(1 + \bar{y}_{bn})^2},
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где  $L_0$  – индуктивность электромагнитов при номинальном зазоре  $\delta_b$  между ротором и полюсом статора (центральном положении ротора);

$i_{n_{xu,l}}, i_{n_{yu,l}}$  – токи в обмотках верхних (индекс «u») и нижних (индекс «l») полюсов соответствующих осей управления;

$\bar{x}_{bn} = x_{bn}/\delta_b, \bar{y}_{bn} = y_{bn}/\delta_b$  – безразмерные отклонения точек ротора  $O_{b1}$  и  $O_{b2}$  от центрального положения.

Все дифференциальные уравнения, описывающие звенья представленного регулятора в совокупности с усилителями мощностями и электромагнитами, можно представить в матричном виде следующим образом:

$$Y_{nm} D_{nm} P = V_{nm} N_{nm} P.
 \tag{7}$$

При этом выход сумматора  $S_1$ :

$$q_{r_{nm}} = q_{dif_{nm}} + q_{int_{nm}},
 \tag{8}$$

а матрица выходов сумматоров  $S_{2u}$  и  $S_{2l}$ :

$$I_{S_{nm}} = \begin{pmatrix} i_{Su_{nm}} \\ i_{Sl_{nm}} \end{pmatrix} = K_{nm} V_{S_{2nm}};
 \tag{9}$$

В уравнениях (7) – (9):  $Y_{nm}$  – диагональная матрица выходов звеньев регулятора;  $D_{nm}$  – матрица постоянных времени регулятора;  $N_{nm}$  – матрица коэффициентов передачи звеньев регулятора;  $V_{nm}$  – диагональная матрица входов звеньев;  $P$  – матрица операторов дифференцирования;  $K_{nm}$  – матрица коэффициентов пропорциональных звеньев;  $V_{S_{2nm}}$  – матрица входов сумматоров  $S_{2u}$  и  $S_{2l}$ .

Для удобства оценки величин, входящих в уравнения (2), (3) и (6), а также для уменьшения накопления вычислительной ошибки при дальнейшем их решении перейдем к безразмерной форме. Введем следующие безразмерные параметры:

– время:

$$\bar{t} = \frac{t}{t_0};
 \tag{10}$$

– координаты опорных точек вала:

$$\bar{x}_{b1} = \frac{x_{b1}}{\delta_b}, \quad \bar{y}_{b1} = \frac{y_{b1}}{\delta_b}, \quad \bar{x}_{b2} = \frac{x_{b2}}{\delta_b}, \quad \bar{y}_{b2} = \frac{y_{b2}}{\delta_b}; \quad (11)$$

– координаты измерительных точек:

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1}{\delta_b}, \quad \bar{y}_1 = \frac{y_1}{\delta_b}, \quad \bar{x}_2 = \frac{x_2}{\delta_b}, \quad \bar{y}_2 = \frac{y_2}{\delta_b}; \quad (12)$$

– приведенная к подшипникам сила тяжести:

$$g_1 = \frac{z_{b2} t_0^2 \sqrt{2}}{2l_b m_1 \delta_b} Mg, \quad g_2 = \frac{z_{b1} t_0^2 \sqrt{2}}{2l_b m_2 \delta_b} Mg; \quad (13)$$

– амплитуды возмущающей силы, вызванной статической неуравновешенностью ротора:

$$p_1 = \frac{4\pi^2 M e z_{b2}}{m_1 l_b \delta_b}, \quad p_2 = \frac{4\pi^2 M e z_{b1}}{m_2 l_b \delta_b}; \quad (14)$$

– амплитуды возмущающей силы динамической неуравновешенности:

$$q_1 = \frac{4\pi^2 (J_1 - J_3) \gamma}{m_1 l_b \delta_b}, \quad q_2 = \frac{4\pi^2 (J_1 - J_3) \gamma}{m_2 l_b \delta_b}; \quad (15)$$

– инерционные коэффициенты:

$$M_1 = \frac{m_{12}}{m_1}, \quad M_2 = \frac{m_{12}}{m_2}; \quad (16)$$

– гироскопические коэффициенты:

$$h_1 = \frac{h_0 t_0}{m_1}, \quad h_2 = \frac{h_0 t_0}{m_2}; \quad (17)$$

где  $t_0 = 2\pi/\omega$  – время одного оборота ротора при номинальной угловой скорости  $\omega$ .

После подстановки обобщенных возмущающих сил (3), внешних сил и магнитных сил (6) в уравнение динамики ротора (2) и обезразмеривания получим следующие уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_{b1} - M_1 \ddot{x}_{b2} + h_1 (\dot{y}_{b1} - \dot{y}_{b2}) = v_1 \left( \frac{I_{1xb}^2}{(1-x_{b1})^2} - \frac{I_{1xh}^2}{(1+x_{b1})^2} \right) - \\ - g_1 - p_1 \cos 2\pi t + q_1 \sin 2\pi t; \\ \ddot{y}_{b1} - M_1 \ddot{y}_{b2} - h_1 (\dot{x}_{b1} - \dot{x}_{b2}) = v_1 \left( \frac{I_{1yb}^2}{(1-y_{b1})^2} - \frac{I_{1yh}^2}{(1+y_{b1})^2} \right) - \\ - g_1 + p_1 \sin 2\pi t - q_1 \cos 2\pi t; \\ \ddot{x}_{b2} - M_2 \ddot{x}_{b1} - h_2 (\dot{y}_{b1} - \dot{y}_{b2}) = v_2 \left( \frac{I_{2xb}^2}{(1-x_{b2})^2} - \frac{I_{2xh}^2}{(1+x_{b2})^2} \right) + \\ + g_2 - p_2 \cos 2\pi t - q_2 \sin 2\pi t; \\ \ddot{y}_{b2} - M_2 \ddot{y}_{b1} + h_2 (\dot{x}_{b1} - \dot{x}_{b2}) = v_2 \left( \frac{I_{2yb}^2}{(1-y_{b2})^2} - \frac{I_{2yh}^2}{(1+y_{b2})^2} \right) + \\ + g_2 + p_2 \sin 2\pi t + q_2 \cos 2\pi t. \end{array} \right. \quad (18)$$

где  $v_1 = \frac{L_0 t_0^2}{2m_1 \delta_b^2};$

$$v_2 = \frac{L_0 t_0^2}{2m_2 \delta_b^2};$$

черта (здесь и далее) над безразмерными величинами опущена, а точки обозначают дифференцирование по безразмерному времени  $\bar{t}$ .

Токи в обмотках электромагнитов определяются в результате решения уравнений (7) – (9), где дифференцировать следует также по безразмерному времени, а матрицы постоян-

ных времени регулятора  $D_{nm}$  и коэффициентов передачи звеньев регулятора  $N_{nm}$  следует умножить на матрицу  $T$ :

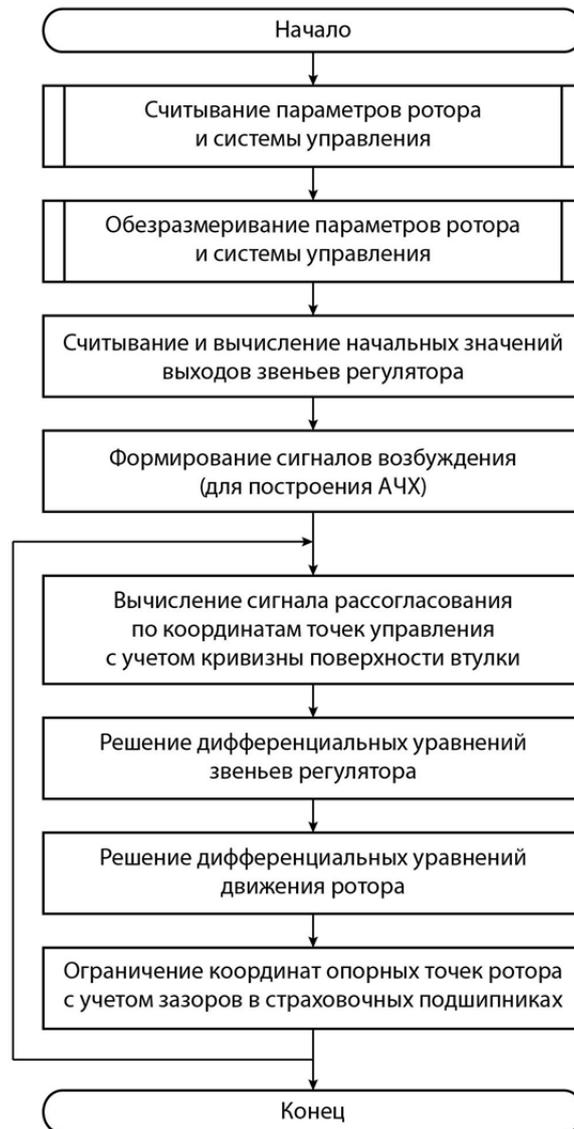
$$T = \text{diag}\left(\frac{1}{t_0^2}; \frac{1}{t_0}; 1\right); \quad (19)$$

К управляющим токам процедура обезразмеривания не применялась, поскольку диапазон их изменения составляет  $0 \dots 1,5$  А для нижних магнитов и  $5 \dots 10$  А – для верхних.

Связь безразмерных координат точек измерения, полученных с выхода блоков датчиков, с истинными будет иметь вид:

$$x_n^{me} = \frac{1}{2\delta_b} \cos \frac{y_n \delta_b}{r_0} \left[ \begin{array}{l} \sum_{s=1}^m r_{n_s} \sin \left( s \left( 2\pi t - \frac{y_n \delta_b}{r_0} \right) + \alpha_{n_s} \right) - \\ - \sum_{s=1}^m r_{n_s} \sin \left( s \left( 2\pi t + \pi + \frac{y_n \delta_b}{r_0} \right) + \alpha_{n_s} \right) \end{array} \right] + x_n; \quad (20)$$

$$y_n^{me} = \frac{1}{2\delta_b} \cos \frac{x_n \delta_b}{r_0} \left[ \begin{array}{l} \sum_{s=1}^m r_{n_s} \sin \left( s \left( 2\pi t + \frac{\pi}{2} + \frac{x_n \delta_b}{r_0} \right) + \alpha_{n_s} \right) - \\ - \sum_{s=1}^m r_{n_s} \sin \left( s \left( 2\pi t + \frac{3\pi}{2} - \frac{x_n \delta_b}{r_0} \right) + \alpha_{n_s} \right) \end{array} \right] + y_n.$$



*Рисунок 2 – Общий алгоритм основного расчетного модуля*

Эти уравнения применимы к неидеальным измерительным поверхностям, контур поперечного сечения которых описывается с использованием конечного ряда Фурье.

Таким образом, уравнения (18), (7) – (9) и (20) полностью описывают движение жесткого несимметричного ротора на двух РЭМП с учетом биений измерительных втулок и особенностей настройки регуляторов каждого канала управления.

Для численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений на сегодняшний день разработано достаточно большое количество методов [11], их эффективность определяется в основном параметрами системы. В данной работе для системы уравнений (18) были использованы несколько из них, в результате наш выбор остановился на методе Рунге–Кутты четвертого порядка. Этот метод позволяет получить результаты с высокой точностью и приемлемым временем расчета. Кроме того, метод обладает необходимой устойчивостью.

Программные модули, выполняющие численное решение уравнений (18), (7) – (9) и (20) написаны на языке MATLAB [12 – 15]. Общий принцип работы алгоритма основного модуля приведен на рисунке 2.

Тестирование модели проводилось для ротора нагнетателя природного газа со следующими основными параметрами: масса 1500 кг; расстояние между точками опоры 0,7 м; расстояние между точками измерения 1,3 м. Радиальные биения втулок: 50 мкм для передней опоры, 25 мкм – для задней.

Разработанная программа позволяет получать развертки по времени движения опорных точек ротора. На рисунке 3 приведены графики для ротора, вращающегося с постоянной частотой 3000 об/мин.

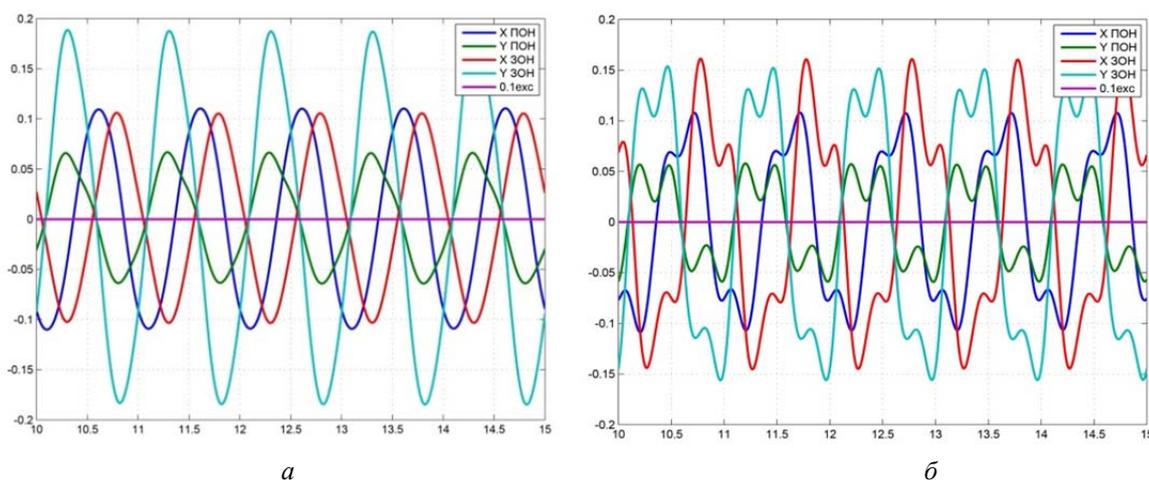


Рисунок 3 – Развертки перемещений опорных участков ротора при численном эксперименте для втулок с поверхностями: а – идеальными; б – с биениями

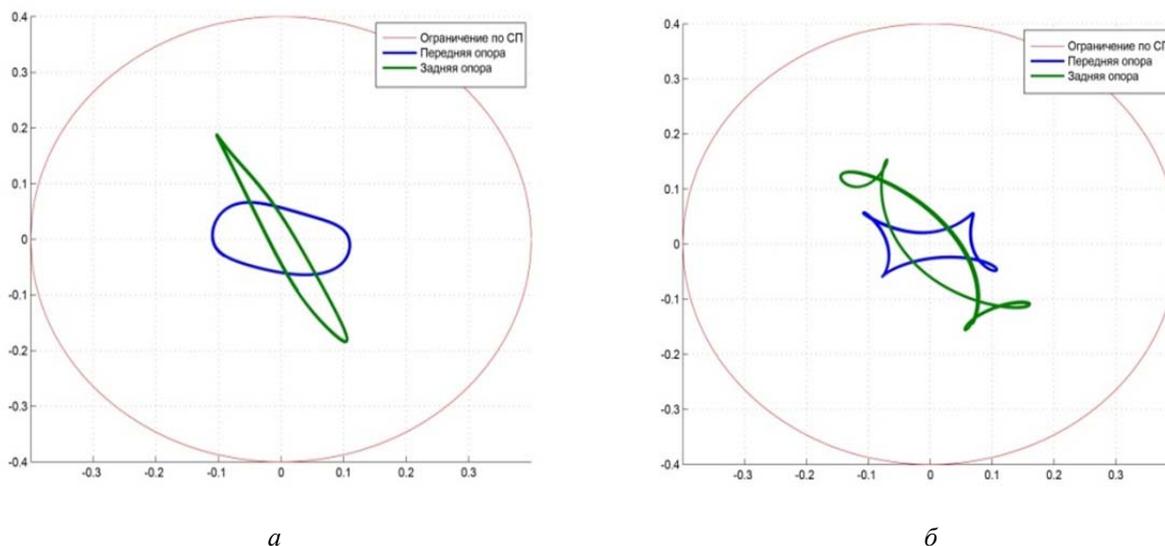


Рисунок 4 – Траектории опорных участков ротора при численном эксперименте для втулок с поверхностями: а – идеальными; б – с биениями

По горизонтальной оси отсчитывается безразмерное время, единица которого соответствует одному обороту ротора при номинальной частоте 3000 об/мин. По вертикали – безразмерное перемещение точек управления ротора, выраженное в долях от номинального зазора  $\delta_b$  между ротором и полюсом статора при центральном положении ротора.

Траектории движения опорных точек (рисунок 4) строятся в тех же безразмерных координатах, которые применяются при построении разверток.

В программе предусмотрена возможность решения уравнений динамики при изменяющейся частоте вращения ротора. Это позволяет моделировать его поведение при разгоне и выбеге.

Таким образом, предложенная модель позволяет:

- 1) моделировать поведение жесткого несимметричного ротора с учетом несовпадения точек управления с точками измерения;
- 2) производить расчеты траекторий движения опорных участков роторов со втулками, имеющими радиальные биения;
- 3) учитывать в расчетах различные настройки регулятора АМП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schweitzer, G. Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery / G. Schweitzer, E.H. Maslen. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 523 p.
2. Maslen, E. H. Magnetic Bearings / E.H. Maslen. – University of Virginia, 2000. – 245 p.
3. Журавлев, Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
4. Соломин, О.В. Моделирование пространственного движения несимметричного жесткого ротора на подшипниках жидкостного трения / Соломин О.В., Майоров С.В. //Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – № 10 – С. 19 – 24.
5. Yamamoto, T. Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications / T. Yamamoto, Y. Ishida. – New York, John Wiley&Sons, 2001. – 326 p.
6. Genta, G. Dynamics of rotating systems / G. Genta. – New York, Springer, 2005. – 660 p.
7. Handbook of rotordynamics / Edited by Ehrich F. – New York, McGraw-Hill, 1992. – 542 p.
8. Adams, M.L. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting / M.L. Adams. – NY: Marcel Dekker, Inc., 2001. – 354 p.
9. Childs, D. Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling and analysis / D. Childs. – New York, John Wiley&Sons, 1993. – 476 p.
10. Kramer, E. Dynamics of rotors and foundations / E. Kramer. – Berlin, Springer-Verlag, 1993. – 384 p.
11. Мэтьюз, Д.Г. Численные методы / Д.Г. Мэтьюз, К.Д. Финк. – М: «Вильямс», 2001. – 720 с.
12. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 416 с.
13. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
14. Солонина, А.И. Цифровая обработка сигналов и MATLAB: учеб. Пособие / А.И. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 512 с.
15. Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В.П. Дьяконов // Библиотека профессионала. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

**Савин Леонид Алексеевич**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой  
«Мехатроника и международный инжиниринг»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: (4862) 41-98-85  
E-mail: savin@ostu.ru

**Майоров Сергей Владимирович**  
НТЦ «АРМ» Орел  
Программист, кандидат технических наук, докторант  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302020, Орел, Наугорское ш., 5  
Тел.: (498) 600-25-10  
E-mail: sergeyostu@ya.ru

**Смирнов Николай Николаевич**  
ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»  
инженер  
107078, г. Москва, Хоромный тупик, дом 4, строение 1  
Тел.: (495) 608-84-67  
E-mail: smirnov\_nn@inbox.ru

**Попиков Александр Александрович**  
НИУ МИСиС  
кандидат технических наук, доцент  
119991, Москва, Ленинский пр-т, 4  
Тел.: (499) 236-30-78  
E-mail: sanyok\_s@bk.ru

N.N. SMIRNOV, L.A. SAVIN, S.V. MAYOROV, A.A. POPIKOV

## SOLUTION NONLINEAR ROTOR DYNAMICS PROBLEMS ON ACTIVE MAGNETIC BEARINGS WITH SHAPE DEVIATIONS OF THE MEASURING SLEEVE

*Sensitive analysis geometric deviations measuring surfaces of control system for active magnetic support on nonlinear rotor dynamics is performed. First proposed a mathematical model for nonsymmetrical rigid rotor and solution method of system differential equations with the influence of shape deviations of the measuring sleeve to control signals. Results of dynamics simulation for natural gas centrifugal pump rotor is presented.*

**Keywords:** nonlinear dynamic analysis, rotor dynamics, active magnetic bearing, shape deviations, measuring surface.

### BIBLIOGRAPHY

1. Schweitzer, G. Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery / G. Schweitzer, E.H. Maslen. – Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 523 p.
2. Maslen, E. H. Magnetic Bearings / E.H. Maslen. – University of Virginia, 2000. – 245 p.
3. Zhuravlev, Yu.N. Aktivnyye magnitnyye podshipniki: teoriya, raschet, primeneniye / Yu.N. Zhuravlev. – SPb.: Politekhnika, 2003. – 206 s.
4. Solomin, O.V. Modelirovaniye prostranstvennogo dvizheniya nesimmetrichnogo zhestkogo rotora na podshipnikakh zhidkostnogo treniya / Solomin O.V., Mayorov S.V. //Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye. – 2007. – № 10. – S. 19 – 24.
5. Yamamoto, T. Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications / T. Yamamoto, Y. Ishida. – New York, John Willey&Sons, 2001. – 326 p.
6. Genta, G. Dynamics of rotating systems / G. Genta. – New York, Springer, 2005. – 660 p.
7. Handbook of rotordynamics / Edited by Ehrich F. – New York, McGraw–Hill, 1992. – 542 p.
8. Adams, M.L. Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting / M.L. Adams. – NY: Marcel Dekker, Inc., 2001. – 354 p.
9. Childs, D. Turbomachinery rotordynamics: phenomena, modeling and analysis / D. Childs. – New York, John Willey&Sons, 1993. – 476 p.
10. Kramer, E. Dynamics of rotors and foundations / E. Kramer. – Berlin, Springer–Verlag, 1993. – 384 p.
11. Metyuz, D.G. Chislennyye metody / D.G. Metyuz, K.D. Fink. – M: «Vilyams», 2001. – 720 s.
12. Yurevich, Ye.I. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya / Ye.I. Yurevich. – 2–ye izd., pererab. i dop. – M.: Energiya, 1975. – 416 s.
13. Besekerskiy, V.A. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya / V.A. Besekerskiy, Ye.P. Popov. – Izd. 4–ye pererab. i dop. – Spb.: Professiya, 2003. – 752 s.
14. Solonina, A.I. Tsifrovaya obrabotka signalov i MATLAB: ucheb. Posobiye / A.I. Solonina, D.M. Klion-skiy, T.V. Merkucheva, S.N. Perov. – SPb.: BKHV–Peterburg, 2013. – 512 s.
15. Dyakonov, V.P. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii / V.P. Dyakonov // Biblioteka professionala. – M.: SOLON–Press, 2005. – 576 s.

#### Savin Leonid Alekseevich

«State University – ESPC»

Doctor of technical studies, professor, chair of the dept. of  
Mechatronics and International Engineering  
302020, Oryol, Naugorskoe sh., 29  
Tel.: (4862) 41–98–85  
E–mail: savin@ostu.ru

#### Smirnov Nikolay Nikolayevich

«Joint Stock Company ‘Research and Production Corpora-  
tion ‘Space Monitoring Systems, Information & Control  
and Electromechanical Complexes’ named after A.G.  
Iosifian»  
Engineer  
107078, Moscow, Khoromny tupik, 4–1  
Tel.: (495) 608–84–67  
E–mail: smirnov\_nn@inbox.ru

#### Mayorov Sergey Vladimirovich

STC APM

Programmer, PhD, doctorant «State University – ESPC»  
302020, Oryol, Naugorskoe sh. 5  
Tel.: (498) 600–25–10  
E–mail: sergeyostu@ya.ru

#### Popikov Aleksandr Aleksandrovich

National University of Science and Technology MISiS  
PhD, docent  
119991, Moscow, Leninsky prospect, 4  
Tel.: (499) 236–30–78  
E–mail: sanyok\_s@bk.ru

Н.А. ЩУКИНА

## ЭФФЕКТЫ ВТОРОГО ПОРЯДКА В ЗАДАЧЕ О КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ОКОЛО ТРЕУГОЛЬНОГО ОТВЕРСТИЯ

*Статья посвящена решению задачи о концентрации напряжений в пакете Maple. В рамках эффектов второго порядка получено аналитическое решение задачи о концентрации напряжений на контуре отверстия, свободного от нагрузок, при одноосном растяжении. На примере треугольного контура исследован нелинейный эффект зависимости коэффициента концентрации напряжений от уровня внешней нагрузки.*

**Ключевые слова:** коэффициент концентрации напряжений; нелинейная теория упругости; эффекты второго порядка.

В настоящее время поиск аналитических решений задач нелинейной теории упругости является достаточно сложной задачей. Одной из сложностей при построении математических моделей таких задач является учет несжимаемости материала. Условие несжимаемости несет дополнительную информацию о геометрии деформирования и увеличивает размерность задачи при использовании вариационных методов при его учете с помощью множителей Лагранжа. В работе [1] предложена приближенная математическая модель нелинейной теории упругости для плоской деформации однородного изотропного материала, в рамках которой условие несжимаемости выполняется автоматически. В качестве метода построения приближенной модели плоской деформации используется метод возмущений, использующий разложения по степеням малого параметра объекты, описывающие напряженно-деформированное состояние. Однако из-за громоздких вычислений разложение выше второго порядка практически не используется. Появление современных пакетов символьной математики позволяет написать программы, облегчающие манипулирование с громоздкими выражениями, описывающими эффекты третьего порядка при произвольном напряженно-деформированном состоянии. Эти эффекты выделяются при ограничении разложений для радиус-вектора частиц в текущей конфигурации  $R$  и функции гидростатического давления  $p$  членами до третьего порядка по малому параметру  $\eta$ .

**Математическая постановка задачи.** В рамках рассматриваемой модели можно ограничиться выражением для потенциала энергии деформации в форме, предложенной в [2]:

$$w = \frac{1}{6} \left\{ (3\mu + \mu_1) [I_1(G) - 3] - \mu_1 [I_2(G) - 3] + \frac{\mu_2 + \mu_1 - \mu}{8} [I_2(G) - 3]^2 \right\},$$

где  $\mu$ ,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – константы, причем  $\mu$  – модуль сдвига линейной теории;

$I_k(G)$  – главные инварианты меры деформации Коши  $G$ .

Для эффектов первого, второго и третьего порядков получаем три краевые задачи линейной теории упругости. Для их решения используем аналитические методы линейной теории упругости.

Следуя работе [3], разложение радиус-вектора точек в плоскости, ортогональной оси  $OZ$ , в текущей конфигурации представляется в виде

$$R = r + \nabla f \eta + \left( \nabla f \cdot \nabla \nabla f + \nabla h \right) \frac{\eta^2}{2} + \left[ \nabla f \cdot \nabla \left( \nabla f \cdot \nabla \nabla f + 3 \nabla h \right) + \nabla g \right] \frac{\eta^3}{6} \quad (1)$$

где  $r$  – радиус-вектор точек в отсчетной конфигурации,

$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y}$  – оператор Гамильтона в базе исходной конфигурации,

$\overset{s}{\nabla} = -i \frac{\partial}{\partial y} + j \frac{\partial}{\partial x}$  – симплектический оператор.

Дифференциальные операторы действуют только на первый множитель справа, не являющийся оператором. Точка означает скалярное произведение.

Используя разложение (1), получим представления в рамках эффектов второго порядка тензора напряжений Коши:

$$S = \sigma \eta + S_2 \eta^2 + S_3 \eta^3, \quad (2)$$

где  $\sigma = 2\mu(\varepsilon_1 + p_1 E)$ ;

$$S_2 = 2\mu \left( \frac{1}{2} \varepsilon_2 + (p_2 - I_1(B) + \alpha \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_1) E + \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f \cdot \varepsilon_1 + B + B^T \right);$$

$$S_3 = 2\mu \left( \frac{1}{6} \varepsilon_3 + (p_3 - I_1(A) - I_1(C) + 2p_1 I_1(B) + 4\alpha \alpha_1 \cdot B + \alpha \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2) E - I_1(B) \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f + 2\alpha \alpha_1 \cdot \varepsilon_1 \varepsilon_1 - p_1 \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f \cdot \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f + \left( 2B^T + \frac{1}{2} \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} h \right) \cdot \varepsilon_1 + \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f \cdot \left( B + B^T + \frac{1}{2} \varepsilon_2 \right) + A + A^T + C + C^T \right);$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left( \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f + \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f \right);$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} \left( \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} h + \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} h \right);$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{2} \left( \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} g + \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} g \right);$$

$$\alpha = \frac{\mu_2 - \mu_1 - \mu}{12\mu};$$

$$A = \frac{1}{4} \overset{0}{\nabla} \left( \overset{s}{\nabla} f \cdot \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} h \right) = \frac{1}{4} \left( \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \cdot \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} h + \overset{s}{\nabla} f \cdot \overset{0}{\nabla} \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} h \right);$$

$$B = \frac{1}{4} \overset{0}{\nabla} \left( \overset{s}{\nabla} f \cdot \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \right) = \frac{1}{4} \left( \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \cdot \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f + \overset{s}{\nabla} f \cdot \overset{0}{\nabla} \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \right);$$

$$C = \frac{1}{3} \overset{0}{\nabla} \left( \overset{s}{\nabla} f \cdot B \right) = \frac{1}{3} \left( \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \cdot B + \overset{0}{\nabla} B^T \cdot \overset{s}{\nabla} f \right);$$

$p = \mu \left( -\frac{1}{2} + p_1 \eta + p_2 \eta^2 \right)$  – функция, связанная с гидростатическим давлением;

знак «Т» – транспонирование.

Уравнения равновесия приводятся к системам дифференциальных уравнений для эффектов первого, второго и третьего порядков соответственно:

$$2 \overset{0}{\nabla} p_1 + \overset{s}{\nabla} \Delta f = 0,$$

$$\overset{0}{\nabla} (p_2 - I_1(B) + \alpha \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_1) + \frac{1}{4} \overset{s}{\nabla} \Delta h + \frac{1}{2} \overset{s}{\nabla} \Delta f \cdot \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f + \overset{0}{\nabla} \cdot (B + B^T) = 0, \quad (3)$$

$$\overset{0}{\nabla} (p_3 - I_1(A) - I_1(C) + 2p_1 I_1(B) + 4\alpha \alpha_1 \cdot B + \alpha \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2) + \frac{1}{12} \overset{s}{\nabla} \Delta g - \overset{0}{\nabla} p_2 \cdot \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f + \frac{1}{2} \overset{s}{\nabla} \Delta f \cdot \left( 2B^T + \frac{1}{2} \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} h \right) - 2p_1 \overset{0}{\nabla} \cdot (B^T) + \alpha \overset{0}{\nabla} \cdot \left( \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_1 \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \right) + \overset{0}{\nabla} \cdot (A + A^T + C + C^T) = 0$$

Условие интегрируемости системы уравнений (3) для эффектов первого, второго и третьего порядков соответственно приводит к дифференциальным уравнениям:

$$\Delta \Delta f = 0, \quad \Delta \Delta h = 0,$$

$$\frac{1}{12} \Delta \Delta g = \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} p_2 \cdot \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f - \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} p_1 \cdot \left( 2B^T + \frac{1}{2} \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} h \right) + 2 \overset{s}{\nabla} p_1 \overset{0}{\nabla} \cdot B^T - \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} \cdot (A + C) - \alpha \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} \cdot \left( \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_1 \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \right) \quad (4)$$

Заметим, функции  $f(x, y)$  и  $h(x, y)$  – бигармонические, а  $g(x, y)$  представляет собой сумму бигармонической функции и некоторого частного решения дифференциального уравнения (4).

Обозначим  $f = f'\eta + f''\eta^2 + f'''\eta^3$  – вектор плотности внешних сил, приложенный к деформированной боковой поверхности и рассчитанный на единицу площади этой поверхности. Тогда силовые граничные условия в напряжениях запишутся в виде

$$\begin{aligned} n \cdot (\varepsilon_1 + p_1 E) &= f_1, \\ n \cdot \left( \frac{1}{2} \varepsilon_2 + (p_2 - I_1(B) + \alpha \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_1) E \right) &= f_2 - n \cdot \left( B + B^T - p_1 \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f \right), \\ n \cdot \left( \frac{1}{6} \varepsilon_3 + (p_3 - I_1(A) - I_1(C) + 2p_1 I_1(B) + 4\alpha \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_1 + \alpha \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2) E \right) &= f_3 + \\ + n \cdot \left( p_2 \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f + p_1 \left( 2B^T + \frac{1}{2} \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} h \right) - (A + A^T + C + C^T) - \alpha \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_1 \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $f_1 = \frac{f'}{2\mu}$ ;

$$f_2 = \frac{f''}{2\mu} - n \cdot \varepsilon_1 \cdot n \frac{f'}{2\mu};$$

$$f_3 = \frac{f'''}{2\mu} - n \cdot \varepsilon_1 \cdot n \frac{f''}{2\mu} - \left[ n \cdot \left( B + B^T + 2\varepsilon_2 + \frac{1}{2} \overset{0}{\nabla} \overset{s}{\nabla} f \cdot \overset{s}{\nabla} \overset{0}{\nabla} f - 2\varepsilon_1^2 \right) \cdot n + \frac{1}{2} (n \cdot \varepsilon_1 \cdot n)^2 \right] \frac{f'}{2\mu}.$$

Если плотность внешних сил  $f = f'\eta + f''\eta^2 + f'''\eta^3$  задана в отсчетной конфигурации, а нагружение «мертвое», то  $f_1 = \frac{f'}{2\mu}$ ,  $f_2 = \frac{f''}{2\mu}$ ,  $f_3 = \frac{f'''}{2\mu}$ .

Выражения (1) – (5) представляют постановку граничной задачи нелинейной теории упругости. Так как уравнения (4) для эффектов первого и второго порядков приводят к бигармоническим уравнениям относительно искомым функций  $f(x, y)$  и  $h(x, y)$ , то поиск аналитического решения краевых задач для эффектов первого и второго порядка можно проводить единым образом в автоматическом режиме. В эффектах третьего порядка аналогичное уравнение является неоднородным бигармоническим уравнением с правой частью, зависящей от решений, полученных для разложения по степеням малого параметра до первого и второго порядков включительно. Этот факт не позволяет применять те же подходы, при нахождении решений. Поэтому автоматизация расчетов в системе Maple проводится для разложения по степеням малого параметра до второго порядка включительно.

С помощью стандартной процедуры [4**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] граничные задачи линейной теории упругости для эффектов первого и второго порядков сводятся к интегральным уравнениям теории функций комплексной переменной. Рассматриваются только области, которые можно конформно отобразить на внешность окружности единичного радиуса с центром в начале координат с помощью функции вида:

$$z = v(\xi) = \xi + \sum_{k=0}^n \frac{a_k}{\xi^k},$$

где  $a_k = \text{const}$ .

Для этих областей интегральные уравнения теории функций комплексной переменной приводятся к алгебраическим уравнениям с помощью интегралов типа Коши.

Перейдем к комплексным переменным  $z = x + iy$ ,  $\bar{z} = x - iy$  и введем комплексные потенциалы по формуле Гурса:

$$\begin{aligned} f(z, \bar{z}) &= z\theta(\bar{z}) + \bar{z}\theta(z) + \chi(z) + \chi(\bar{z}), \\ h(z, \bar{z}) &= z\zeta(\bar{z}) + \bar{z}\zeta(z) + \psi(z) + \psi(\bar{z}). \end{aligned}$$

Для данных потенциалов уравнения (4) выполняются тождественно, а решением системы уравнений равновесия (3) являются функции:

$$\begin{aligned} p_1(z, \bar{z}) &= 2i(\theta'(\bar{z}) - \theta'(z)), \\ p_2(z, \bar{z}) &= -2a\bar{a}(4\alpha + 1) - 2b\theta''(z) - 2\bar{b}\theta''(\bar{z}) + i(\zeta'(\bar{z}) - \zeta'(z)), \end{aligned}$$

где  $a = z\theta''(\bar{z}) + \chi''(\bar{z})$ ,

$$\bar{a} = \bar{z}\theta''(z) + \chi''(z),$$

$$b = z\theta'(\bar{z}) + \theta(z) + \chi'(\bar{z}),$$

$$\bar{b} = \bar{z}\theta'(z) + \theta(\bar{z}) + \chi'(z).$$

Искомые потенциалы аппроксимируются разложением в ряды Лорана, а коэффициенты находятся из условия удовлетворения граничным условиям (5) на бесконечности и на контуре отверстия. На бесконечности с помощью предельного перехода получаем конечную систему линейных алгебраических уравнений для части коэффициентов разложения. Получение уравнений для оставшихся коэффициентов требует вычисления интегралов типа Коши на контуре отверстия. Т.к. на свободном от нагрузки контуре нормальные напряжения равны нулю, то тангенциальные напряжения на контуре, потребные для вычисления коэффициента концентрации, вычисляются в виде инварианта  $\sigma_{\tau\tau} = \sigma_{\tau\tau} + \sigma_{nn} = \sigma_{11} + \sigma_{22}$  и  $S_{\tau\tau} = S_{\tau\tau} + S_{nn} = S_{11} + S_{22}$  для эффектов первого и второго порядков соответственно.

Для нахождения аналитического решения задач о концентрации напряжений около отверстий на базе пакета символьной математики Maple создан комплекс программ, позволяющий автоматизировать символьные вычисления. Алгоритм реализован в рамках эффектов второго порядка и позволяет находить выражение коэффициента концентрации напряжений для различных форм отверстия при различных видах деформации. Основная идея, положенная в основу создания специализированной библиотеки, повышающая ее практическую ценность, состоит в том, что она не вычисляет объекты по готовым формулам (2) – (5), а начинает вычислять разложения этих объектов, начиная с разложения вектора перемещения, автоматически удовлетворяющего условию несжимаемости. Пакет Maple обладает пакетом rowseries для работы с рядами, что позволяет проводить все алгебраические операции над ними в предположении их абсолютной сходимости. Этим рядам можно придать вид разложения по малому параметру и зафиксировать порядок представления результата относительно данного параметра. Так можно моделировать эффекты первого, второго или третьего порядка. В созданной библиотеке программ эти операции распространены на тензоры до второго порядка включительно, компоненты которых являются рядами по малому параметру.

**Задача о концентрации напряжений около треугольного отверстия при одноосном растяжении на бесконечности.** Без потери общности будем считать радиус отверстия равным единице. Контур отверстия свободен от напряжений. На бесконечности приложена радиальная нагрузка интенсивности  $p = \mu\eta$  в направлении оси  $OX$ .

Введем единичный базис  $e_1 = \cos \varphi i + \sin \varphi j$ ,  $e_2 = -\sin \varphi i + \cos \varphi j$ ,  $e_3 = k$  цилиндрической системы координат  $\{r, \varphi, z\}$ .

Коэффициент концентрации напряжений в нелинейной теории, как и в классическом решении линейной теории, будем определять как  $k = \frac{S_{22}}{p} \Big|_{r=1}$ ,

где  $S_{22}$  – тангенциальная компонента «плоской» части тензора истинных напряжений Коши  $S = S_{11}e_1e_1 + S_{22}e_2e_2$ .

Представление этой компоненты в рамках приближенной теории имеет вид  $S_{22} = \sigma_{22}\eta + S''_{22}\eta^2$ , откуда, вспоминая, что  $p = \mu\eta$ , получим выражение для коэффициента концентрации в рамках приближенной теории:

$$k = \frac{S_{22}}{p} \Big|_{r=1} = \frac{\sigma_{22}\eta + S''_{22}\eta^2}{\mu\eta} \Big|_{r=1} = \frac{\sigma_{22}}{\mu} \Big|_{r=1} + \frac{S''_{22}\eta}{\mu} \Big|_{r=1} = k_1 + k_2\eta.$$

Конформное отображение внешности треугольника на внешность круга  $|\xi| \geq 1$  задается формулой  $z = \xi + \frac{1}{3\xi^3} + \frac{1}{45\xi^5}$ . На бесконечности приложена равномерная нагрузка

интенсивности  $p = \mu\eta$ , где  $\eta$  – малый параметр. Тогда на бесконечности вектор внешних сил  $f = f'\eta + f''\eta^2$  на площадках с нормальным вектором  $i$  имеет разложение  $f' = \mu i$ ,  $f'' = 0$ , а на площадке с нормальным вектором  $j$  разложение –  $f' = 0$ ,  $f'' = 0$ .

Параметрические уравнения контура отверстия имеют вид:

$$x = \frac{2}{45} \cos \varphi (8 \cos^4 \varphi - 10 \cos^2 \varphi + 15 \cos \varphi) - \frac{1}{3},$$

$$y = -\frac{2}{45} \sin \varphi (8 \cos^4 \varphi - 6 \cos^2 \varphi + 15 \cos \varphi - 22).$$

Вершинам этого треугольника соответствуют значения параметра  $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pm \frac{2\pi}{3}$ .

Для линейного приближения наибольшее значение относительного инварианта  $\frac{S_{22}}{p}$  тензора Коши достигается в вершине треугольника, которой соответствует значение  $\varphi = 0$ , и равно  $k_1 = \frac{259292}{14491}$ . Для квадратичного приближения разложение коэффициента концентрации напряжений по малому параметру  $\eta$  в той же вершине треугольного отверстия принимает вид  $k = \frac{259292}{14491} - \frac{20876989069059}{1132251124752}\eta$ . Таким образом, наблюдаем уменьшение значения тангенциальных напряжений с увеличением величины интенсивности приложенной внешней нагрузки  $p$ . При этом при всех значениях параметра  $\eta$  наблюдаем эффект раздвоения максимума относительно вершины треугольного отверстия, а в самой вершине треугольника достигается минимум.

При  $\varphi = \pm \frac{2\pi}{3}$  разложение коэффициента концентрации по степеням параметра  $\eta$  принимает вид  $k = \frac{50312}{14491} + \frac{44916386503089}{4529044499008}\eta$ . Таким образом, учет нелинейности в области концентратора напряжений приводит к увеличению величины относительного инварианта тензора Коши.

Графики распределения относительных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре отверстия, свободном от нагрузок, вычисленных в рамках эффектов первого и второго порядков при различных значениях параметра  $\eta$ , изображены на рисунке 1, рисунке 2, рисунке 3. Тонкая линия соответствует решению в рамках линейной теории, толстая линия соответствует квадратичному решению.

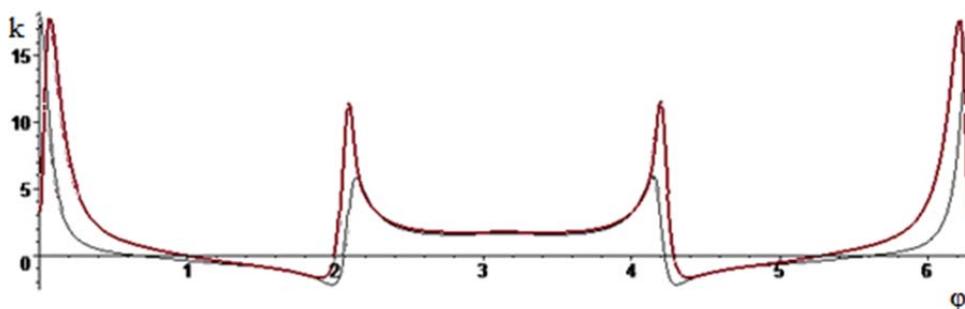


Рисунок 1 – Распределение относительных тангенциальных напряжений на контуре отверстия (развертка) при  $\eta=0,8$

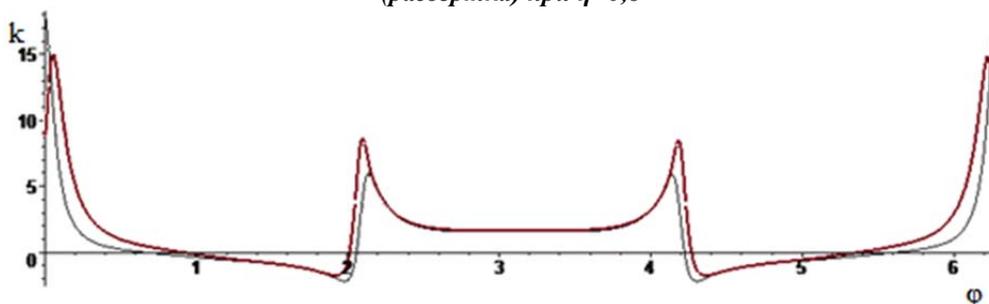


Рисунок 2 – Распределение относительных тангенциальных напряжений на контуре отверстия (развертка) при  $\eta=0,5$

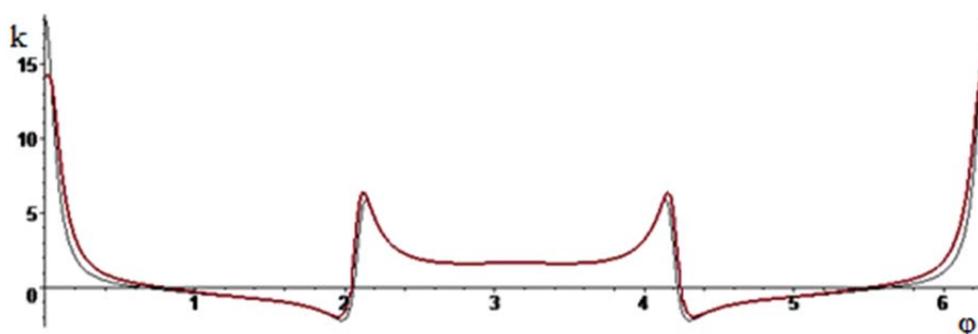


Рисунок 3 – Распределение относительных тангенциальных напряжений на контуре отверстия (развертка) при  $\eta=0,2$

Как видно из графиков, в квадратичном приближении при различных значениях параметра  $\eta$  максимум величины коэффициента концентрации напряжений достигается при различных значениях  $\phi$ . При этом величина максимального значения коэффициента концентрации напряжений  $k$ , по сравнению с классическим решением линейной теории, уменьшается. Величина максимального значения относительных тангенциальных напряжений и соответствующие значения параметра  $\phi$  в зависимости от величины малого параметра  $\eta$  сведены в таблицу 1.

Построенная приближенная математическая модель позволяет осуществлять поиск аналитического решения плоских задач нелинейной теории упругости о концентрации напряжений около отверстий на базе математического пакета Maple.

Данный алгоритм применен для решения задачи о концентрации напряжений около треугольного отверстия при одноосном растяжении в направлении оси  $OX$ . Показано, что учет нелинейности в области концентраторов напряжений не только снижает значение тангенциальных напряжений, но и позволяет говорить об эффекте раздвоения одного максимума в вершине угловой точки на два симметричных максимума в окрестности данной вершины.

Таблица 1 – Зависимость максимального значения коэффициента концентрации от внешней нагрузки

$\eta = \frac{p}{\mu}$	$k_{\max}$	$\Phi_{\max}$
0,1	16,04949805	$0,9148567918 \times 10^{-5}$
0,2	14,26206560	0,01816406250
0,3	13,78422285	0,03749914074
0,4	14,19346371	0,05170669557
0,5	14,90903507	0,05859375000
0,6	15,42427587	0,07500001795
0,7	16,56204642	0,07500013857
0,8	17,69982180	0,07500014305
0,9	18,83760132	0,07500028387

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков, Б.А. Эффекты третьего порядка в исследовании концентрации напряжений около отверстий / Б.А. Жуков, Н.А. Щукина // Известия ВолгГТУ. – 2010. – Т. 1. – № 3. – С. 113–118.
2. Жуков, Б.А. Модель эффектов третьего порядка в статических задачах расчетов резинотехнических изделий / Б.А. Жуков, Н.А. Щукина // Изв. вузов. Сев.–Кавк. регион. Серия Естественные науки. – 2010. – № 3. – С. 24–27.
3. Жуков, Б.А. Один вариант метода Синьорини при плоской деформации несжимаемого материала / Б.А. Жуков // Изв. РАН. МТТ. – 2001. – № 4. – С. 59–67.
4. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. 5-е изд / Н.И. Мусхелишвили. М.: Наука, 1966. – 707 с.

**Щукина Наталья Александровна**

Московский государственный университет экономики, статистики и информатики (МЭСИ), г. Москва  
Кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики  
E-mail: shchukinan@ya.ru

N.A. SHCHUKINA

## SECOND-ORDER EFFECTS IN THE PROBLEM OF THE CONCENTRATION VOLTAGE ABOUT TRIANGULAR OPENING

*This article is devoted to stress concentration problem in Maple. As part of the second-order effects obtained the analytical solution for the stress concentration on relaxed hole contour in case of uniaxial tension. Considered example of the triangular hole. The influence of external loads on the stress concentration factor.*

**Keywords:** the stress concentration factor; non-linear elasticity theory; the second order effects.

### BIBLIOGRAPHY

1. Zhukov, B.A. Effekty tretyego poryadka v issledovanii konsentratsii napryazheniy okolo otverstiy / B.A. Zhukov, N.A. Shchukina // Izvestiya VolgGTU. – 2010. – Т. 1. – № 3. – С. 113–118.
2. Zhukov, B.A. Model effektov tretyego poryadka v staticheskikh zadachakh raschetov rezinotekhnicheskikh izdeliy / B.A. Zhukov, N.A. Shchukina // Izv. vuzov. Sev.–Kavk. region. Seriya Yestestvennyye nauki. – 2010. – № 3. – С. 24–27.
3. Zhukov, B.A. Odin variant metoda Sinorini pri ploskoy deformatsii neszhimayemogo materiala / B.A. Zhukov // Izv. RAN. MTT. – 2001. – № 4. – С. 59–67.
4. Muskhelishvili, N.I. Nekotoryye osnovnyye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti. 5-ye izd / N.I. Muskhelishvili. M.: Nauka, 1966. – 707 s.

**Shchukina Nataliya Aleksandrovna**

Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics (MESI), Moscow  
Ph.D., Associate Professor, Department of Applied Mathematics  
E-mail: shchukinan@ya.ru

Е.А. МАШКОВ

## УПРУГО–ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕПЕСТКОВОГО ПОДШИПНИКА В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РОТОРНЫХ СИСТЕМАХ

*Рассматривается течение жидкости в канале с упругой поверхностью. Моделирование процесса деформаций осуществляется методом конечных элементов. Исследуется геометрия канала в зависимости от различных значений модуля упругости материала упругой поверхности.*

**Ключевые слова:** задача упругости, гидродинамика, метод конечных элементов.

В современном турбостроении можно констатировать расширение сферы применения различных видов пластических и композитных материалов с выраженными упругими свойствами, а также элементов машин с подвижными и деформируемыми звеньями [1–4]. Одним из перспективных видов опор высокоскоростных роторов обоснованно считаются лепестковые газодинамические подшипники, обладающие низким коэффициентом трения, высоким уровнем динамической устойчивости и предельной быстроходностью [1, 2, 5]. Растущие требования к эффективности и надежности турбомашин, а также расширение диапазона параметров и условий эксплуатации создают предпосылки для их непрерывного конструктивного и технологического совершенствования [3–5]. В настоящее время рассматривается вопрос о практическом применении многолепестковых подшипников при смазке маловязкими жидкостями, что значительно улучшает важные характеристики работы турбомшины [4–6].

Для формирования инженерных методик расчета таких подшипников требуется решение комплекса взаимосвязанных задач по моделированию течения вязких сред в упругих каналах, в частности оценки влияния тепловых факторов [1, 6, 5]. В случае газодинамического подшипника вопрос деформации лепестка стоит наиболее остро. Образующийся между ним и валом клиновидный зазор создает подъемную силу. Выдерживающий ее материал лепестка является обязательным условием работы подшипника [3, 5]. Поэтому вопрос моделирования клиновидных систем является актуальным [4]. Целью данной статьи является моделирование течения жидкости в канале, верхней ограничивающей поверхностью которого является пластиной переменного сечения. Его деформации описываются методом конечных элементов. В конце статьи приводится пример использования построенной модели.

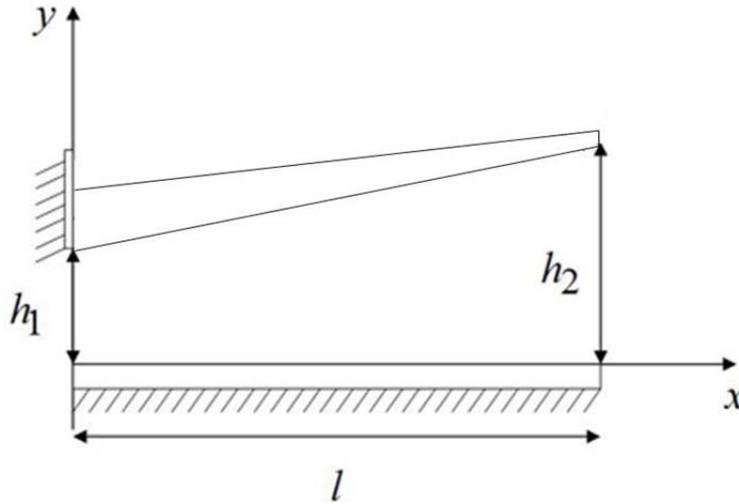
Представленный на рисунке 1 канал состоит из двух поверхностей, образующих зазор. Причем, нижняя пластина, является идеально жесткой, верхняя – идеально упругой (модуль ее упругости  $E$ ). Предположим, что движение вязкой несжимаемой жидкости происходит за счет движения нижней поверхности вдоль оси  $x$  со скоростью  $U$ . Длина  $l$  канала намного превосходит толщину  $b_i$  и ширину  $a_i$  любого  $i$ -ого поперечного сечения верхней пластины. В связи с этим можно положить ее обычным стержнем. Основные допущения сопромата для такого стержня принимаются и здесь [7]. Считаем, что любые деформации этого стержня являются упругими.

Положим, что средняя величина зазора  $h_{cp}$  в канале намного меньше его длины  $l$ . Поэтому, для описания поля давлений приемлемо воспользоваться дифференциальным уравнением Рейнольдса [5, 8–10]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6U\mu \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (1)$$

Условия течения жидкости описываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 \quad p &= p_1, \\ \text{при } x = l \quad p &= p_2. \end{aligned} \tag{2}$$



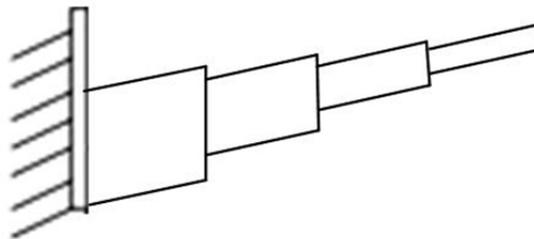
*Рисунок 1 – Общая схема движения жидкости в упругом канале*

К моменту начала движения жидкости в зазоре возникает первоначальное поле давлений. Подъемная сила начинает деформировать упругий стержень [9, 11]. Это, как видно по формуле (1), непременно вызывает изменение давления в слое. Изменение геометрии канала, и формирование нового поля давлений есть взаимосвязанные непрерывные процессы. Они продолжаются до тех пор, пока в какой-то момент времени система не придет в равновесное состояние.

Описанное взаимодействие жидкости и упругого канала переведем к дискретному аналогу, первоначально положив, что давление изменяется достаточно медленно.

Моделирование движения жидкости в канале будет происходить согласно итерационному принципу: расчет давления в слое – расчет деформации стержня – расчет давления в слое – расчет деформации стержня и т.д. Таким образом, первое давление преобразовывает упругую поверхность. Меняется форма зазора. Рассчитывается второе давление, которое создает новые прогибы верхней поверхности [12]. И так до тех пор, пока отклонение крайней правой точки стержня от его предыдущего положения будет по модулю меньше некоторой  $\epsilon$ .

Задачу упругости стержня будем решать методом конечных элементов. Для этого стержень разобьем на  $n$  стержней, жесткость которых, соответствует жесткости данного участка (рисунок 2). На рисунке 2 это наглядно отображено в виде толщины элемента.



*Рисунок 2 – Модель стержня, представленная системой из четырех конечных элементов*

Нахождение вектора-столбца  $\{Z\}$  перемещений узлов от нагрузки на них происходит посредством решения матричного уравнения [10]:

$$[K] \times \{Z\} = \{F\} . \quad (3)$$

где  $[K]$  – глобальная матрица жесткости,  $\{F\}$  – вектор–столбец нагрузок.

Из многообразия конечных элементов выберем стержневые каждый узел которых, характеризуется тремя перемещениями – двумя линейными и одним угловым (рисунок 3).

Для формирования глобальной матрицы жесткости  $[K]$  размерностью  $3n \times 3n$  для начала, необходимо найти матрицы жесткости  $[k_{(i)}]$  каждого  $i$ -ого элемента в общей системе координат отдельно. Затем по определенным правилам собрать их воедино. Процесс нахождения матрицы  $[K]$  подробно описан в пособии [7].

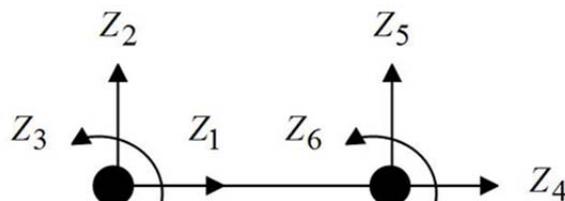


Рисунок 3 – *Стержневой конечный элемент:  $Z_1 - Z_6$  перемещения соответствующих узлов*

Отметим, что матрица жесткости  $[k_{(i)}]$  любого  $i$  элемента в общей системе координат находится согласно следующему алгоритму:

1) формируется матрица жесткости  $[k_{(i)}^*]$  в своей, локальной системе координат:

$$[k_{(i)}^*] = \begin{bmatrix} \frac{E_i A_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{E_i A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12E_i J_i}{l_i^3} & \frac{6E_i J_i}{l_i^2} & 0 & -\frac{12E_i J_i}{l_i^3} & \frac{6E_i J_i}{l_i^2} \\ 0 & \frac{6E_i J_i}{l_i^2} & \frac{4E_i J_i}{l_i} & 0 & -\frac{6E_i J_i}{l_i^2} & \frac{2E_i J_i}{l_i} \\ -\frac{E_i A_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_i A_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12E_i J_i}{l_i^3} & -\frac{6E_i J_i}{l_i^2} & 0 & \frac{12E_i J_i}{l_i^3} & -\frac{6E_i J_i}{l_i^2} \\ 0 & \frac{6E_i J_i}{l_i^2} & \frac{2E_i J_i}{l_i} & 0 & -\frac{6E_i J_i}{l_i^2} & \frac{4E_i J_i}{l_i} \end{bmatrix} , \quad (4)$$

где  $E_i$  – модуль упругости,

$A_i$  – площадь поперечного сечения,

$J_i$  – момент инерции сечения, относительно главной центральной оси,

$l_i$  – длина  $i$ -ого элемента.

2) Находится матрица направляющих косинусов  $[C_{(i)}]$  в виде:

$$[C_{(i)}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол между осью  $i$  элемента и осью  $x$  координат.

3) Формируется матрица жесткости в общей системе координат:

$$[k_{(i)}] = [k_{(i)}^*] \times [C_{(i)}] \times [C_{(i)}]^T,$$

где  $[C_{(i)}]^T$  есть транспонированная матрица  $[C_{(i)}]$ .

Вектор нагрузки  $\{F\}$  имеет несложную структуру. Его первые три компонента характеризуют действие на первый узел трех нагрузок: горизонтальная сила, вертикальная сила и момент соответственно. Для второго узла отведены 4, 5, 6 компоненты вектора  $\{F\}$ . Таким образом, для  $i$  узла действие нагрузок на него характеризуется  $\{2i, 2i+1, 2i+2\}$  компонентами. Поэтому размерность  $\{F\}$  составляет  $1 \times 3n$ .

Нагрузка от поля давления  $p(x)$ , действующая снизу вверх является неравномерно распределенной. С хорошей плотностью узлов в упругой модели можем допустить, что на каждый узел действует сила равная значению функции давления в соответствующей точке.

Таким образом, вектор столбец  $\{F\}$  принимает следующий вид:

$$\{F\} = \left\{ \underbrace{0, p(x_1), 0, \dots, 0}_{1 \text{ элем.}}, \underbrace{p(x_i), 0, \dots, 0}_{i \text{ элем.}}, \underbrace{0, p(x_n), 0, \dots, 0}_{n \text{ элем.}} \right\}^T.$$

Для решения уравнения (3) не достаточно просто иметь матрицу жесткости  $[K]$  и вектор узловых нагрузок  $\{F\}$ . Важно еще учесть граничные условия упругой модели. В нашем случае стержень имеет жесткое закрепление слева. Поэтому перемещения в соответствующем узле равны 0. Эти условия можно программно учесть следующим образом:

- 1) Обнулить первые три строки столбца матрицы  $[K]$ ;
- 2) Вместо нуля, на пересечении  $i$ -ой строки и  $i$ -ого столбца матрицы  $[K]$  внести 1 ( $i=1..3$ );
- 3) Первые три элемента вектора нагрузок  $\{F\}$  сделать нулевыми.

Более подробно о сути вышеописанного алгоритма можно узнать в пособии [16].

Таким образом, формируя матрицу жесткости  $[K]$ , вектор узловых нагрузок  $\{F\}$  и учитывая граничные условия можно свободно найти искомый вектор узловых перемещений по формуле (3).

Таким образом, решение упруго-гидродинамической задачи свелось к совместному решению уравнений (1) и (3).

Проведем эксперимент на полученной модели. Предположим, что необходимо определить максимальное отклонение  $\chi_{max}$  стержня от первоначального положения (стрела прогиба).

Граничные условия течения жидкости были даны выше. На протяжении всего процесса расчета они будут оставаться неизменными. В качестве модели вязкости среды возьмем вязкость воды  $\mu = 1.002$  мПа при температуре  $t = 20^\circ$ .

Для зазора примем следующие величины:  $h_1 = 10^{-3}$  м,  $h_2 = 1.7 \cdot 10^{-3}$  м,  $l = 0.1$  м.

Предположим, что толщина стержня плавно переходит от значения  $b_0 = 0.0075$  м до  $b_n = 0.0025$  м и изменяется по линейному закону:  $b_i = b_0 + \frac{x}{l}(b_n - b_0)$ . Значение ширины канала неизменно, поэтому везде  $a_i = 0.01$  м. Остальные же параметры примут такие значения:  $p_1 = 6$  Па,  $p_2 = p_1$ ,  $U = 0.1$  м/с,  $n = 33$ . Расчет величин  $A_i$  и  $J_i$  из (3) происходит по довольно известным формулам [7]:

$$A_i = a_i b_i,$$

$$J_i = \int_{A_i} y^2 dA_i.$$

В качестве значения модуля упругости  $E$  возьмем 50 МПа.

В соответствие со всеми условиями и математическими выкладками была написана программа, в которой в каждой итерации рассчитывала как поле давления, так и геометрию канала [11]. Дифференциальное уравнение (1) решалось методом конечных разностей [5, 7, 9, 17].

Расчет упруго–гидродинамической задаче, согласно описанным выше физическим и геометрическим величинам потребовал всего 6 итерации. При этом, конечное отклонение было меньше  $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-7}$  м. Стрела прогиба  $\chi_{max}$  получилась равной 0.024 м. Ниже, на рисунке 4, отображена геометрия канала в каждой итерации, где под любой кривой понимается средняя линия стержня в соответствующей итерации. Первоначальное положение стержня отображено непрерывной линией. Кривые, представленные штриховыми линиями, показывают геометрию стержня на последующих итерациях. Как видно из рисунка 4, уже на 3 итерации стержень меняет свою форму незначительно.

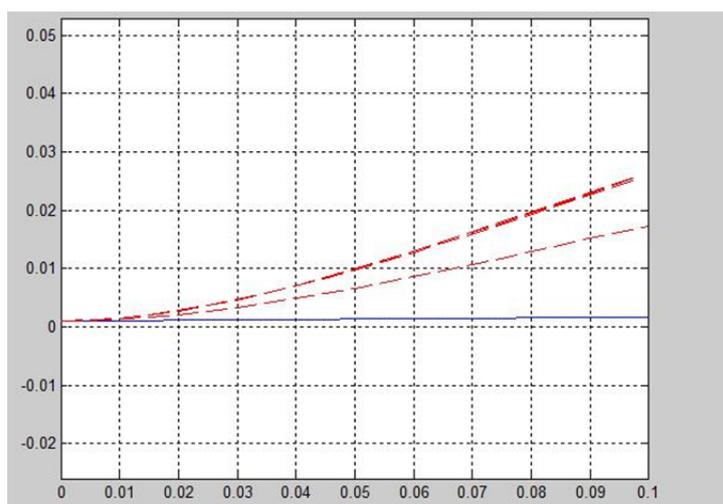
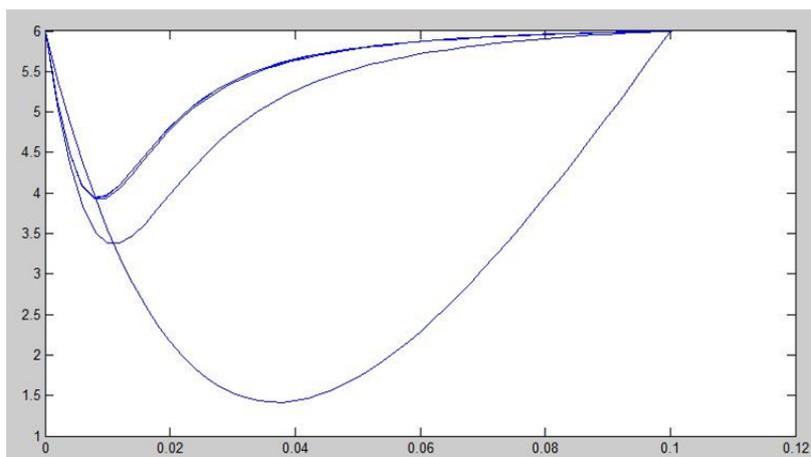


Рисунок 4 – Геометрия канала в каждой итерации

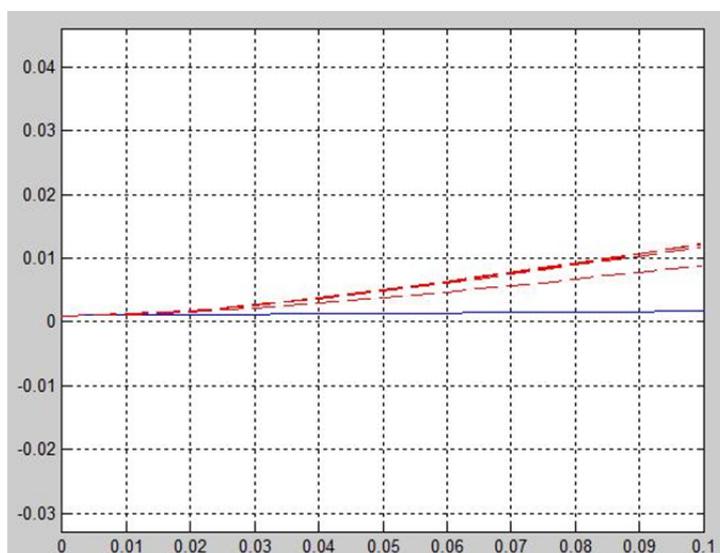
На рисунке 5 представлены эпюры давлений, полученных в процессе каждой итерации. Самая заметная эпюра, напоминающая параболу – есть график давления от первого зазора.

Произведем аналогичный же расчет, но поменяем значение  $E$  на 110 МПа. В результате выходит 13 итераций. На рисунке 6 представлена формирующаяся геометрия канала.

Как и следовало ожидать, деформация стержня при таких условиях меньше чем при прошлом просчете, ведь значения жесткости на растяжение и изгиб стали больше.

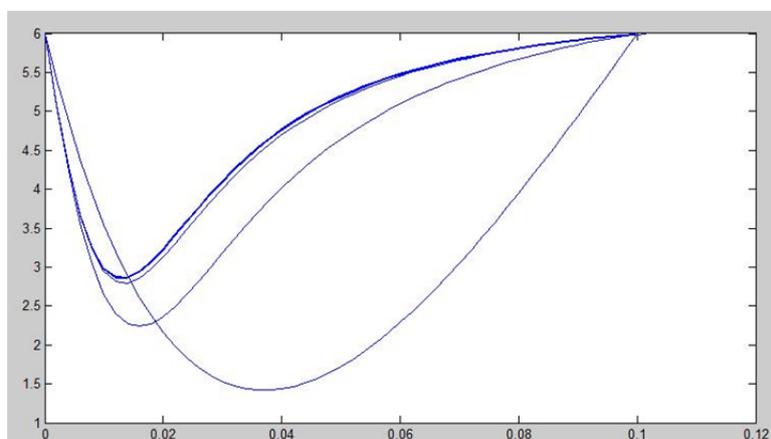


**Рисунок 5 – Эпюры давлений в каждой итерации**



**Рисунок 6 – Геометрия канала в каждой итерации**

На рисунке 7 представлены эпюры давлений. Отметим что при  $E = 110$  МПа отклонение  $\chi_{max} = 0.0105$  м, что в два раза меньше значения  $\chi_{max}$  при  $E = 50$  МПа.



**Рисунок 7 – Эпюры давлений в каждой итерации**

Построенная модель течения жидкости в канале переменной геометрии позволяет произвести расчет полей давлений всякий раз как эта геометрия меняется. Зная силы  $p$ , действующие на упругую модель, можно найти такое значение  $E$ , что деформации стержня будут оставаться упругими. Это позволяет, как избежать появления остаточной деформации в стержне так получить желательное  $\chi_{\max}$ .

В статье была построена методика расчета многолепестковых подшипников в виде комплекса решения взаимосвязанных задач по моделированию течения вязких сред в упругих каналах клиновидной формы. Дальнейшее направление исследования представляется в моделировании гидродинамических лепестковых подшипников с учетом влияния тепловых факторов.

*Работа подготовлена в рамках выполнения проекта №363 «Фундаментальные принципы и теоретические основы наносмазки» государственного задания ФГБОУ ВПО «Государственный–УНПК».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев, А.Ю. Математическая модель неизотермического турбулентного течения смазочного материала в конических опорах жидкостного трения / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, О.В. Соломин // Вестник машиностроения. – 2005. – № 7. – С. 37–42.
2. Корнаев, А.В. Применение метода контрольных объемов в решении задачи о сдвиговом течении жидкости сложной реологии / А.В. Корнаев, Е.П. Корнаева, В.И. Лебединский, Е.А. Машков // Известия Юго–Западного государственного университета. – 2014. – № 5 (56). – С. 9–14.
3. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение–1, 2006. – 444 с.
4. Савин, Л.А. Метод расчета пространственного движения жесткого ротора на опорах жидкостного трения / Л.А. Савин, О.В. Соломин, Д.Е. Устинов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2006. – № 2–1 (10). – С. 328–332.
5. Савин, Л. А. Расчет деформаций кругового гофрированного элемента лепесткового газодинамического подшипника / Л. А. Савин, А. В. Сытин, Д. И. Федоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2008. – № 1. – С. 26–32.
6. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
7. Тухфатуллин, Б.А. Численные методы расчета строительных конструкций. Метод конечных элементов (теория и практика) / Б.А. Тухфатуллин. – Томск: Томский государственный архитектурно–строительный университет, 2013. – 100 с.
8. Кучеряев, Б.В. Механика сплошных сред (Теоретические основы обработки давлением композитных металлов) / Б.В. Кучеряев. – М.: «МИСИС», 2000. – 320с.
9. Слезкин, Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н.А. Слезкин. – М.: Государственное издательство технико–теоретической литературы, 1955. – 520 с.
10. Мидлман, С. Течение полимеров / С. Мидлман. – М.: Мир, 1971. – 260 с.
11. Садовская, О.В. Математическое моделирование в задачах механики сыпучих сред / О.В. Садовская, В.М. Садовский. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
12. Белозерова, Е. Б. К определению динамических реакций балки на упругих опорах / Е.Б. Белозерова, В.И. Чернышев // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. – 2009. – № 1–21. – С. 3–7.
13. Лаптев, Г.Ф. Элементы векторного исчисления / Г.Ф. Лаптев. – М.: Главная редакция физ–мат. литературы, 1975. – 338 с.
14. Наместников, С.М. Основы программирования в MatLab. Сборник лекций / С.М. Наместников. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 55 с.
15. Ильин, В.А. Основы математического анализа / В.А. Ильин, Э.Г. Поздняк. – 7–е изд. – М.: Физматлит, 2005. – Ч.1 – 648 с.
16. Лузин, Н.Н. Дифференциальное исчисление / Н.Н. Лузин. – М.: Государственное издательство «Высшая школа», 1961. – 479 с.
17. Шарый, С.П. Курс вычислительных методов / С.П. Шарый. – Новосибирск: Институт вычислительных технологий СО РАН, 2013. – 497 с.

**Машков Евгений Александрович**

Орловский Государственный Университет, г. Орел  
аспирант кафедры геометрии и методики преподавания математики,  
E–mail: ppsnnt@gmail.com

Ye.A. MASHKOV

## ELASTOHYDRODYNAMIC MODELING IN HIGH-SPEED ROTARY FOIL-BEARING SYSTEMS

*The article is devoted to research of fluid flows in a channel with elastic surface. Modeling of a deformation process is realized by finite element method. Channel geometry is analyzed dependently on different values of elastic modulus of the material surface.*

**Keywords:** *problem of elasticity, fluid dynamics, finite element method.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Korneyev, A.Yu. Matematicheskaya model neizotermicheskogo turbulentnogo techeniya smazochno materiala v konicheskikh oporakh zhidkostnogo terniya / A.Yu. Korneyev, L.A. Savin, O.V. Solomin // Vestnik mashinostroyeniya. – 2005. – № 7. – S. 37–42.
2. Kornayev, A.V. Primeneniye metoda kontrolnykh ob»yemov v reshenii zadachi o sdvigovom techenii zhidkosti slozhnoy reologii / A.V. Kornayev, Ye.P. Kornayeva, V.I. Lebedinskiy, Ye.A. Mashkov // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2014. – № 5 (56). – S. 9–14.
3. Savin, L.A. Modelirovaniye rotornykh sistem s oporami zhidkostnogo treniya / L.A. Savin, O.V. Solomin. – M.: Mashinostroyeniye–1, 2006. – 444 s.
4. Savin, L.A. Metod rascheta prostranstvennogo dvizheniya zhestkogo rotora na oporakh zhidkostnogo treniya / L.A. Savin, O.V. Solomin, D.Ye. Ustinov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolova (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta). – 2006. – № 2–1 (10). – S. 328–332.
5. Savin, L. A. Raschet deformatsiy krugovogo gofirovannogo elementa lepestkovogo gazodinamicheskogo podshipnika / L. A. Savin, A. V. Sytin, D. I. Fedorov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. – 2008. – № 1. – S. 26–32.
6. Patankar, S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti / S. Patankar. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 152 s.
7. Tukhfatullin, B.A. Chislennyye metody rascheta stroitelnykh konstruksiy. Metod konechnykh elementov (teoriya i praktika) / B.A. Tukhfatullin. – Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy arkhitekturno–stroitelnyy universitet, 2013. – 100 s.
8. Kucheryayev, B.V. Mekhanika sploshnykh sred (Teoreticheskiye osnovy obrabotki davleniyem kompozitnykh metallov) / B.V. Kucheryayev. – M.: «MISIS», 2000. – 320s.
9. Slezkin, N.A. Dinamika vyazkoy neszhimayemoy zhidkosti / N.A. Slezkin. – M.: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko–teoreticheskoy literatury, 1955. – 520 s.
10. Midlman, S. Techeniye polimerov / S. Midlman. – M.: Mir, 1971. – 260 s.
11. Sadovskaya, O.V. Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh mekhaniki sypuchikh sred / O.V. Sadovskaya, V.M. Sadovskiy. – M.: Fizmatlit, 2008. – 368 s.
12. Belozerova, Ye. B. K opredeleniyu dinamicheskikh reaktsiy balki na uprugikh oporakh / Ye.B. Belozerova, V.I. Chernyshev // Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport. – 2009. – № 1–21. – S. 3–7.13. Laptev, G.F. Elementy vektornogo ischisleniya / G.F. Laptev. – M.: Glavnaya redaktsiya fiz–mat. literatury, 1975. – 338 s.
14. Namestnikov, S.M. Osnovy programmirovaniya v MatLab. Sbornik lektsiy / S.M. Namestnikov. – Ulyanovsk: UIGTU, 2011. – 55 s.15. Ilin, V.A. Osnovy matematicheskogo analiza / V.A. Ilin, E.G. Pozdnyak. – 7–ye izd. – M.: Fizmatlit, 2005. – CH.1 – 648 s.
16. Luzin, N.N. Differentsialnoye ischisleniye / N.N. Luzin. – M.: Gosudarstvennoye izdatel'stvo «Vysshaya shkola», 1961. – 479 s.
17. Sharyy, S.P. Kurs vychislitelnykh metodov / S.P. Sharyy. – Novosibirsk: Institut vychislitelnykh tekhnologiy SO RAN, 2013. – 497 s.

**Mashkov Evgeniy Aleksandrovich**

Orel State University, Orel

graduate student of geometry and mathematics teaching methods,

E–mail: ppsnnt@gmail.com

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ** **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**МО**

УДК 004.94: 624.042.62

О.М. ОГОРОДНИКОВА, С.В. МАРТЫНЕНКО, И.М. ПРОНИЧЕВ

### **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТОЙ ДЕТАЛИ «РАМА БОКОВАЯ» С УЧЕТОМ УСАДОЧНОЙ ПОРИСТОСТИ**

*В пакете NX (Siemens PLM Software) построена модель 3D CAD литой детали «Рама боковая», проведен инженерный анализ CAE технологии литья и прочности детали с учетом технологической дефектности. Показано, что структурная неоднородность литейной стали оказывает существенное влияние на расположение расчетных концентраторов напряжений.*

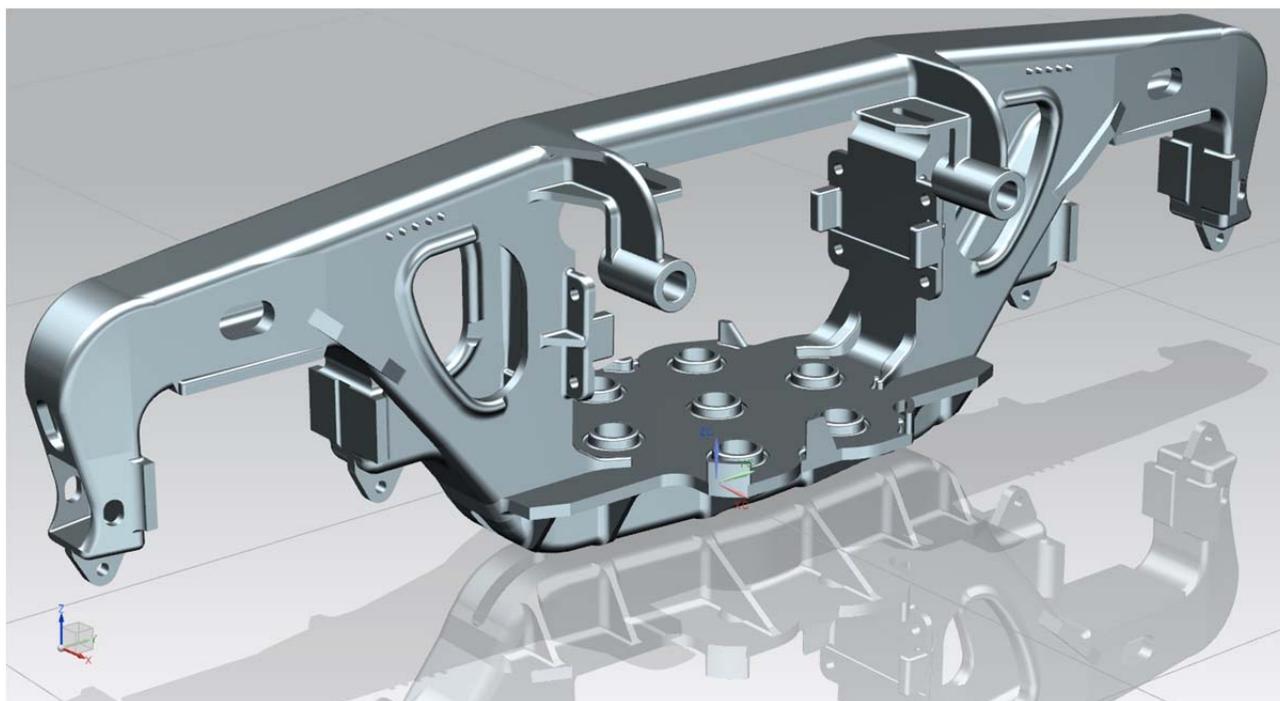
**Ключевые слова:** CAD/CAE, NX, ANSYS, LVMFlow, рама боковая.

На всем протяжении 2013–14 гг. ОАО «РЖД» вводит новые меры по выявлению и изъятию из эксплуатации несоответствующих техническим требованиям деталей вагонов, а также проводит проверки на идентичность литых деталей железнодорожного транспорта [1]. Боковая рама тележки грузового вагона изготавливается методами гравитационного литья [2] и является одной из наиболее ответственных деталей в сборке. Излом боковой рамы может стать причиной аварии на железной дороге. В настоящее время большой процент боковых рам имеет износы опорной поверхности свыше нормы. В эксплуатации было доказано, что боковые рамы тележки модели 18–100 имеют ряд эксплуатационных и конструктивных недостатков, наибольшее количество боковых рам в эксплуатации бракуется по трещинам [3]. Причины образования трещин [4] могут быть разными: несоответствующая техническим требованиям эксплуатация, прежде всего – необоснованное технически продление ее срока; влияние человеческого фактора при изготовлении и эксплуатации отливок. На некоторых предприятиях, выпускающих вагонное литье, причиной снижения качества литых деталей может являться устаревшая технология производства, физически изношенное оборудование и необеспеченность квалифицированными сотрудниками.

Решение описанных проблем мы видим в двух направлениях: в обновлении производственных мощностей и в совершенствовании информационной среды проектирования и подготовки производства [5]. Последнее направление, по нашим наблюдениям, неизбежно повышает уровень квалификации специалистов и может способствовать улучшению ситуации в существующих условиях производства [6] без глобальных инвестиций, поэтому выбрано в качестве объекта исследований в данной работе. Актуальной, с нашей точки зрения, становится разработка алгоритмов совместной работы конструкторских и технологических бюро единой проектной среде [7]. В связи с вышеизложенной проблематикой цель данной работы заключается в разработке методов консолидированного компьютерного анализа литой детали «Рама боковая» и технологии её изготовления, включая трансляцию данных о возможной технологической дефектности в вычислительную модель конструкционной прочности.

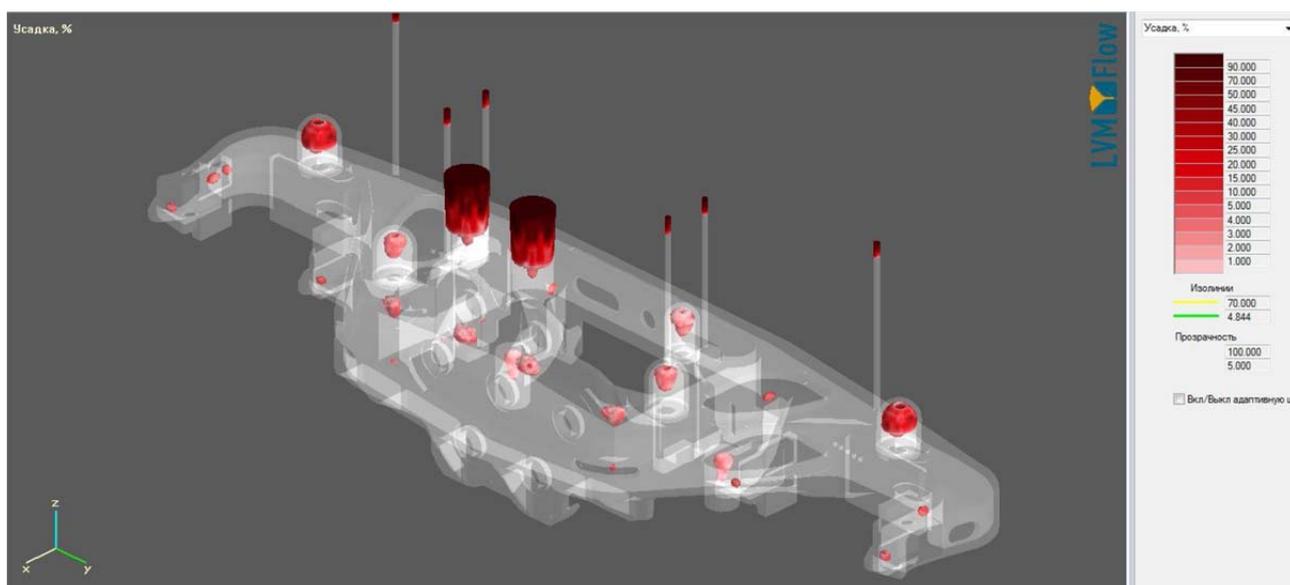
В работе использовано базовое программное обеспечение CAD/CAE/CAM, в котором НПК «Уралвагонзавод» осуществляет проектирование и подготовку производства. В программе CAD NX построена 3D модель литой детали «Рама боковая» (рисунок1), а также литниково–питающей системы для компьютерного моделирования технологии ее изготовления. В программе CAE LVMFlow выполнена работа по моделированию технологии литья и выявлению усадочных дефектов. Данные о распределении усадки переданы на прочностной расчет детали в программу CAE ANSYS APDL. На платформе ANSYS Workbench осуществлена консолидация компьютерного анализа технологии изготовления и конструкционной прочности литой детали «Рама боковая». Примененный в данной работе конечно–

элементный анализ конструкции становится в последние годы распространенным способом виртуального исследования инженерных систем [8, 9].



*Рисунок 1 – Модель 3D литой детали «Рама боковая», построенная в NX CAD*

Геометрия отливки и литниково–питающей системы в сборке транслирована из программы CAD NX в САЕ LVMFlow в не редактируемом формате STL с триангулированными поверхностями. Существенным результатом моделирования литейной технологии в LVMFlow является прогноз ожидаемых усадочных дефектов [10]. Результат компьютерной оценки усадочных дефектов представлен на рисунке 2. Расчетные значения усадки в узлах сетки сохранены в текстовый файл, на языке С++ написана программа, которая преобразует эти данные для трансляции в расчетную модель ANSYS.



*Рисунок 2 – Распределение усадочных дефектов в отливке*

Расчет на прочность детали «Рама боковая» организован на платформе ANSYS Workbench, которая позволяет связывать различные приложения через интерфейс и автома-

тически подключаемые трансляторы данных. В модуле статического анализа задана нагрузка – распределенная сила. Силовая нагрузка, соответствующая весу 20 тонн, действует по вертикали и распределена по площади 7 выделенных поверхностей опоры рессорных пружин. Ограничение степеней свободы: жесткая заделка одного ребра и свободное перемещение по горизонтали опорных площадок. Конечно–элементная сетка сгенерирована в модуле статического анализа с применением регулятора размера: размер конечного элемента задан равным 0.01 м. Расчетная сетка сгенерирована таким образом, чтобы воспринять информацию о распределении структурных параметров, полученных в компьютерном анализе технологии.

Сформированная вычислительная модель, содержащая конечно–элементную сетку, граничные условия (нагрузки, ограничение степеней свободы), модель поведения материала (конструкционная сталь) транслирована в модуль APDL на два варианта расчетов: с учетом неоднородной структуры литейной стали и в предположении однородного распределения плотности. Расчет на прочность детали «Рама боковая» произведен в модуле APDL, часть вычислений выполнена с помощью специально написанных кодов.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что существенное отличие мы получаем в расчете коэффициента запаса по прочности с учетом плотности литейной стали. На рисунках 3–4 показаны варианты распределения коэффициента запаса по прочности в сравнении. Потери плотности в тепловых узлах отливки преувеличены, чтобы четко продемонстрировать тенденцию снижения реальной прочности литой детали в привязке к тепловым узлам отливки.

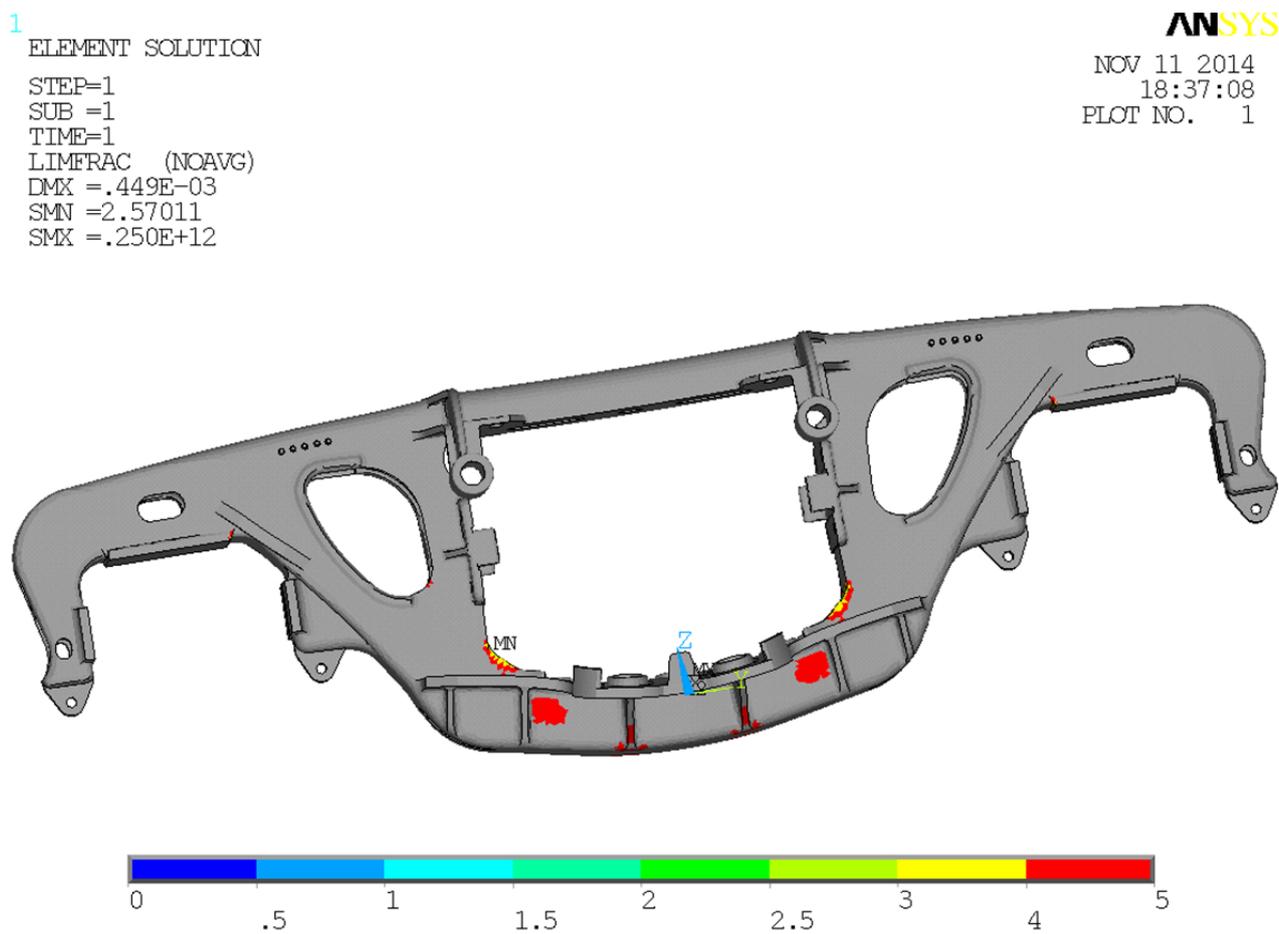
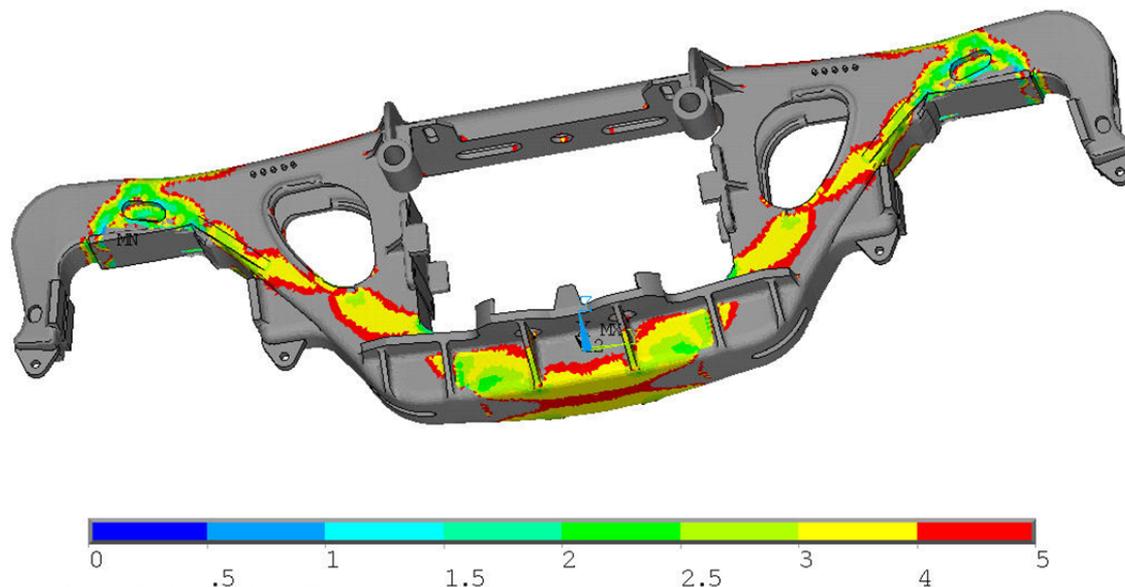


Рисунок 3 – Коэффициент запаса без учета литейной технологии

При расчете на прочность литых деталей в программной среде ANSYS необходимо учитывать неравномерное распределение плотности и прочности литейной стали в объеме детали, в особенности, для крупногабаритных деталей.

1  
ELEMENT SOLUTION  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
RAMADEF (NOAVG)  
DMX =.902E-03  
SMN =.509345  
SMX =.150E+12

ANSYS  
NOV 12 2014  
18:06:23  
PLOT NO. 1



**Рисунок 4 – Коэффициент запаса (K3) с учетом литейной технологии:**  
эффект визуально преувеличен для демонстрации тенденции, низкий K3 промаркирован синим цветом

Рекомендуется прямое введение в цифровую модель информации о распределении плотности и структурной прочности, что уточняет распределение и интенсивность концентраторов напряжений. Такой подход уточняет результаты компьютерного прогнозирования по сравнению со стандартными расчетными методиками. Дальнейшее развитие консолидированного анализа прочности литых деталей мы видим в интеграции вычислительного материаловедения [11] и в учете остаточных технологических напряжений [12].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порядин, С.П. О решении проблемы брака вагонного литья [Электронный ресурс] / С.П. Порядин – Сайт корпоративного телевидения ОАО «РЖД». URL: <http://www.rzdvtv.ru> свободный. – Дата обращения 12.03.2015.
2. Огородникова, О.М., Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок / О.М. Огородникова, С.В. Мартыненко, В.М. Грузман. – Литейное производство. – 2009. – № 11. – С. 21–26.
3. Галиев, И.И. Причины нарушения безопасности движения грузовых вагонов в эксплуатации / И.И. Галиев, В.А. Николаев, Б.Б. Сергеев, Е.А. Самохвалов, Д.Ю. Лукс. – Известия Транссиба. – 2013. – № 3(15). – С.133–141.
4. Огородникова, О.М. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях / О.М. Огородникова, Е.В. Пигина, С.В. Мартыненко. – Литейное производство. – 2007. – № 2. – С. 27–30.
5. Огородникова, О.М. Исследовательская функция программ САЕ в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM / О.М. Огородникова. – Вестник машиностроения. – 2012. – № 1. – С. 25–31.
6. Огородникова, О.М. Компьютерная диагностика дефектов и механических напряжений в литых деталях / О.М. Огородникова. – Дефектоскопия. – 2011. – Т. 47. – № 8. – С. 85–94.
7. Огородникова О.М. Связанный анализ технологических процессов и нагруженных состояний литой детали / О.М. Огородникова, С.В. Мартыненко. – Металлы. – 2012. – № 5. – С. 19–21.
8. Киричек, А.В. Конечно–элементное моделирование создания и испытаний гетерогенно упрочненного поверхностного слоя / А.В. Киричек, С.В. Баринев, Д.Л. Соловьев, А.П. Латаев. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2(298). – С. 87–94.
9. Огородникова, О.М. Введение в компьютерный конструкционный анализ / О.М. Огородникова. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ. – 2001. – 47 с.
10. Огородникова, О.М. Компьютерный инженерный анализ / О.М. Огородникова. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ. – 2009. – 205 с.

11. Огородникова, О.М. О проблемах интеграции вычислительного материаловедения в цифровое машиностроение. – Информационные технологии в проектировании и производстве / О.М. Огородникова. – 2014. – № 2 (154). – С. 30–34.

12. Огородникова, О.М. Накопление остаточных напряжений в металлических материалах при охлаждении после кристаллизации / О.М. Огородникова. – Литейное производство. – 2014. – № 7. – С. 37–40.

**Огородникова Ольга Михайловна**  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург  
Кандидат физико-математических наук, руководитель Техноцентра компьютерного инжиниринга  
E-mail: o.m.ogorodnikova@bk.ru

**Мартыненко Сергей Витальевич**  
НПК «Уралвагонзавод», г. Нижний Тагил  
Начальник КБ литейной оснастки  
E-mail: uvz@mail.ru

**Проничев Иван Михайлович**  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург  
Студент  
E-mail: prnichev.ivan@rambler.ru

---

O.M. OGORODNIKOVA, S.V. MARTYNIENKO, I.M. PRONICHEV

### COMPUTER SIMULATION OF THE MOLDED PART «FRAME SIDE» TAKING INTO ACCOUNT THE SHRINKAGE POROSITY

*The package NX (Siemens PLM Software) built 3D CAD model of the molded part, «Rama side», held engineering analysis CAE casting technology and strength in view of the technological details of defects. It is shown that the structural heterogeneity of cast steel has a significant impact on the location of the calculated stress concentrators.*

**Keywords:** CAD/CAE, NX, ANSYS, LVMFlow, frame side.

#### BIBLIOGRAPHY

1. Poryadin, S.P. O reshenii problemy braka vagonnogo litya [Elektronnyy resurs] / S.P. Poryadin – Sayt korporativnogo televideniya OAO «RZHD». URL: <http://www.rzhd.ru/svobodnyy>. – Data obrashcheniya 12.03.2015.
2. Ogorodnikova, O.M., Ispolzovaniye kompyuternykh metodov dlya povysheniya kachestva krupnogabaritnykh tonkostennykh stalnykh otlivok / O.M. Ogorodnikova, S.V. Martynenko, V.M. Gruzman. – Liteynoye proizvodstvo. – 2009. – № 11. – S. 21–26.
3. Galiyev, I.I. Prichiny narusheniya bezopasnosti dvizheniya gruzovykh vagonov v ekspluatatsii / I.I. Galiyev, V.A. Nikolayev, B.B. Sergeyev, Ye.A. Samokhvalov, D.YU. Luks. – Izvestiya Transsiba. – 2013. – № 3(15). – S.133–141.
4. Ogorodnikova, O.M. Kompyuternoye modelirovaniye goryachikh treshchin v litykh detal'yakh / O.M. Ogorodnikova, Ye.V. Pigina, S.V. Martynenko. – Liteynoye proizvodstvo. – 2007. – № 2. – S. 27–30.
5. Ogorodnikova, O.M. Issledovatel'skaya funktsiya programm CAE v skvoznykh tekhnologiyakh CAD/CAE/CAM / O.M. Ogorodnikova. – Vestnik mashinostroyeniya. – 2012. – № 1. – S. 25–31.
6. Ogorodnikova, O.M. Kompyuternaya diagnostika defektov i mekhanicheskikh napryazheniy v litykh detal'yakh / O.M. Ogorodnikova. – Defektoskopiya. – 2011. – T. 47. – № 8. – S. 85–94.
7. Ogorodnikova O.M. Svyazannyy analiz tekhnologicheskikh protsessov i nagruzhennykh sostoyaniy litoй detali / O.M. Ogorodnikova, S.V. Martynenko. – Metally. – 2012. – № 5. – S. 19–21.
8. Kirichek, A.V. Konechno–elementnoye modelirovaniye sozdaniya i ispytaniy geterogenno uprochnennogo poverkhnostnogo sloya / A.V. Kirichek, S.V. Barinov, D.L. Solovyev, A.P. Latayev. – Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 2(298). – S. 87–94.
9. Ogorodnikova, O.M. Vvedeniye v kompyuternyy konstruksionnyy analiz / O.M. Ogorodnikova. – Yekaterinburg: UGTU–UPI. – 2001. – 47 s.
10. Ogorodnikova, O.M. Kompyuternyy inzhenernyy analiz / O.M. Ogorodnikova. – Yekaterinburg: UGTU–UPI. – 2009. – 205 s.
11. Ogorodnikova, O.M. O problemakh integratsii vychislitel'nogo materialovedeniya v tsifrovoye mashinostroyeniye. – Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovani i proizvodstve / O.M. Ogorodnikova. – 2014. – № 2 (154). – S. 30–34.
12. Ogorodnikova, O.M. Nakopleniye ostatochnykh napryazheniy v metallicheskih materialakh pri okhlazhdenii posle kristallizatsii / O.M. Ogorodnikova. – Liteynoye proizvodstvo. – 2014. – № 7. – S. 37–40.

**Ogorodnikova Olga Mikhailovna**  
Ural Federal University, Yekaterinburg  
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Techno Center Computer Engineering  
E-mail: o.m.ogorodnikova@bk.ru

**Martynenko Sergey Vitalyevich**  
NPK «Uralvagonzavod», Nizhniy Tagil  
Chief of Bureau of foundry equipment  
E-mail: uvz@mail.ru

**Pronichev Ivan Mikhailovich**  
Ural Federal University, Yekaterinburg  
student  
E-mail: prnichev.ivan@rambler.ru

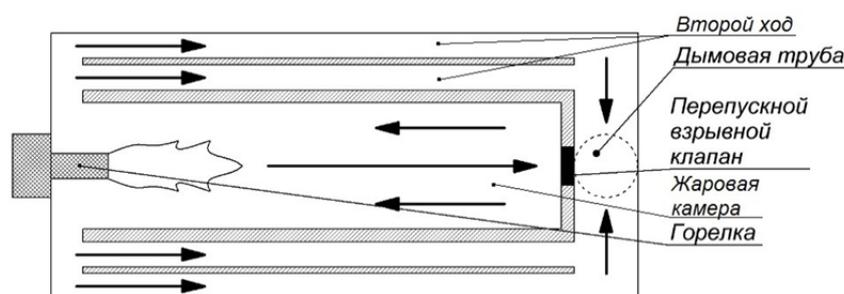
В.А. БАБАНКОВ, С.А. ДОБРИКОВ

## ОСОБЕННОСТИ ГАЗОВЫХ ВЗРЫВОВ В РЕВЕРСИВНЫХ ЖАРОТРУБНЫХ ГАЗОВЫХ ТОПКАХ

*В статье рассмотрено моделирование взрыва в реверсивных газовых топках методом «Крупных частиц». Показано распространение фронта пламени при взрыве и его влияние на давление. Проанализировано применение перепускного взрывного клапана в реверсивных топках, выявлены и обоснованы его недостатки, применительно к реверсивным топкам.*

**Ключевые слова:** реверсивная топка, численное моделирование, взрывы газа в оборудовании, перепускной взрывной клапан.

В последнее время, наряду с классическими топками проточной конструкции, все чаще в котлах малой и средней мощности начинают применяться топки реверсивной конструкции (рисунок 1). Особенностью таких топок является наличие тупиковой жаровой камеры, в которой продукты сгорания совершают разворот в жаровой камере и двигаются обратно к горелке. С точки зрения потребителей обе конструкции топок отличаются только положением дымовой трубы и незначительной разницей в КПД в пользу проточных [1]. Технической особенностью реверсивных топок по сравнению с проточными является более высокое давление в жаровой камере, что подтверждается исследованиями, проведенными в Национальном исследовательском Томском политехническом университете [2, 3].



**Рисунок 1** – схема двухходовой реверсивной топки с установленным перепускным взрывным клапаном: (вид сверху, стрелки указывают ход продуктов сгорания)

Как нам представляется, оценка взрывобезопасности таких топок никем не производилась, не оценивалась также и эффективность известных и вновь разрабатываемых средств снижения давления возможных взрывов газа. В нашей работе исследовано влияние перепускного взрывного клапана (ПВК) на давление взрыва, показавшего высокую эффективность как средства снижения давления взрыва в трехходовых топках [4–7].

Конструктивно ПВК устроен так, что он располагается на стенке, разделяющей жаровую камеру и дымовую трубу, а в момент срабатывания соединяет их полости. В результате чего часть газов, минуя остальные ходы, попадает напрямую в дымовую трубу, чем снижает гидравлическое сопротивление при движении газов в дымовую трубу. [4–6] Особенность клапана обеспечивает его высокую эффективность, надежность и простоту устройства (нет необходимости организовывать высокую степень уплотнения, соответственно конструкция максимально упрощена). Кроме того, ПВК исключает попадание высокотемпературных газов в рабочую зону операторов (помещение котельной).

В этом плане, представляет интерес оценка эффективности клапанов типа ПВК при их возможной установке на реверсивных топках.

Решение поставленной задачи осуществлялось методом математического и компьютерного моделирования. В основу математической модели положены две компоненты: первая – исходная система уравнений, описывающая течения газа, распространение фронта пламени, начальные и граничные условия, и вторая – метод решения системы.

Исходную систему уравнений составляют известные в газовой динамике дифференциальные уравнения в частных производных, выражающих фундаментальные законы сохра-

нения (уравнения неразрывности, импульса и энергии) применительно к идеальной сжимаемой невязкой среде в так называемой форме Эйлера (1):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{W}) = 0; \\ \frac{\partial \rho W_x}{\partial t} + \nabla \cdot (W_x \rho \vec{W}) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial \rho W_y}{\partial t} + \nabla \cdot (W_y \rho \vec{W}) + \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial \rho W_z}{\partial t} + \nabla \cdot (W_z \rho \vec{W}) + \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (E \rho \vec{W}) + \nabla \cdot (p \vec{W}) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\vec{W}$  – вектор скорости, м/с;

$E$  – удельная полная энергия, Дж/кг;

$p$  – давление, Па;

$W_x, W_y, W_z$ , – составляющие вектора скорости, соответственно, вдоль осей  $x, y, z$ , м/с.

Удельная полная энергия может быть описана уравнением (2):

$$E = I + \frac{W^2}{2} \quad (2)$$

где  $I$  – удельная внутренняя энергия, Дж/кг.

Для замыкания системы используется уравнение состояния идеального газа (3):

$$p = (\gamma - 1)\rho I \quad (3)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты среды.

Решение системы уравнений осуществляется методом «крупных частиц», в основу которого положена идея «частиц в ячейках», заимствованная у F.N. Harlow [8], которая предусматривает расщепление решения по физическим процессам, укладываемое в три этапа расчета на каждом временном слое. На первом (эйлеровом) этапе выполняется первое приближение за счет отбрасывания слагаемых, отвечающих за конвективный перенос, при этом учитывается только действие сил давления. На втором (лагранжевом) этапе определяются потоки массы через границы ячеек согласно разностным схемам первого порядка точности. Таким образом, происходит перераспределение частиц по пространству. На третьем (заключительном) этапе проводится регуляризация сетки. Данный этап включает перераспределение всех полей (скорости, плотности, давления и энергии) по пространству.

Несмотря на то, что система аппроксимационных линейных алгебраических (разностных) уравнений решается в явном виде, решение достаточно устойчиво благодаря присущей системе аппроксимационной вязкости, не требующей ввода фиктивной вязкости.

Горение реализовано как надстройка над методом «крупных частиц», в которой осуществляется горение ячеек согласно представлению о нормальной скорости горения и ее зависимости от давления и температуры, с выделением энергии и распространение фронта пламени от ячейки к ячейке. Разработанная модель горения и метод «Крупных частиц» были объединены в программном продукте «Вулкан–М» с помощью которого и производились исследования [9].

Расчетный объем топки, в котором моделируется взрыв, по своим размерам повторяет реальный объем. Он разбивается на ячейки кубической формы, названные расчетными. Непроницаемые участки границы построены другим типом ячеек – названных граничными, а истечение газа происходит через третий тип ячеек, названных расходными.

В расчетных ячейках аппроксимируется разностными уравнениями система уравнений Эйлера. В пограничных ячейках выполняется условие непротекания за счет введения в них фиктивной скорости, направленной нормально к границе внутрь объема и равной по модулю компоненте скорости в расчетной ячейке. В ячейках, через которые происходит исте-

чение, давление приравнивается среднему от значений давления в ближайшей расчетной ячейке и в атмосфере.

Моделирование взрыва в топке производилось при заполнении всего объема топки стехиометрической смесью газа с воздухом (наиболее опасный случай), источник воспламенения расположен возле горелки, так как наиболее вероятно, что именно при ее неисправности может произойти взрыв. ПВК для упрощения расчетов представляется невесомым листом бумаги, разрушающимся с воспламенением газа. Данное допущение слабо влияет на точность расчета, поскольку для открытия ПВК реально требуется незначительное давление.

Рассматривая визуализацию взрыва в реверсивной топке без взрывных клапанов (рисунок 2) можно выделить характерную особенность – распространение пламени в жаровой камере происходит намного медленнее, чем в трубах второго хода. Такой характер процесса обусловлен спецификой конструкции топки. После воспламенения и началом горения газовой смеси у горелки и связанное с этим расширение продуктов сгорания, газы в топке устремятся к дымовой трубе, ближайший путь к которой лежит через второй ход топки. Таким образом, во втором ходе будет наблюдаться сложение нормальной скорости горения и скорости потока расширяющегося газа. В тоже время в жаровую камеру, имеющую тупиковую конструкцию, фронт пламени распространяется только с нормальной скоростью горения.

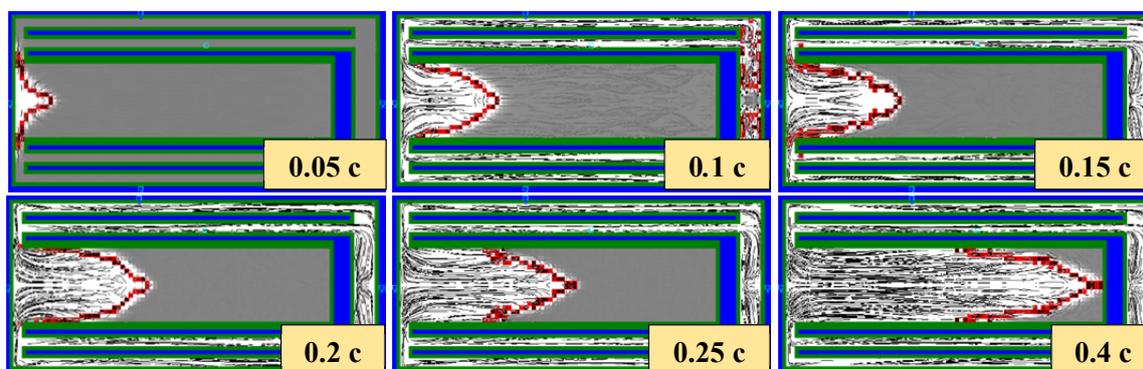


Рисунок 2 – Моделирование распространения пламени при взрыве в реверсивной топке без клапана (вид сверху)

В случае установки ПВК характер горения несколько меняется (рисунок 3). Горение во втором ходе развивается аналогично рассмотренному без взрывного клапана, с тем отличием, что развивается несколько медленнее. В жаровой камере, напротив, из-за наличия взрывного клапана фронт начинает распространяться быстрее, поскольку появляется путь распространения продуктов горения в дымовую трубу через ПВК, поток через который совпадает по направлению с нормальной скоростью горения.

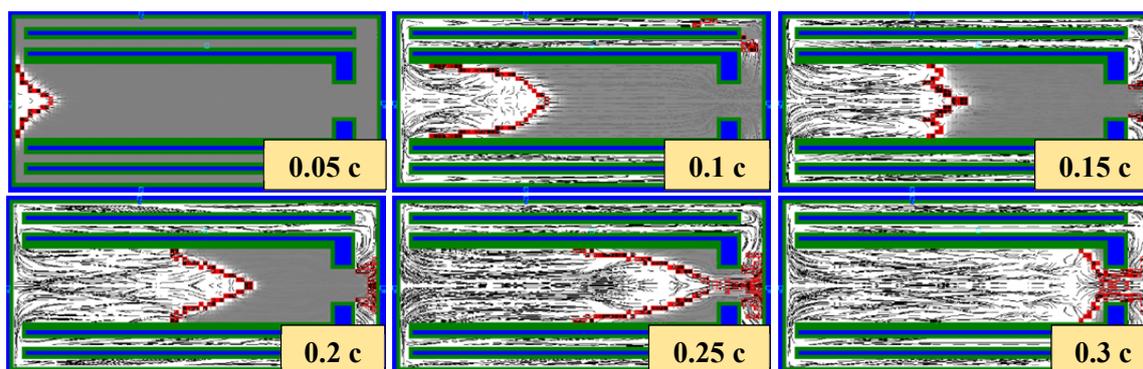


Рисунок 3 – Моделирование распространения пламени при взрыве в реверсивной топке с перепускным взрывным клапаном (вид сверху)

Особенности развития фронта пламени отражаются и на графике развития давления (рисунок 4). Так, на графиках как с ПВК, так и без него, имеется основной пик, обусловленный одновременным горением в жаровой камере и втором ходе, затем следует спад, поскольку во втором ходе горение заканчивается раньше, а в конце наблюдается второй пик, обусловленный увеличением фронта пламени при подходе к торцу жаровой камеры. На гра-

фике давления, также как и при рассмотрении фронта пламени, видно ускорение процесса при наличии ПВК, что влечет увеличение максимального давления взрыва.

Следует отметить, что давления, полученные в результате моделирования, сравнительно низкие для газовых топков, имеющих металлическую конструкцию, которыми являются реверсивные топки и не должно приводить к их разрушению как в случае с трехходовыми топками (рисунок 5) [6]. Таким образом, реверсивные топки могут вообще обойтись без взрывных клапанов, хотя для каждой конкретной конструкции необходимо проводить моделирование, поскольку их реализации могут значительно отличаться от рассмотренной.

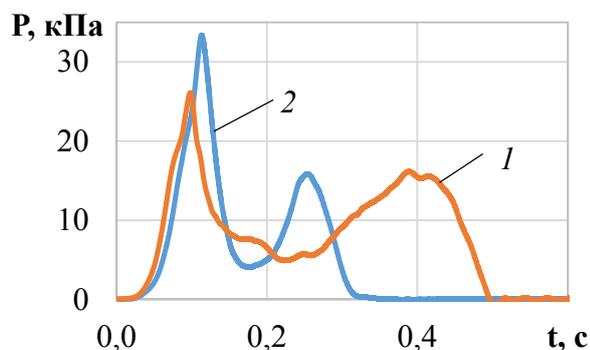


Рисунок 4 – Развитие давления взрыва в реверсивной топке при взрывах:

без клапана (1) и с перепускным взрывным клапаном (2)

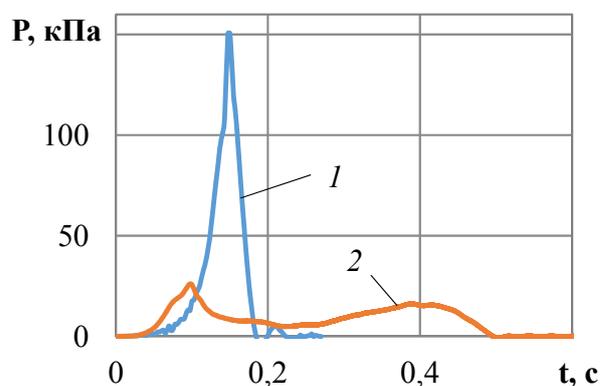


Рисунок 5 – Сравнение давлений взрыва газовых топков:

трехходовой проточной (1) и реверсивной конструкции (2)

Сравнение давления взрыва в трехходовой и реверсивной топке, показанное на рисунке 5, показывает, что развитие взрыва в реверсивных топках качественно отличается от топков проточных конструкций. Так, на примере трехходовой проточной топки видно, что давление растет быстро, что обусловлено быстрым выгоранием газа в жаровой камере, ускоренное за счет совпадения нормальной скорости горения и скорости движения потока газов в дымовую трубу. Такой быстрый рост давления приводит к значительному повышению давления, приводящего к нарушению целостности конструкции топки [4, 6]. В реверсивных топках взрыв развивается приблизительно вдвое продолжительнее, чем в трёхходовых, за счет чего и давление взрыва меньше.

Давление взрыва в реверсивных газовых топках по сравнению с трехходовыми топками меньше в шесть раз, что позволяет использовать их без взрывных клапанов.

Применение ПВК в реверсивных газовых топках приводит, хоть и незначительному, но повышению давления взрыва.

Выводы нуждаются в проверке на физической модели.

*Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки Российской Федерации за финансовую поддержку исследований, проведенных в Научно – образовательном центре «Механика жидкости и газа физики горения» в «Государственном университете – учебно-научно-образовательном комплексе» в 2014– 2016.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаустов, С.А. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов / С.А. Хаустов, А.С. Заворин // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 2(12). – С. 21–28.
2. Хаустов, С.А. Численное исследование аэродинамики жаротрубной топки с реверсивным факелом / С.А. Хаустов, А.С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 5–9.
3. Хаустов, С.А. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом / С.А. Хаустов, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 43–47.
4. Поландов, Ю.Х. Об одном варианте снижения давления взрыва в многоходовых газовых топках / Ю.Х. Поландов, М.А. Барг, В.А. Бабанков // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. Т. 21. – № 11. С. 41–46.
5. Бабанков, В.А. Разработка перепускного клапана для многоходовых топков / В.А. Бабанков // Материалы Международной научн.–техн. интернет–конф.: Фундаментальные и прикладные аспекты создания биосферосовместимых систем. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2012. – С. 80–83.

6. Бабанков, В.А. Анализ тепловых характеристик газовых топок с тупиковой жаровой камерой / В.А. Бабанков, С.А. Добриков // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орел.: Госуниверситет–УНПК. – 2015. – № 5 (304). – С. 43–46.

7. Пат. 2460940 Российская Федерация, МПК F23C 6/00, F24H 1/00. Многоходовая топка теплотехнического устройства / Ю.Х. Поландов, В.А. Бабанков, С.Д. Пахомов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет» (RU). – № 2010153398/06; заявл. 24.12.2010; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25. – 5 с.

8. Белоцерковский, О.М. Метод «крупных частиц» (схемы и приложения) / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: МФТИ, 1978. – 129 с.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2007613936 Моделирование процессов горения и взрыва газовых смесей «Вулкан–М», 03.12.2007 / Барг М.А., Поландов Ю.Х., Марков С.С. // Патент России № 2007614950, 2007.

**Бабанков Виталий Александрович**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»,  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
кандидат технических наук, научный сотрудник НОЦ  
«Механика жидкости и газа, физика горения»  
E-mail: xenosv@mail.ru

**Добриков Сергей Александрович**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»,  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
аспирант, стажер–исследователь НОЦ «Механика  
жидкости и газа, физика горения»  
E-mail: te4nik1@gmail.com

V.A. BABANKOV, S.A. DOBRIKOV

## FEATURES OF GAS EXPLOSION IN TWO-PASS REVERSE FIRE-TUBE BOILER

*The article deals with modeling of blast furnaces gas in reverse by the «large particles». Shows the spread of the flame front in the explosion and its effect on blood pressure. Analyzed the use of the bypass valve in an explosive flame reversal, identified and justified its shortcomings with respect to flame reversal.*

**Keywords:** explosions in equipment; reversing furnace, bypass explosive valve.

### BIBLIOGRAPHY

1. Khaustov, S.A. Sovremennyye tendentsii proyektirovaniya zharotrubnykh kotlov / S.A. Khaustov, A.S. Zavorin // Vestnik nauki Sibiri. – 2014. – № 2(12). – С. 21–28.
2. Khaustov, S.A. Chislennoye issledovaniye aerodinamiki zharotrubnoy topki s reversivnym fakelom / S.A. Khaustov, A.S. Zavorin // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 5–9.
3. Khaustov, S.A. Chislennoye issledovaniye protsessov v zharotrubnoy topke s reversivnym fakelom / S.A. Khaustov, A.S. Zavorin, R.N. Fisenko // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 43–47.
4. Polandov, Yu.Kh. Ob odnom variante snizheniya davleniya vzryva v mnogokhodovykh gazovykh topkakh / YU.KH. Polandov, M.A. Barg, V.A. Babankov // Pozharovzryvobezopasnost. – 2012. Т. 21. – № 11. S. 41–46.
5. Babankov, V.A. Razrabotka perepusknogo klapana dlya mnogokhodovykh topok / V.A. Babankov // Materialy Mezhdunarodnoy nauchn.–tekhn. internet–konf.: Fundamentalnyye i prikladnyye aspekty sozdaniya biosferosovmestimykh sistem. – Орел: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – С. 80–83.
6. Babankov, V.A. Analiz teplovykh kharakteristik gazovykh topok s tupikovoy zharovoy kameroy / V.A. Babankov, S.A. Dobrikov // «Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii». – Орел.: Gosuniversitet–UNPK. – 2015. – № 5 (304). – С. 43–46.
7. Пат. 2460940 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F23C 6/00, F24H 1/00. Mnogokhodovaya topka teplotekhnicheskogo ustroystva / Yu.Kh. Polandov, V.A. Babankov, S.D. Pakhomov; zayavitel i patentoobladatel GOU VPO «Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet» (RU). – № 2010153398/06; zayavl. 24.12.2010; opubl. 10.09.2012, Byul. № 25. – 5 s.
8. Belotserkovskiy, O.M. Metod «krupnykh chastits» (skhemy i prilozheniya) / O.M. Belotserkovskiy, Yu.M. Davydov. – М.: MFTI, 1978. – 129 s.
9. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2007613936 Modelirovaniye protsessov goreniya i vzryva gazovykh smesey «Vulkan–M», 03.12.2007 / Barg M.A., Polandov Yu.Kh., Markov S.S. // Patent Rossii № 2007614950, 2007.

**Babankov Vitaliy Aleksandrovich**  
State University ESPC, Russia,  
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
Ph.D., Researcher, Research Center «Fluid Mechanics,  
physics of burning»  
E-mail: xenosv@mail.ru

**Dobrikov Sergey Aleksandrovich**  
State University ESPC, Russia,  
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
graduate student, intern investigator, Research Center  
«Fluid Mechanics, physics of burning»  
E-mail: te4nik1@gmail.com

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

**МО**

УДК 539.422.5

М.В. ЦЕПЕННИКОВ, О.Ю. СМЕТАННИКОВ, И.А. ПОВЫШЕВ

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Проведены расчеты разрушения четырех образцов из углепластика и выбраны коэффициенты деградации свойств материала. В качестве критериев разрушения используются критерии максимальных напряжений, Пака, Хашина. Результаты расчетов сопоставлены с результатами испытаний образцов. Требуется дальнейшее исследование применимости различных критериев разрушения.*

**Ключевые слова:** композиционный материал, модель разрушения, определение разрушающей нагрузки, поведение конструкции после начала разрушения.

В последнее время композиционные материалы получили большое распространение в авиации и других высокотехнологичных отраслях. Одним из существенных препятствий при создании конструкций из композитов является отсутствие регламентированных методик по проектированию, поддержанию надежности и оценке прочности изделий из ПКМ на различных этапах проектирования и жизненного цикла; недостаточность данных о свойствах ПКМ. Полимерные композиционные материалы обладают комплексом свойств и особенностей, отличающих их от традиционных конструкционных материалов. Для определения несущей способности конструкции из ПКМ необходимо учитывать схемы укладки слоев, прочность самих слоев и их соединения друг с другом. Начало разрушения конструкции еще не означает потерю несущей способности. Для более точной оценки несущей способности необходимо проводить расчеты с моделированием разрушения слоев и расслоения.

В рамках данной статьи рассматриваются вопросы моделирования разрушения слоев. В результате численного расчета получены значения нагрузки начала процесса разрушения и предельной нагрузки разрушения, построена диаграмма деформирования конструкции и получена информация о локализации и характере протекания процесса разрушения.

Для идентификации расчетных параметров проведены вычислительные эксперименты на разрушение пластин при сдвиге, растяжении и сжатии с различными критериями прочности. Материалы слоев пластин – однонаправленные углепластики. Результаты расчетов сопоставлены с опубликованными в [1, 2, 4–6, 8–10] данными натурных экспериментов.

### **Метод моделирования разрушения конструкций из ПКМ.**

В расчетах использована модель разрушения для однонаправленного композиционного материала Progressive Damage of Fiber-Reinforced Composites, появившаяся в пакете ANSYS версии 14.5. Сокращенно будем называть ее PDMG. Модель позволяет оценивать разрушение по критериям максимальных напряжений, максимальных деформаций, Хашина, Пака, LaRc03, LaRc04.

Алгоритм расчета с использованием модели PDMG выглядит следующим образом. Нагрузка прикладывается пошагово. Чем меньше шаг приращения нагрузки, тем точнее результаты расчета. На каждом шаге нагружения в каждом конечном элементе производится расчет критерия разрушения. Если достигается предельное значение критерия, то элемент считается разрушенным. Упругие свойства материала в разрушенном элементе мгновенно понижаются путем умножения исходных свойств на определенный коэффициент – коэффициент деградации. Коэффициенты деградации свойств могут отличаться для матрицы и волокна и для случаев растяжения и сжатия. Следующий шаг нагружения будет рассчитан уже с учетом измененных свойств разрушенных на предыдущем шаге элементов. Для расчета

критериев разрушения модель PDMG использует напряжения из точек интегрирования конечных элементов.

В рамках настоящей работы разрушение слоев оценивалось по критериям максимальных напряжений (1), Хашина (2), (3), Пака (4), (5), (6), (7) ввиду того, что для этих критериев были известны все константы и свойства материала. Критерии LaRc03, LaRc04 не применялись, так как не известны продольные и поперечные коэффициенты трения, трещиностойкость и угол разрушения от воздействия поперечного сжатия.

Критерий максимальных напряжений: простейший критерий разрушения, не учитывающий механику разрушения, а только фиксирующий факт потери сплошности.

$$f = \max \left\{ \left| \frac{\sigma_{xt}}{\sigma_{xt}^f} \right|, \left| \frac{\sigma_{xc}}{\sigma_{xc}^f} \right|, \left| \frac{\sigma_{yt}}{\sigma_{yt}^f} \right|, \left| \frac{\sigma_{yc}}{\sigma_{yc}^f} \right|, \left| \frac{\sigma_{zt}}{\sigma_{zt}^f} \right|, \left| \frac{\sigma_{zc}}{\sigma_{zc}^f} \right|, \left| \frac{\tau_{xy}}{\tau_{xy}^f} \right|, \left| \frac{\tau_{yz}}{\tau_{yz}^f} \right|, \left| \frac{\tau_{xz}}{\tau_{xz}^f} \right| \right\}, \quad (1)$$

где  $f$  – значение критерия максимальных напряжений, значения большие или равные 1 соответствуют разрушению;

$\sigma_{*t}$  – растягивающие напряжения в слое в соответствующем направлении;

$\sigma_{*c}$  – сжимающие напряжения в слое в соответствующем направлении;

$\tau_{**}$  – сдвиговые напряжения в слое;

$\sigma_{**}^f, \tau_{**}^f$  – пределы прочности по напряжениям в соответствующих направлениях при растяжении или сжатии и сдвиге.

Индексы «x» и «y» соответствует направлению вдоль и поперек волокон в плоскости слоя.

Критерий Хашина: учитывает механику разрушения и разделяет ее на разрушение волокна и разрушение матрицы. Критерий разрушения по волокна имеет вид:

$$f_{fi} = \begin{cases} \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_{xt}^f} \right)^2 + \frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}{(\tau_{xy}^f)^2}, \sigma_x \geq 0 \\ \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_{xc}^f} \right)^2, \sigma_x < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

Для определения разрушения матрицы применяется следующее выражение:

$$f_m = \begin{cases} \left( \frac{\sigma_y + \sigma_z}{\sigma_{yt}^f} \right)^2 + \frac{\tau_{yz}^2 - \sigma_y \sigma_z}{(\tau_{yz}^f)^2} + \frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}{(\tau_{xy}^f)^2}, \sigma_y + \sigma_z > 0 \\ \frac{1}{\sigma_{yc}^f} \left( \left( \frac{\sigma_{yc}^f}{2\tau_{yz}^f} \right)^2 - 1 \right) (\sigma_y + \sigma_z) + \left( \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2\tau_{yz}^f} \right)^2 + \frac{\tau_{yz}^2 - \sigma_y \sigma_z}{(\tau_{yz}^f)^2} + \frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}{(\tau_{xy}^f)^2}, \sigma_y + \sigma_z \leq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $f_{fi}, f_m$  – значение критерия разрушения по волокну и матрице соответственно, значения большие или равные 1 соответствуют разрушению.

Критерий Пака: учитывает механику разрушения и разделяет ее на разрушение волокна и разрушение матрицы. Разрушение по волокну определяется по условию  $f_{fi} \geq 0$ , где:

$$f_{fi} = \begin{cases} \frac{\sigma_x}{\sigma_{xt}^f}, \sigma_x > 0 \\ \frac{\sigma_x}{\sigma_{xc}^f}, \sigma_x \leq 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Разрушение по матрице для плосконапряженного состояния определяется из следующих выражений:

$$f_m = \begin{cases} \left( \sqrt{\left( \frac{\tau_{xy}}{\tau_{xy}^f} \right)^2 + \left( \frac{1}{\sigma_{yt}^f} - \frac{p_{\perp\parallel}^{(+)}}{\tau_{xy}^f} \right)^2} \sigma_y^2 + \frac{p_{\perp\parallel}^{(+)}}{\tau_{xy}^f} \sigma_y \right), \sigma_y \geq 0 \\ \frac{1}{\tau_{xy}^f} \left( \sqrt{\tau_{xy}^2 + (p_{\perp\parallel}^{(-)} \sigma_y)^2} + p_{\perp\parallel}^{(-)} \sigma_y \right), \sigma_y < 0 \text{ и } 0 \leq \left| \frac{\tau_{xy}}{\sigma_y} \right| \leq \frac{R_{\perp\parallel}^A}{|\tau_{xyc}|}, \\ \frac{\sigma_{yc}^f \tau_{xy}^2}{(-\sigma_y) 4 (\tau_{xy}^f + p_{\perp\parallel}^{(-)} R_{\perp\parallel}^A)^2} + \frac{-\sigma_y}{\sigma_{yc}^f}, \sigma_y < 0 \text{ и } 0 \leq \left| \frac{\sigma_y}{\tau_{xy}} \right| \leq \frac{|\tau_{xyc}|}{R_{\perp\parallel}^A} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\tau_{xyc} = \tau_{xy}^f \sqrt{1 + 2p_{\perp\parallel}^{(-)}}$ ,

$$R_{\perp\parallel}^A = \frac{\tau_{xy}^f}{2p_{\perp\parallel}^{(+)}} \left( \sqrt{1 + 2p_{\perp\parallel}^{(-)} \frac{\sigma_{yc}^f}{\tau_{xy}^f}} - 1 \right).$$

Разрушение по матрице в общем случае определяется из следующих выражений:

$$f_m = \begin{cases} \arccos \left( \sqrt{\frac{-R_{\perp\parallel}^A}{-\sigma_y}} \right), \sigma_y < -R_{\perp\parallel}^A \\ 0, \sigma_y \geq -R_{\perp\parallel}^A \end{cases}, \quad (6)$$

$$f_d = \begin{cases} \sqrt{\sigma_z^2 \left( \frac{1}{\sigma_{zt}^f} + \frac{p_{\perp\psi}^{(+)}}{R_{\perp\psi}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{zy}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{zx}}{\tau_{zx}^f} \right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^{(+)}}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_z, \sigma_z \geq 0 \\ \sqrt{\left( \sigma_z \frac{p_{\perp\psi}^{(-)}}{R_{\perp\psi}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{zy}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{zx}}{\tau_{zx}^f} \right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^{(-)}}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_z, \sigma_z < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $\frac{p_{\perp\psi}^{(\pm)}}{R_{\perp\psi}^A} = \frac{p_{\perp\parallel}^{(\pm)}}{R_{\perp\parallel}^A} \cos^2 \psi + \frac{p_{\perp\parallel}^{(\pm)}}{\tau_{zx}^f} \sin^2 \psi$ ,

$$\cos^2 \psi = 1 - \sin^2 \psi = \frac{\tau_{zy}^2}{\tau_{zy}^2 + \tau_{zx}^2},$$

где  $f_d$  – значение критерия межслоевого расслоения, все значения большие или равные 1 соответствуют расслоению;

$\psi$  – угол наклона плоскости сдвига.

Во всех расчетах были использованы рекомендованные Паком значения констант критерия для углеволокна [12]:  $p_{\perp\parallel}^{(+)} = 0.35$ ;  $p_{\perp\parallel}^{(-)} = 0.3$ ;  $p_{\perp\psi}^{(+)} = 0.255$ ;  $p_{\perp\psi}^{(-)} = 0.255$ .

Сложный вид критериев Пака и Хашина для разрушения по матрице объясняется стремлением описать характер разрушения при одновременном действии сдвиговых  $\tau_{xy}$  и растягивающих (сжимающих) напряжений по матрице  $\sigma_y$ . На рисунок 1 показаны предельные поверхности в координатах  $\sigma_y - \tau_{xy}$  по критериям Максимальных напряжений, Пака,

Хашина, LARC04 и Sun, а также отмечены экспериментальные данные [11]. Видно, что критерий максимальных напряжений хуже всего описывает расположение экспериментальных точек. Предельные поверхности критерия Хашина в зависимости от свойств материала могут лежать внутри или снаружи предельных поверхностей критерия максимальных разрушений.

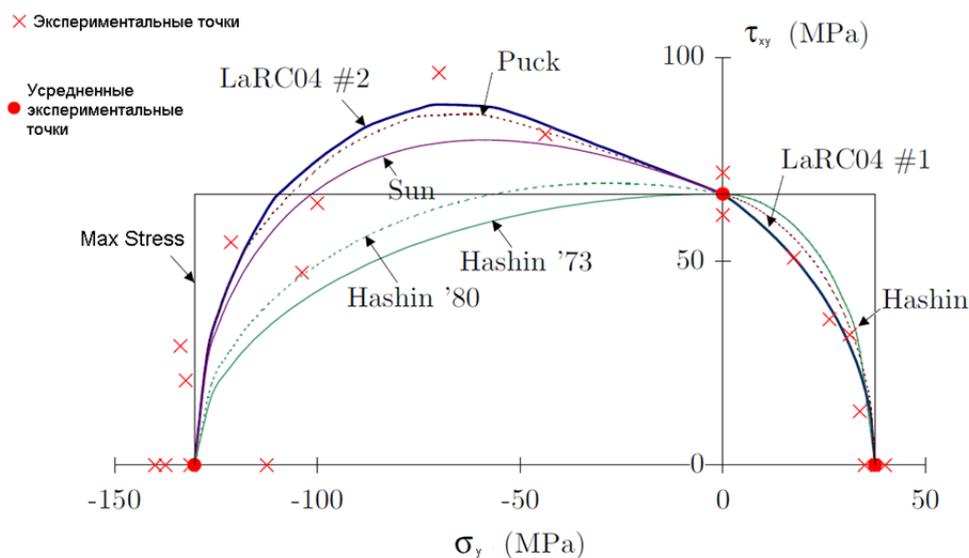


Рисунок 1 – Предельные поверхности в координатах  $\sigma_y - \tau_{xy}$  по критериям максимальных напряжений, Пака, Хашина, LARC04 и Sun

На рисунке 2 показаны предельные поверхности критериев в координатах  $\sigma_x - \tau_{xy}$ . Предельные поверхности критериев максимальных напряжений и Пака совпадают, а предельные поверхности критерия Хашина лежат внутри предельных поверхностей критерия максимальных напряжений.

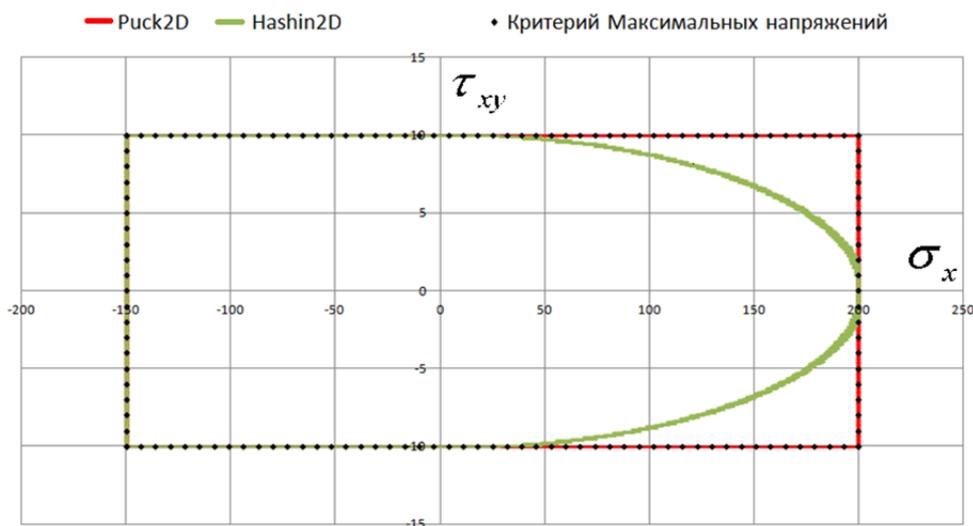


Рисунок 2 – Предельные поверхности в координатах  $\sigma_y - \tau_{xy}$  по критериям максимальных напряжений, Пака, Хашина

Испытание пластины с отверстием в центре на сжатие

Эксперимент на сжатие тонкой композитной пластины был проведен Суемасу [3]. Образец был изготовлен из материала T800/#8633, свойства материала приведены в таблице 1. Испытываемый образец имеет 16 слоёв по толщине с толщиной одного слоя 0.13081 мм. Схема укладки слоёв  $[(45/0/-45/90)_2]_s$ . Ориентация "0" соответствует расположению волокон углепластика вдоль длинной стороны образца. Длина образца составляет 118 мм, ширина 38.1 мм, отверстие находится в центре, диаметр отверстия 6.35мм. В расчетах образцу были запрещены перемещения по нормали к одной из коротких сторон. Перемещения приклады-

вались к противоположной короткой стороне по оси X. Также были запрещены перемещения по нормали к нижней грани. Для построения конечно–элементной модели использованы элементы 2–го порядка SOLID186. Число элементов по толщине пластины совпадает с числом слоев. Перемещения прикладывались постепенно с шагом 0.00125 мм до полного разрушения образца.

Таблица 1 – Свойства материалов

Свойства материала	T800/#8633	
Продольный модуль Юнга	E1	140000 МПа
Поперечный модуль Юнга	E2, E3	9560 МПа
Коэффициент Пуассона	$\nu_{12}, \nu_{13}$	0.3
	$\nu_{23}$	0.49
Модуль сдвига	G12, G13	4550 МПа
	G23	3170 МПа
Предел прочности на растяжение вдоль основы	$\sigma_{xt}^f$	2000 МПа
Предел прочности на сжатие вдоль основы	$\sigma_{xc}^f$	1500 МПа
Предел прочности на растяжение поперек основы	$\sigma_{yt}^f, \sigma_{zt}^f$	50 МПа
Предел прочности на сжатие поперек основы	$\sigma_{yc}^f, \sigma_{zc}^f$	150 МПа
Предел прочности на сдвиг	$\tau_{xy}^f, \tau_{yz}^f, \tau_{xz}^f$	100 МПа

В таблице 2 представлены предельные силы реакции с различными коэффициентами деградации материала. Также проведено несколько расчетов, для выбора коэффициентов деградации материала, на растяжение пластины с отверстием, сжатие пластины со смещенным от центра отверстием и сдвиг пластины без отверстия.

Таблица 2 – Силы реакции (Н) с различными коэффициентами деградации материала

Коэффициент	Предельная сила реакции (Н) по критериям		
	Максимальных напряжений	Пака	Хашина
1/100 для матрицы и волокна на растяжение и сжатие	17341	17063	16410
1/50 для матрицы и волокна на растяжение и сжатие	20612	22607	22051
1/37 для матрицы и волокна на растяжение, 1/30 для матрицы и волокна на сжатие	21354	23454	22515

В результате расчетов были выбраны коэффициенты деградации для матрицы и волокна при сжатии 1/30 и растяжении 1/37. Коэффициенты деградации выбирались таким образом, чтобы расчетная предельная сила реакции не отличалась от экспериментальной более чем на 10% во всех экспериментах с любым из критериев. Суммарная сила реакции измерялась на стороне, к которой прикладывались перемещения. Погрешность по максимальной нагрузке относительно натурального эксперимента (23701 Н) составила: для критерия максимальных напряжений 10%, для критерия Пака 1%, для критерия Хашина 5%. Как видно из графиков, жесткости натурального эксперимента и численного решения (углы начального наклона кривых деформирования) не совпадают. Это связано с тем, что в численном решении не учтена жесткость испытательной машины. На рисунке 3 представлены графики зависимости силы реакции F, Н от перемещений U, мм с различными критериями прочности. Наименьшую предельную силу реакции дал критерий максимальных напряжений, а наибольшую критерий Пака. Разрушение по матрице с критерием максимальных напряже-

ний началось при нагрузке 14730 Н (надо отметить, что под разрушением по матрице в критерии максимальных напряжений подразумевается разрушение в направлении оси  $y$ ), с критерием Хашина при 12586 Н, с критерием Пака при 12634 Н. Разрушение по волокну с критерием максимальных напряжений началось при нагрузке 14683 Н, с критерием Хашина при 13015 Н, с критерием Пака при 14777 Н. На рисунке 4 показан характер разрушения экспериментального образца. На рисунке 5 показаны полные деформации в конце расчета с различными критериями прочности. По распределению полных деформаций можно судить о зоне разрушения. Как видно из рисунков, наибольшие полные деформации имеют разрушенные элементы.

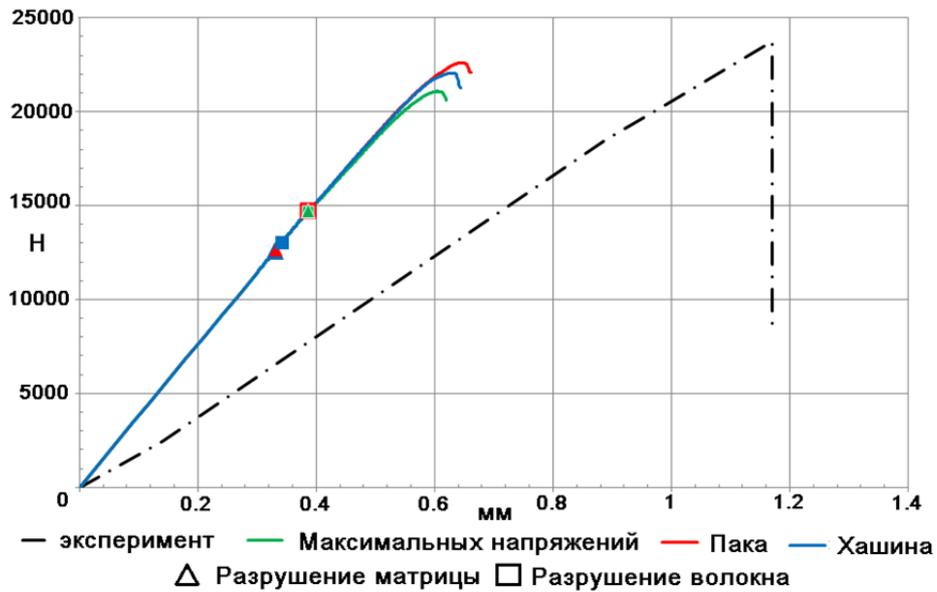


Рисунок 3 – График зависимости силы реакции ( $F$ , Н) от перемещений ( $U$ , мм) с различными критериями прочности



Рисунок 4 - (а) C-Scan перед началом полного разрушения; (б) увеличенный снимок при нагрузке 22.7кН (отмечен отделившийся слой). Нагрузка прикладывалась вертикально

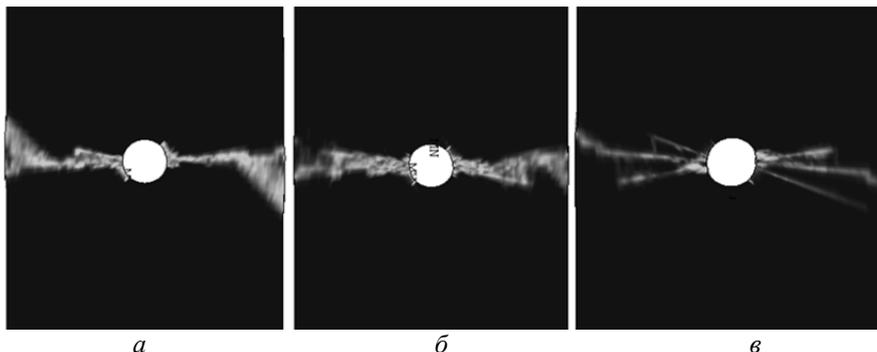


Рисунок 5 – Полные деформации по Мизесу в конце расчета, полученные при использовании критерия максимальных напряжений (а), Пака (б), Хашина (в)

В статье рассмотрены три различных критерия разрушения материала с различными коэффициентами деградации материала.

Проведены численные эксперименты на растяжение пластины с отверстием, сжатие пластины со смещенным от центра отверстием и сдвиг пластины без отверстия, но ввиду ограничения по объему они не вошли в статью. Выбран коэффициент деградации материала таким образом, чтобы расчетная предельная сила реакции не отличалась от экспериментальной более чем на 10% во всех экспериментах с любым из критериев.

Среди рассмотренных критериев лучше всего показал себя критерий Пака, для которого средняя погрешность относительно эксперимента по результатам расчетов составила 1%, в то время как для критерия Хашина – 5%, а для критерия максимальных напряжений – 10%. Критерий максимальных напряжений и критерий Пака могут применяться как для однонаправленного материала, так и для тканного. Критерий Пака в отличие от критерия максимальных напряжений учитывает микромеханику разрушения материала ввиду этого, следует рекомендовать его для дальнейшего применения.

Необходимо отметить, что после начала разрушения образец еще долго сохраняет несущую способность. Так, в эксперименте на сжатие пластины с отверстием в центре для критерия Пака предельная нагрузка разрушения в 1.86 раз превышает начальную нагрузку разрушения, для критерия максимальных напряжений в 1.45, для критерия Хашина в 1.79.

Требуется дальнейшее исследование методик предсказания разрушающей нагрузки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sleight, D.W. Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures. / D.W. Sleight. – Hampton: Langley Research Center, 1999. – 92 p.
2. Giovanni, P. Numerical application of three-dimensional failure criteria for laminated composite materials / Giovanni Perillo, Nils Petter Vedvik, Andreas T. Echtermeyer. – SIMULIA Community Conference, 2012, URL: [http://www.simulia-china.com/download/global/2012/Perillo\\_NTNU\\_final\\_2212012.pdf](http://www.simulia-china.com/download/global/2012/Perillo_NTNU_final_2212012.pdf).
3. Suemasu, H. On the failure mechanism of composite laminates with an open hole subjected to compressive load / H. Suemasu, H. Takahashi, T. Ishikawa. – Composite Science and Technology. – 2006. – vol. 66. – p.p. 634–641.
4. Pietropaoli, E. Progressive Failure Analysis of Composite Structures Using a Constitutive Material Model (USERMAT) Developed and Implemented in ANSYS / E. Pietropaoli. – Springer Science+Business Media B.V., 2011, URL: <http://www.scribd.com/doc/74555060/Full-Text>.
5. Chua Hui Eng Compressive failure of open-hole carbon composite laminates / Chua Hui Eng. – National university of singapore, 2007, URL: <http://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/handle/10635/17550/%28Chua%20Hui%20Eng%29CHE.pdf?sequence=1>.
6. Tan, S.C. A progressive failure model for composite laminates containing openings / Tan S.C. – Journal of Composite Materials. – 1991. – vol. 25. – № 5. – p.p. 556–577.
7. Shahid, I. Progressive Failure Analysis of Laminated Composites Subjected to In-Plane Tensile and Shear Loads. Ph. D. Dissertation, Stanford University, Tensile and Shear Loads, Ph. D. Dissertation, Stanford University, 1993.
8. Chang, F.K. The In Situ Ply Shear Strength Distributions in Graphite/Epoxy Laminated Composites / F.K. Chang, M.H. Chen. – Journal of Composite Materials. – 1987. – vol. 27. – p.p. 708–733.
9. Starnes, J.H.Jr., Rouse M. Postbuckling and Failure Characteristics of Selected Flat Rectangular Graphite-Epoxy Plates Loaded in Compression. Patent No. AIAA Paper 81–0543, 1981.
10. Chang, F.K. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations / F.K. Chang, K.Y. Chang. – Journal of Composite Materials. – Vol. 21. – September 1987. – p.p. 834–855.
11. Hinton, M.J. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence / M.J. Hinton, P.G. Soden. – Composites Science and Technology 62 (2002). – p.p. 1725–1797.
12. Puck, A. Guidelines for the determination of the parameters in Pucks action plane strength criterion / A. Puck, J. Kopp, M. Knops. – Comp. Sci. Technol. 62 (2002). – p.p. 371–378.

**Цепенников Максим Владимирович**  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29;  
аспирант кафедры «Вычислительная математика и механика», инженер–конструктор–расчетчик, ОАО «АВИАДВИГАТЕЛЬ», г. Пермь, ГСП, Комсомольский пр., 93.  
Email: neiron1987@rambler.ru

**Сметанников Олег Юрьевич**  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29.  
доктор технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и механика»,  
Email: sou2009@mail.ru

**Повышев Илья Алексеевич**  
ОАО «АВИАДВИГАТЕЛЬ», г. Пермь, ГСП, Комсомольский пр., 93.  
зам. начальника КО–804,  
Email: neiron1987@rambler.ru

M.V. TSEPENNIKOV, O.Yu. SMETANNIKOV, I.A. POVYSHEV

## PARAMETERS IDENTIFICATION NUMERICAL TECHNIQUES CALCULATION OF FRACTURE STRUCTURES OF COMPOSITE MATERIALS

*The calculations of fracture of four carbon fiber samples are presented. Coefficients of degradation of material properties were chosen according to results analysis. Maximal stress, Puck and Hashin criteria were chosen as failure criteria. Calculation results and experimental ones were compared. Future investigation is needed to identify the appliance of various failure criteria.*

**Keywords:** *composite material, fracture model, the definition of failure load, the behavior of structure after failure beginning.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Sleight, D.W. Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures. / D.W. Sleight. – Hampton: Langley Research Center, 1999. – 92 p.
2. Giovanni, P. Numerical application of three-dimensional failure criteria for laminated composite materials / Giovanni Perillo, Nils Petter Vedvik, Andreas T. Echtermeyer. – SIMULIA Community Conference, 2012, URL: [http://www.simulia-china.com/download/global/2012/Perillo\\_NTNU\\_final\\_2212012.pdf](http://www.simulia-china.com/download/global/2012/Perillo_NTNU_final_2212012.pdf).
3. Suemasu, H. On the failure mechanism of composite laminates with an open hole subjected to compressive load / H. Suemasu, H. Takahashi, T. Ishikawa. – Composite Science and Technology. – 2006. – vol. 66. – p.p. 634–641.
4. Pietropaoli, E. Progressive Failure Analysis of Composite Structures Using a Constitutive Material Model (USERMAT) Developed and Implemented in ANSYS / E. Pietropaoli. – Springer Science+Business Media B.V., 2011, URL: <http://www.scribd.com/doc/74555060/Full-Text>.
5. Chua Hui Eng Compressive failure of open-hole carbon composite laminates / Chua Hui Eng. – National university of singapore, 2007, URL: <http://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/handle/10635/17550/%28Chua%20Hui%20Eng%29CHE.pdf?sequence=1>.
6. Tan, S.C. A progressive failure model for composite laminates containing openings / Tan S.C. – Journal of Composite Materials. – 1991. – vol. 25. – № 5. – p.p. 556–577.
7. Shahid, I. Progressive Failure Analysis of Laminated Composites Subjected to In-Plane Tensile and Shear Loads. Ph. D. Dissertation, Stanford University, Tensile and Shear Loads, Ph. D. Dissertation, Stanford University, 1993.
8. Chang, F.K. The In Situ Ply Shear Strength Distributions in Graphite/Epoxy Laminated Composites / F.K. Chang, M.H. Chen. – Journal of Composite Materials. – 1987. – vol. 27. – p.p. 708–733.
9. Starnes, J.H.Jr., Rouse M. Postbuckling and Failure Characteristics of Selected Flat Rectangular Graphite-Epoxy Plates Loaded in Compression. Patent No. AIAA Paper 81–0543, 1981.
10. Chang, F.K. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations / F.K. Chang, K.Y. Chang. – Journal of Composite Materials. – Vol. 21. – September 1987. – p.p. 834–855.
11. Hinton, M.J. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence / M.J. Hinton, P.G. Soden. – Composites Science and Technology 62 (2002). – p.p. 1725–1797.
12. Puck, A. Guidelines for the determination of the parameters in Pucks action plane strength criterion / A. Puck, J. Kopp, M. Knops. – Comp. Sci. Technol. 62 (2002). – p.p. 371–378.

**Tsepennikov Maxim Vladimirovich**  
Perm National Research Politechnical University, Permskiy krai, Perm city, Komsomolsky prospect, 29;  
postgraduate student of the Department of Computational Mathematics and Mechanics,  
engineer of the OJSC «Aviadvigatel», Perm city, Komsomolsky prospect, 93.  
Email: neiron1987@rambler.ru

**Smetannikov Oleg Yurievich**  
Perm National Research Politechnical University, Permskiy krai, Perm city, Komsomolsky prospect, 29.  
Doctor of technical sciences, docent of the Department of Computational Mathematics and Mechanics,  
Email: sou2009@mail.ru

**Povyshev Ilya Alekseevich**  
OJSC «Aviadvigatel», Perm city, Komsomolsky prospect, 93.  
Deputy Chief of Design Department 804  
Email: neiron1987@rambler.ru

## ПУТИ СОГЛАСОВАНИЯ РЕЖИМОВ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ И СИСТЕМЫ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ НАДДУВОМ

*В статье представлены основные способы регулирования компрессоров и турбин при согласовании режимов совместной работы поршневого двигателя и системы воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом. Рассмотрено регулирование компрессоров поворотом лопаток направляющего аппарата, регулирование турбин поворотом лопаток соплового аппарата, изменение площади проходного сечения соплового аппарата турбины. Выявлены основные управляемые параметры проточной части системы воздухообеспечения при согласовании режимов работы турбин, компрессоров и поршневой части двигателя.*

**Ключевые слова:** система воздухообеспечения, поршневой двигатель, двухступенчатый наддув, компрессор, турбина, эксергетический метод, эксергия, управляемые параметры

Под оптимальным управлением систем воздухообеспечения комбинированных поршневых двигателей подразумевается такое управление, при котором на отдельных режимах работы двигателя обеспечиваются его наиболее выгодные технико-экономические показатели. Данное направление реализуется путём увеличения числа управляемых элементов проточной части системы воздухообеспечения при согласовании режимов работы турбин, компрессоров и поршневой части двигателя.

К управляемым элементам проточной части системы воздухообеспечения комбинированного поршневого двигателя можно отнести:

- направляющий аппарат одного или двух ступеней компрессоров;
- рабочее колесо одного или двух ступеней компрессоров;
- лопаточный диффузор одного или двух ступеней компрессоров;
- сопловой аппарат одной или двух ступеней турбин;
- рабочее колесо одной или двух ступеней турбин;
- перепуск части сжатого воздуха в одной или двух ступенях системы воздухообеспечения;
- перепуск части отработавших газов в одной или двух ступенях системы воздухообеспечения.

Согласование работы двух ступеней компрессоров (низкого давления (КНД) и высокого давления (КВД)) и выбор формы проточной части обычно производится для одного режима работы, называемого расчётным. В расчётном случае приведённые относительные частоты вращения КНД и КВД соответственно равны  $\bar{n}_{нр\text{КНД}} = n_{нр.\text{РКНД}} / n_{нр\text{КНД}} = 1,0$  и  $\bar{n}_{нр\text{КВД}} = n_{нр.\text{РКВД}} / n_{нр\text{КВД}} = 1,0$ , где  $n_{нр.\text{РКНД}}$  и  $n_{нр.\text{РКВД}}$  – приведённая частота вращения соответственно КНД и КВД, принимаемая в расчёте;  $n_{нр\text{КНД}}$  и  $n_{нр\text{КВД}}$  – приведённая частота вращения соответственно КНД и КВД на номинальном режиме работы комбинированного поршневого двигателя. В этих условиях в каждой ступени обтекание рабочих лопаток и лопаток направляющего аппарата оптимальное, что обеспечивает заданный напор при минимальных потерях. В связи с увеличением плотности воздуха при сжатии площадь проходных сечений в компрессорах от ступени к ступени уменьшается. При отклонении режима работы компрессоров от расчётного, например, вследствие снижения частоты вращения или при повышении температуры окружающей среды ( $\bar{n}_{нр\text{КНД}} < 1,0$ ,  $\bar{n}_{нр\text{КВД}} < 1,0$ ), степень повышения давления в каждой ступени турбокомпрессоров  $\pi_{к_i}$  снижается. Нарушается согласованность

в работе ступеней компрессоров. Плотность воздуха от ступени к ступени отклоняется от расчётных значений, что приводит к изменению распределения скоростей воздуха и углов атаки на ступенях. При снижении  $\bar{n}_{прКНД}$  и  $\bar{n}_{прКВД}$  снижаются их  $\pi_{\kappa_i}$ . Вследствие этого увеличение плотности воздуха по тракту компрессоров будет менее значительным, чем в расчётных условиях. Чем больше расчётная степень повышения давления, тем сильнее различие в условиях обтекания первой и второй ступеней на нерасчётных режимах.

Рассогласование режимов работы КНД и КВД приводит к значительному ухудшению характеристик компрессоров и снижению запасов устойчивости на нерасчётных режимах.

Задачами регулирования компрессоров могут являться:

- повышение КПД компрессора и при необходимости его напора на нерасчётных режимах;
- повышение запасов устойчивости компрессоров для обеспечения их максимально допустимых значений во всех условиях эксплуатации;
- управление расходом воздуха через КНД и КВД для улучшения эффективных показателей комбинированного поршневого двигателя;
- устранение неблагоприятных внешних воздействий, которые могут привести к потере газодинамической устойчивости компрессоров;
- устранение или снижение вибрации лопаток при работе на повышенных углах атаки ступеней компрессоров.

В настоящее время в конструкциях существующих компрессорах применяются следующие способы регулирования:

- перепуск части воздуха из отдельных сечений проточной части компрессора в атмосферу;
- поворот лопаток направляющего аппарата и лопаточного диффузора;
- поворот лопаток рабочего колеса компрессора;
- самопроизвольное или принудительное изменение частот вращения ступеней компрессоров.

Рассмотрим регулирование компрессора поворотом лопаток направляющего аппарата.

Смысл регулирования ступеней компрессоров поворотом направляющих аппаратов заключается в изменении углов атаки потока воздуха, набегающего на рабочие лопатки, с тем, чтобы не допускать их значительного отклонения от расчётных значений, либо в управлении напором и расходом воздуха компрессоров в целях обеспечения наиболее благоприятного протекания характеристик комбинированного поршневого двигателя.

Принцип регулирования поворотом лопаток направляющего аппарата показан на рисунке 1. Штрихпунктирными линиями показаны треугольники скоростей при снижении коэффициента расхода. Видно, что в этом случае угол атаки на рабочих лопатках увеличивается, приближаясь к своему критическому значению, на котором происходит отрыв потока на спинке лопатки. Штриховыми линиями показаны треугольники скоростей при повороте направляющего аппарата на угол  $\Delta\varphi_{НА}$ . Это позволяет при сохранении практически неизменным значения коэффициента расхода так изменить направление относительной скорости  $W_1$ , что угол атаки возвращается к своему расчётному значению. Увеличение угла установки лопаток направляющего аппарата  $\beta_{1л}$  уменьшает диффузорность и угол раскрытия межлопаточных каналов, что благоприятно влияет на характер течения воздуха. Однако увеличение  $\beta_{1л}$  приводит к росту волновых потерь [1]. В то же время при  $\beta_{1л} > 20^\circ$  расширяется диапазон устойчивой работы компрессора. Это делает целесообразным применение таких компрессоров при повышенных объёмных расходах воздуха, а значит и высоких средних эффективных давлений. Таким образом, существует некий оптимальный угол установки лопаток  $\beta_{1л}$  в зависимости от режимов работы комбинированного поршневого двигателя.

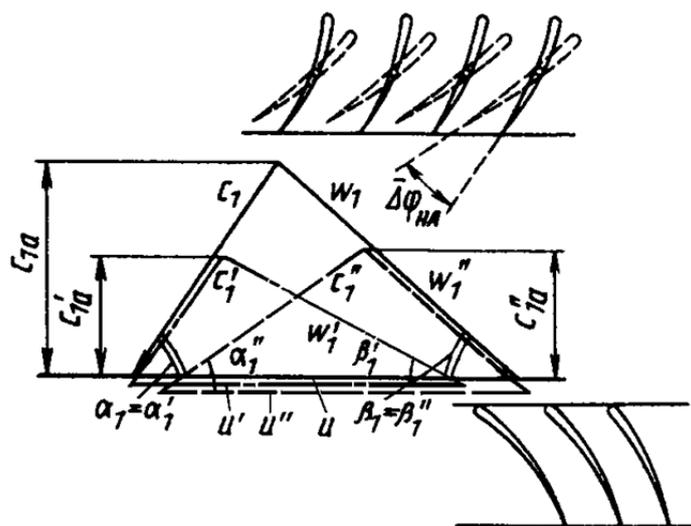


Рисунок 1 – Треугольники скоростей при различном положении лопаток направляющего аппарата

Угол установки лопаток направляющего аппарата  $\beta_{1,l}$  и угол входа потока  $\beta_1$  связаны между собой углом атаки  $i = \beta_{1,l} - \beta_1$ . Обычно  $i$  на расчётном режиме принимается близким к нулю. Однако наличие пульсации расхода воздуха приводит к тому, что на расчётном режиме скорость  $W_1$ , а следовательно, и угол  $\beta_1$  изменяются за один рабочий цикл комбинированного поршневого двигателя от минимума до максимума. Величина колебаний угла атаки  $i$  может составлять 3 – 6 % от среднего значения  $i$ . Поэтому понятие «безударный вход» ( $i = 0^\circ$ ) для турбокомпрессоров является формальным и не может быть связано с режимом максимального КПД компрессора. Кроме того, при изменении режима работы комбинированного поршневого двигателя изменяются частоты вращения КВД и КНД, степени повышения давлений КВД и КНД и расход воздуха, что в свою очередь также приводит к изменению углов  $\beta_1$  КВД и КНД. По опытным данным [1] при изменении угла  $\beta_1$  от 20 до 40° оптимальный угол атаки составляет 8 – 12°. При  $\beta_1 < 20^\circ$  оптимальный угол атаки находится в диапазоне 1,5 – 2,5°.

Поворот лопаток направляющего аппарата на уменьшение угла атаки называют «прикрытием» (при этом уменьшается площадь проходных сечений межлопаточных каналов). Поворот лопаток направляющего аппарата на увеличение угла атаки называют «раскрытием».

Вследствие изменения площади проходного сечения межлопаточных каналов направляющего аппарата и углов атаки на рабочих лопатках поворот направляющего аппарата приводит к изменению напора компрессора и его расходных характеристик.

Совместное регулирование двух ступеней КНД и КВД при уменьшении  $\bar{n}_{прКНД}$  и  $\bar{n}_{прКВД}$  осуществляется поворотом лопаток направляющего аппарата КНД на закрытие, а КВД – на раскрытие. Такое регулирование определяется характером рассогласования режимов работы КНД и КВД при низких их частотах вращения и обеспечивает повышение запасов устойчивости КНД при некотором снижении его напора. Однако напор в КВД растёт в более высокой степени, что обеспечивает повышение напора компрессоров в целом. Раскрытие направляющего аппарата КВД приводит к увеличению расхода воздуха через оба компрессора в целом. В итоге в отличие от регулирования поворотом лопаток направляющего аппарата только КНД совместное регулирование КНД и КВД обеспечивает на пониженных режимах ( $\bar{n}_{прКНД} < 1,0$ ,  $\bar{n}_{прКВД} < 1,0$ ) повышение всех основных параметров двух ступеней в целом – степени повышения давления, расхода воздуха через компрессоры и КПД компрессоров.

Таким образом, углы поворота лопаток направляющего аппарата должны быть различными для каждой ступени и изменяться в функции  $\bar{n}_{прКНД}$  и  $\bar{n}_{прКВД}$ . Чем меньше  $\bar{n}_{прКВД}$ , тем в большей степени отклоняется его режим от расчётного и тем, следовательно, большим должен быть угол поворота лопаток его направляющего аппарата.

Рассмотрим регулирование компрессора поворотом лопаток рабочего колеса.

Создать достаточно надёжную и работоспособную ступень компрессора с поворотными лопатками рабочего колеса намного сложнее, чем с поворотными лопатками направляющего аппарата.

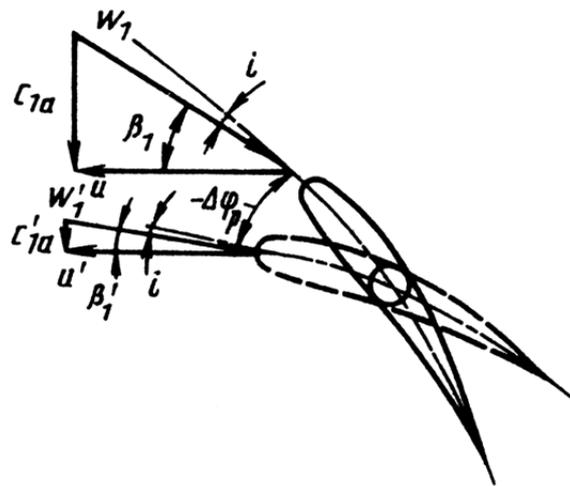
Поворот лопаток рабочего колеса компрессора позволяет решить следующие задачи:

- изменение в широких пределах расхода воздуха через двигатель при сохранении высоких значений КПД регулируемой ступени;
- улучшение условий обтекания рабочих лопаток и уменьшение в них потерь на нерасчётных режимах.

Влияние поворота лопаток рабочего колеса на характеристику компрессора представлено на рисунке 2.

Сплошные линии соответствуют расчётному положению профиля лопатки и расчётному треугольнику скоростей. Уменьшение расхода воздуха и соответственно осевой скорости  $C_{1a}$  увеличивает угол атаки  $i$  у нерегулируемой рабочей лопатки, что в конечном итоге может привести к отрыву потока.

Таким образом, если повернуть профиль на прикрытие (на угол  $-\Delta\varphi_p$ ), то и при пониженном расходе воздуха угол атаки  $i$  станет близок к расчётному. Напор компрессора уменьшается вследствие снижения относительной скорости потока воздуха на входе в рабочее колесо  $W_1$  и кинетической энергии потока воздуха в относительном движении  $W_1^2/2$ .



*Рисунок 2 – Треугольники скоростей и положение рабочей лопатки колеса компрессора при различной скорости набегающего потока воздуха*

Рассмотрим регулирование компрессора поворотом лопаток лопаточного диффузора.

Угол входа потока в диффузор  $\alpha_3$  является одной из конструктивных величин, влияющих на газодинамические характеристики диффузора. Угол  $\alpha_3$  определяется по углу установки лопатки в диффузоре  $\alpha_{3л}$  и углу атаки  $i_\delta$ :  $\alpha_3 = \alpha_{3л} + i_\delta$ . При профилировании лопаток должно соблюдаться условие [1]:

$$\sin \alpha_3 < \frac{a_{2,\delta} z_\delta}{\pi D_3},$$

где  $a_{2,\delta}$  – ширина горловины межлопаточного канала на входе;

$z_0$  – число лопаток диффузора;

$D_3$  – внутренний диаметр лопаточного диффузора.

В случае несоблюдения этого условия возможно «запирание» диффузора. По опытными данным [1, 2] максимальная эффективность лопаточного диффузора наблюдается при  $i_0 = 2 - 4^\circ$  и  $\alpha_3 = 12 - 20^\circ$ .

Таким образом, регулируя угол установки лопатки в диффузоре  $\alpha_{3,l}$  на нерасчётных режимах можно добиться значительного уменьшения потерь в лопаточном диффузоре, связанных с трением и расширением потока.

Рассмотрим регулирование турбин высокого давления (ТВД) и низкого давления (ТНД).

Регулированием турбин в системе воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом комбинированного поршневого двигателя достигается:

- изменение расхода газов через турбины;
- снижение потерь в лопаточных венцах турбин на нерасчётных режимах;
- перераспределение работ ТВД и ТНД и соответственно работ, подводимых к КВД и КНД.

Основными способами регулирования турбин в настоящее время являются:

- поворот лопаток соплового аппарата;
- изменение площади проходного сечения соплового аппарата  $F_{c.a}$ .

Следует отметить, что конструктивно выполнение турбины с поворотными лопатками соплового аппарата намного сложнее, чем создание компрессора с поворотными лопатками направляющего аппарата. Это объясняется высокими значениями температуры газов в турбине и сложностью обеспечения работоспособности и охлаждения подвижных узлов в этих условиях. Тем не менее, в настоящее время работы в этом направлении ведутся, в частности при использовании систем воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом, где температура газов очень значительная и проблема согласования характеристик турбин, компрессоров и поршневой части двигателя на нерасчётных режимах стоит очень остро.

Изменение  $F_{c.a}$  является эффективным средством воздействия на параметры турбины. При раскрытии соплового аппарата расход газов  $G_2$  и мощность турбины  $N_m$  возрастают. И наоборот, закрытие соплового аппарата приводит к их снижению. Если расход газов через турбину ограничивается каким-либо проходным сечением (например, нерегулируемый сопловой аппарат ТВД), то раскрытие соплового аппарата регулируемой турбины при  $G_{2,пр} = \text{const}$  сопровождается резким уменьшением её мощности. Величина эффективного КПД турбины  $\eta_m$  достигает своего максимума при величине  $F_{c.a}$ , близкой к расчётной.

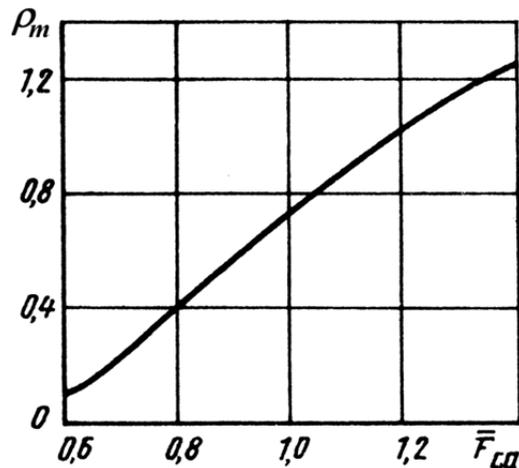
На рисунке 3 показана зависимость степени реактивности  $\rho_m$  регулируемой турбины от относительной площади соплового аппарата турбины  $\bar{F}_{c.a} = F_{c.a_p} / F_{c.a_{исх}}$ ,

где  $F_{c.a_p}$  – значение площади соплового аппарата турбины, принимаемое в расчёте;

$F_{c.a_{исх}}$  – значение площади соплового аппарата турбины, установленное при изготовлении ( $\bar{F}_{c.a} = 1,0$  – расчётная площадь проходного сечения соплового аппарата).

Видно, что при раскрытии соплового аппарата степень реактивности турбины растёт. Как известно, изменение  $\rho_m$  приводит к перераспределению срабатываемого теплоперепада между сопловым аппаратом и рабочим колесом турбины. Изменяются в связи с этим и скорости потока газов на выходе из лопаточных венцов. С ростом  $\rho_m$  уменьшается скорость потока газов на выходе из соплового аппарата  $C_1$  и увеличивается относительная скорость

на выходе из рабочего колеса турбины  $W_2$ , что приводит к увеличению потерь, связанных с отрывом потока на выходных кромках, а также увеличению потерь с выходной скоростью. С ростом степени понижения давления в турбине  $\pi_m$  при больших значениях  $\rho_m$  вначале достигается режим сверхзвукового течения в лопатках рабочего колеса. При пониженных значениях  $\rho_m$  сверхзвуковое течение появляется первоначально в лопатках соплового аппарата турбины. Кроме того, регулирование соплового аппарата турбин приводит к перераспределению суммарной степени понижения давления между ТВД и ТНД  $\pi_{\Sigma m}$ . Так, например, раскрытие соплового аппарата ТВД приводит к снижению степени понижения давления в ТВД, а раскрытие соплового аппарата ТНД оказывает противоположное воздействие на впереди расположенную ТВД и приводит к увеличению её степени понижения давления и работы. Следует отметить, что режим работы ТНД зависит не только от управления площадью соплового аппарата этой турбины, но и от давления за ТНД. Отсюда следует, что управление сопловым аппаратом ТНД при необходимости совместно с управлением сопловым аппаратом ТВД может служить эффективным средством воздействия на работу не только всей системы воздухообеспечения, но и комбинированного поршневого двигателя в целом.



*Рисунок 3 – Зависимость степени реактивности турбин от площади соплового аппарата*

При работе системы воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом комбинированного поршневого двигателя на пониженных по сравнению с расчётными режимах (например, с уменьшением среднего эффективного давления) в наибольшей мере уменьшается степень понижения давления в ТНД. Это приводит к обтеканию её рабочих лопаток в относительном движении под большими углами атаки и к отрыву потока, а значит и к значительному падению КПД. Поворот лопаток соплового аппарата ТНД на прикрытие позволяет повысить её степень понижения давления и приблизить режим обтекания рабочих лопаток к расчётному, что обеспечивает снижение потерь в ТНД в целом.

Для характеристики турбин используется величина запаса мощности турбины

$$\bar{N}_{\max} = \left( \frac{N_{np \pi_{m \max}}}{N_{np \pi_{m p}}} \right) F_{c.a} = \text{idem}.$$

Значение  $\bar{N}_{\max}$  показывает, в какой мере может возрасти мощность турбины при увеличении степени понижения давления от расчётной величины  $\pi_m = \pi_{m p}$  до максимального значения  $\pi_m = \pi_{m \max}$ , соответствующего режиму запираания турбины, когда скорость на выходе из неё достигает скорости звука.

На рисунке 4 представлена зависимость  $\bar{N}_{\max}$  от  $\bar{F}_{c.a}$ .

На рисунке 4 видно, что при раскрытии соплового аппарата способность турбины к увеличению работы с ростом  $\pi_m$  уменьшается.

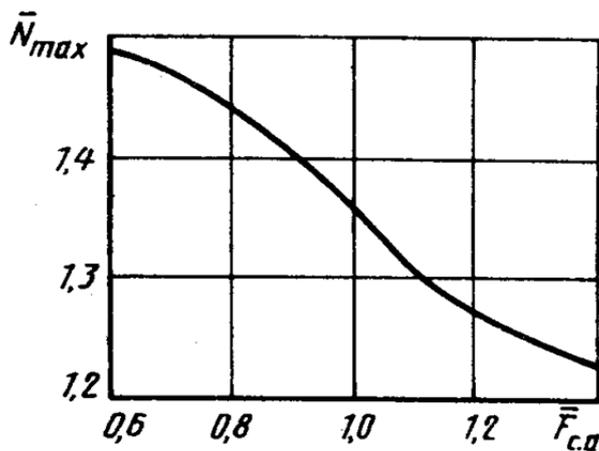


Рисунок 4 – Зависимость запаса работы турбины от площади соплового аппарата

Это объясняется увеличением степени реактивности турбины и уменьшением в связи с этим расширительных возможностей соплового аппарата. Для турбины, у которой регулирование соплового аппарата связано с уменьшением  $F_{c.a}$  по сравнению с расчетным значением, следует снижать расчетную степень реактивности. Это позволит сохранить высокую способность такой турбины к увеличению мощности при регулировании соплового аппарата. Для другого случая, когда при регулировании требуется уменьшить  $F_{c.a}$ , следует выбирать повышенные значения  $\rho_m$  на расчетном режиме. Тогда степень реактивности будет сохранять положительные значения при достаточно большом прикрытии  $F_{c.a}$ , что позволит избежать дополнительных потерь, вызываемых отрицательной степенью реактивности.

Что касается управления перепуском части сжатого воздуха и/или перепуском части отработавших газов в одной или двух ступенях системы воздухообеспечения, то его реализовать в математической модели при оптимизации достаточно сложно.

Таким образом, к управляемым параметрам проточной части системы воздухообеспечения при согласовании режимов работы турбин, компрессоров и поршневой части двигателя можно отнести:

- углы установки лопаток направляющих аппаратов КНД  $\varphi_{н.а.КНД}$  и КВД  $\varphi_{н.а.КВД}$ ;
- углы установки лопаток рабочих колёс КНД  $\varphi_{р.к.КНД}$  и КВД  $\varphi_{р.к.КВД}$ ;
- углы установки лопаток в лопаточных диффузорах КНД  $\alpha_{3л.КНД}$  и КВД  $\alpha_{3л.КВД}$ ;
- площади сопловых аппаратов ТНД  $F_{c.a.ТНД}$  и ТВД  $F_{c.a.ТВД}$ .

В качестве функции цели при согласовании режимов работы турбин, компрессоров и поршневой части двигателя можно принять максимум эффективного КПД  $\eta_{et}$  при потребном значении среднего эффективного давления  $p_{me}$  комбинированного поршневого двигателя.

Тогда для расчёта характеристик турбин и компрессоров при работе комбинированного поршневого двигателя на максимальном  $\eta_{et}$  в зависимости от уровня форсирования  $p_{me}$  целевая функция имеет вид

$$\eta_{et} = f(\varphi_{н.а.КНД}, \varphi_{н.а.КВД}, \varphi_{р.к.КНД}, \varphi_{р.к.КВД}, \alpha_{3л.КНД}, \alpha_{3л.КВД}, F_{c.a.ТНД}, F_{c.a.ТВД}).$$

При решении задачи оптимизации учитываются конструктивные, прочностные ограничения, а также ограничения по запасу устойчивой работы элементов проточной части систем воздухообеспечения и диапазону варьирования переменных.

Следует отметить, что при практической реализации данного подхода можно использовать эксергетический метод оценки эффективности системы воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом [3]. Данный метод позволит оценить пути согласования режимов работы поршневого двигателя и системы воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом с точки зрения второго закона термодинамики, а именно с точки зрения распределения потерь эксергии в комбинированном поршневом двигателе в целом.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Межеричкий, А.Д. Турбокомпрессоры систем наддува судовых дизелей / А.Д. Межеричкий. – Л.: Судостроение, 1986. – 248 с.
2. Байков, Б.П. Турбокомпрессоры для наддува дизелей: Справочное пособие / Б.П. Байков, В.Г. Бордуков, П.В. Иванов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 200 с.
3. Бердник, А.Н. Эксергетический метод оценки эффективности систем воздухообеспечения с одно – и двухступенчатым наддувом и с силовой турбиной / А.Н. Бердник // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 3 (305). – С. 45 – 53.

**Бердник Алексей Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»

Кандидат технических наук, доцент

Тел: (4212) 37–52–17

E–mail: alex.bdk75@yandex.ru

---

A.N. BERDNIK

### **WAYS OF COORDINATION MODES OF THE JOINT OPERATION OF THE PISTON ENGINE AND SYSTEM AIR SUPPLY WITH TWO–STAGE SUPERCHARGED**

*The article presents the main methods of control of compressors and turbines with the concurrence of the co–operation of the piston engine and the air supply system with two–stage supercharging. Considered the regulation of the compressor by the rotation of the guide vanes, throttling turbine blades rotating nozzle apparatus, the change of the cross–section area nozzle turbine apparatus. The main control parameter of a flowing part of the air supply system with the concurrence of modes turbines, compressors and piston part of the engine.*

**Keywords:** *air supply system, piston engine, two–stage supercharging, compressor, turbine, exergy method, exergy, managed options*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Mezherickij, A.D. Turbokompressory sistem nadduva sudovyh dizelej / A.D. Mezherickij. – L.: Sudostroenie, 1986. 248 s.
2. Bajkov, B.P. Turbokompressory dlja nadduva dizelej: Spravochnoe posobie / B.P. Bajkov, V.G. Bordukov, P.V. Ivanov. – L.: Mashinostroenie, 1975. – 200 s.
3. Berdnik, A.N. Jeksergeticheskij metod ocenki jeffektivnosti sistem vozduhosnabzhenija s odno – i dvuhstupenchatym nadduvom i s silovoj turbinoj / A.N. Berdnik // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tehnik i tehnologij*. – 2014. № 3 (305). – S. 45 – 53.

**Berdnik Alexey Nikolaevich**

Pacific National University, Khabarovsk

Candidate of technical sciences, associate professor of department «DVS»

Tel: (4212) 37–52–17

E–mail: alex.bdk75@yandex.ru

В.А. АВРАМЕНКО, А.В. ФЛЕЙТА, Е.И. ЭЙСЫМОНТ,  
И.П. АКУЛА, Н.М. ЧЕКАН, Е.В. ОВЧИННИКОВ

## НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ КАРБОНИТРИДОВ РЕФРАКТОРНЫХ МЕТАЛЛОВ И АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА ИНЖЕНЕРНО–ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Рассмотрены структура и морфология многослойных композиционных покрытий на базе карбонитридов циркония при различных условиях формирования покрытия. Исследовано энергетическое состояние поверхностных слоев покрытий на основе ZrCN. Рассчитана поверхностная энергия разработанных покрытий, исходя из полученных результатов исследований по изучению процессов смачивания.*

**Ключевые слова:** покрытие, поверхностная энергия, морфология, структура, свойства.

Растущий спрос на новые материалы с улучшенными механическими и трибологическими характеристиками определяет интерес к области научных исследований, такой как, инженерия поверхности и широкому спектру покрытий – алмазоподобного углерода, переходных металлов нитриды, карбиды и карбонитриды [1–20]. Покрытия нитридов и карбонитридов переходных металлов, покрытия на основе титана интенсивно изучаются, так как нашли широкое применение в промышленности [7, 15]. Покрытия, формируемые на базе соединений циркония, широко применяются при производстве цветных металлов, т.к. обладают хорошей эрозионной стойкостью и стойкостью к воздействию высоких температур.

Исследования, предпринятые для применения PVD твердых покрытий, таких как CrN и CrAlN применялись для улучшения износостойкости и стойкости к окислению. Основная цель данных покрытий – защитить поверхность матрицы от выше указанных факторов. Однако необходимо также учитывать динамический удар жидкости по поверхности литейной формы при получении отливки. Покрытия на базе хрома в большинстве случаев не могли обеспечить необходимую защиту при динамическом воздействии, в результате чего снижалась адгезионная прочность покрытия, и увеличивалось коррозионное воздействие на металл формы при заливке расплавленного цветного металла.

Однако, несмотря на то, что ZrN пленки имеют хорошие триботехнические и прочностные характеристики, высокую коррозионную стойкость в отношении твердости, коррозионной стойкости и триботехнические характеристики, введение углерода в покрытие ZrN и формирование соединения ZrNC, приводит к существенному увеличению эксплуатационных свойств. Исследований, касающихся синтеза и свойств ZrCN покрытий, весьма мало. Исследователи, изучающие структуру и свойства ZrCN покрытий, формируют данные соединения методом химического осаждения из паровой фазы (CVD) [2, 5] и физическим осаждением из паровой фазы (PVD) [2, 3, 6, 7].

Целью данной работы является изучение структуры и свойств нанокристаллических композиционных покрытий на основе карбонитридов рефракторных металлов и алмазоподобного углерода инженерно–технического назначения.

Композиционные покрытия ZrCN формировали методом катодно–дугового осаждения на вакуумной установке УВНПА–1–001, оборудованной источником стационарной металлической плазмы с катодом из циркония, и ионным источником с кольцевым анодом «Радикал», через который подается газовая смесь  $N_2 + C_2H_2$ , необходимая для формирования алмазоподобных покрытий. Покрытия толщиной около 3 мкм были получены на полированных подложках (11 класс чистоты), изготовленных из стали Р6М5. Исследования структуры, физико–химических характеристик покрытий проводили общепринятыми методами ИК–спектроскопии, растровой электронной микроскопии, оптической, атомно–силовой микроскопии (АСМ).

Проведенные методом растровой электронной микроскопии исследования поверхностной структуры соединений ZrCN, сформированной сочетанием физического и химического осаждения одновременно, свидетельствуют о формировании достаточно развитой морфологии. На поверхности наблюдаются поры латеральным размером от 1 до 5 мкм, а также глобулярные фрагменты размером от 0,1 до 1 мкм (рисунок 1, 2).

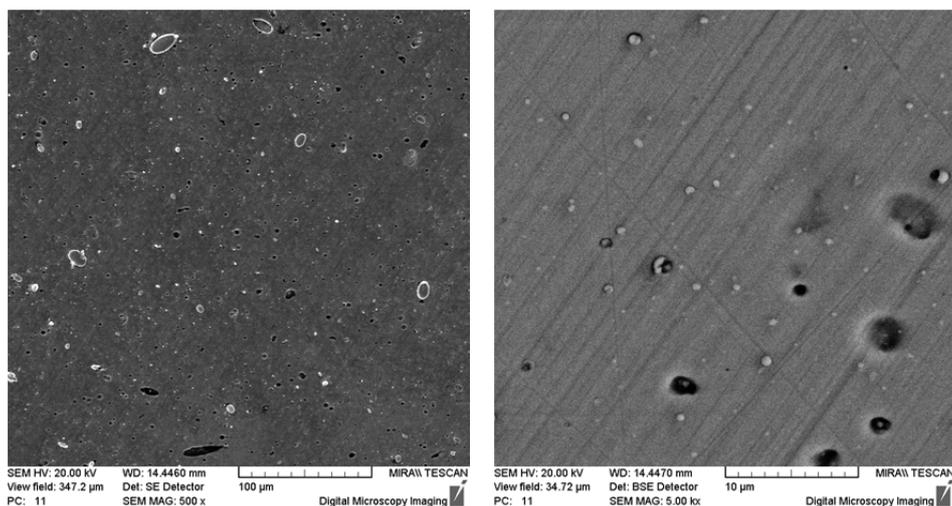


Рисунок 1 – Морфология покрытий ZrCN, сформированных методом PCVD

При химическом осаждении покрытий ZrCN наблюдается формирование плотной столбчатой структуры, типичной для покрытий, сформированных при низкой энергетической ионной бомбардировке. Покрытия формируются пористыми, с пустотами между волокнистыми, и напоминают структурные зоны 1 модели Торнтон (рисунок 2). Согласно зонной модели Мовчана– Демчишина–Торнтон, в структуре плазмохимических покрытий могут быть выделены четыре зоны, определяемые отношением температуры поверхности подложки  $T_s$  к температуре плавления испаряемого материала катода  $T_T$ : зона 1 ( $T_s/T_T < 0,3$ ), зона 2 ( $0,3 < T/T_T < 0,5$ ), зона 3 ( $T/T_T > 0,5$ ) и, зона Торнтон между зонами 1 и 2, переходная зона Т [2, 5].

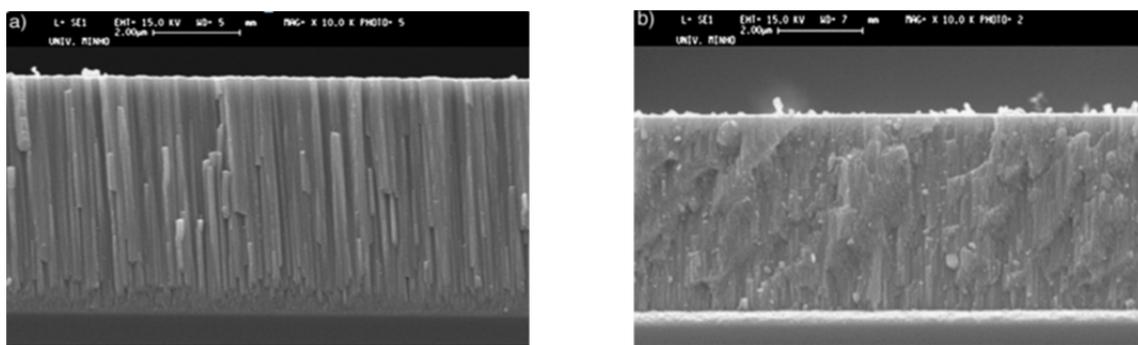


Рисунок 2 – Морфология покрытий ZrCN, сформированных методом CVD

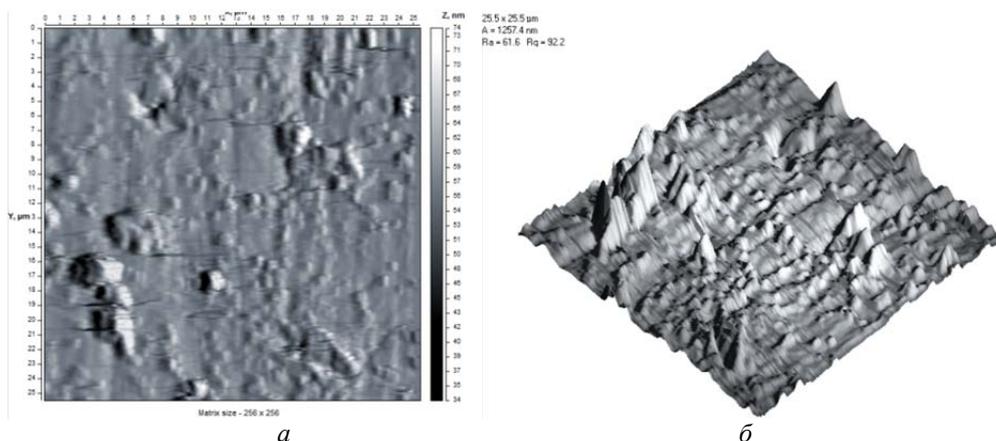


Рисунок 3– Морфология поверхностных слоев плазмохимических покрытий ZrCN: а) 2D–изображение; б) 3D–изображение. Площадь сканирования 25x25 мкм

Проведенные методом атомно–силовой микроскопии исследования подтверждают наличие пор и глобулярных включений в структуре покрытий ZrCN (рисунок 3).

В поверхностных слоях покрытия сформированы крупные глобулярные фрагменты с латеральным размером в плоскости ХУ порядка от 2 до 3 мкм и в направлении Z до 18 нм. Согласно данным, полученных методом профилометрии основная масса покрытия сосредоточена вблизи базовой линии. Отклонение вершин выступающих объектов над поверхностью от нормали минимально.

Значение фрактальной размерности изучаемых покрытий равно 2,33, что свидетельствует о сформированной достаточно развитой поверхности плазмохимических покрытий ZrCN (рисунок 4).

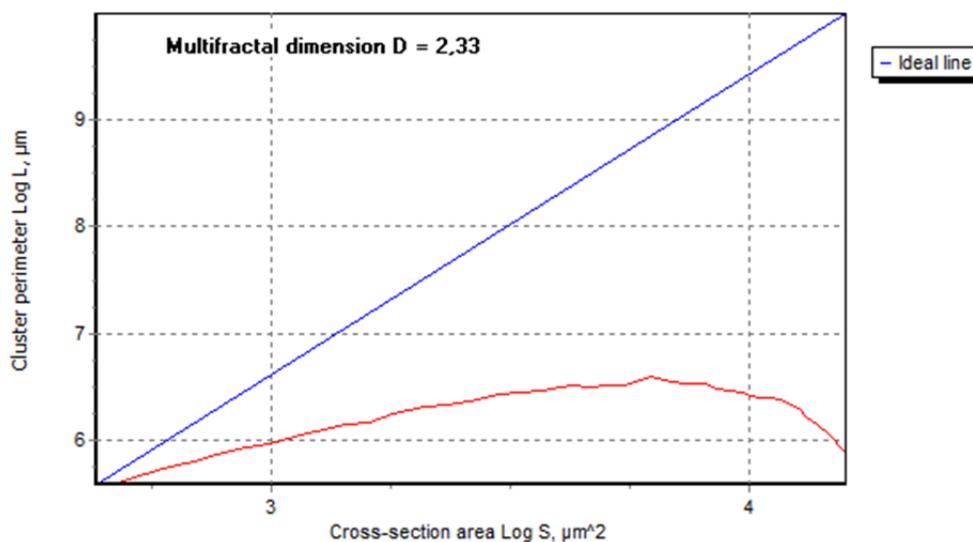


Рисунок 4 – Фрактальная размерность плазмохимического покрытия ZrCN

Формирование развитой морфологии покрытий должно сказываться на значениях поверхностной энергии.

Расчет значений поверхностной энергии проводили путем определения значений краевого угла смачивания полярной и неполярной жидкостями исследуемой поверхности.

В таблице 1 и 2 приведены значения энергетических характеристик поверхностных слоев алмазоподобных покрытий (АПП, DLC) и ZrCN. АПП покрытия характеризуются высокими прочностными и низкими адсорбционными характеристиками [21], что обусловлено строением данного соединения.

Таблица 1 – Значения энергетических характеристик поверхности покрытий ZrCN

Параметр	Значение
Угол смачивания вазелинового масла, град	31,00
Угол смачивания водой, град	77,00
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	55,72
Работа адгезии воды, мДж	89,42
Дисперсионный компонент поверхностной энергии	2,54
Полярный компонент поверхностной энергии	53,33
Поверхностная энергия, мДж/м <sup>2</sup>	55,87

Проведенные исследования методом ИК–спектроскопии НПВО алмазоподобных покрытий показали, что полосы поглощения, лежащие в области 950–1300 см<sup>-1</sup>, можно отнести к валентным колебаниям С–Н групп [3]. Полосы поглощения, лежащие в области 2200–3000 см<sup>-1</sup>, состоят из пиков валентных колебаний карбонильных групп, одинарных С–С, и двойных С=С связей и деформационных колебаний С–Н–групп. При этом наблюдались пики в

области  $2100\text{ см}^{-1}$ ,  $1000\text{ см}^{-1}$ , отвечающие валентным колебаниям  $\text{C}\equiv\text{C}$ -связей [3]. В работе [3] было установлено, что в спектрах МНПВО покрытий D1  $\text{a-C:H}$ , синтезированных из разных углеводородов – октана, толуола и циклогексана, не наблюдается каких-либо существенных различий. Они подобны спектрам  $\text{a-C:H}$  пленок с  $n \geq 2.0$ , полученных с применением ацетилен.

Таблица 2 – Значения энергетических характеристик поверхности алмазоподобных покрытий

Параметр	Значение
Угол смачивания вазелинового масла, град	37,00
Угол смачивания водой, град	69,00
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	53,96
Работа адгезии воды, мДж	99,16
Дисперсионный компонент поверхностной энергии	10,27
Полярный компонент поверхностной энергии	81,71
Поверхностная энергия, мДж/м <sup>2</sup>	91,98

Согласно полученных данных покрытия на базе циркония характеризуются более низкой поверхностной энергией, что будет свидетельствовать о низком адгезионном взаимодействии покрытия с контактирующими материалами. Таким образом, возможно создание многослойных покрытий сочетающих высокую твердость и низкую адсорбционную активность. Проведен анализ известных методов нанесения тонкослойных покрытий в вакууме и аналитического описания межфазных процессов, протекающих при взаимодействии конденсированных сред.

Формирование на поверхности субстрата тонкослойных покрытий на базе алмазоподобных соединений и интерметаллидов приводит к уменьшению значений поверхностной энергии, что может свидетельствовать об уменьшении адгезионного взаимодействия на поверхности композиционного покрытия. Наличие низкоразмерных фаз структуре покрытия усиливает упорядочивающее действие подложки на процессы ориентации, протекающие при формировании тонкослойных функциональных слоев. Полученные результаты были использованы для нанесения упрочняющих жаростойких покрытий на основе  $\text{ZrCN-DLC}$  на партии металлообрабатывающего инструмента и технологической литейной оснастки, которые проходят испытания в производственных условиях (ОАО «Белкард», ЗАО «СИПР с ОП»).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wear behavior of DC unbalanced magnetron sputter deposited ZrCN films / S.H. Yao [et al.] // Mater. Lett. – 2005. – Vol. 59. – Iss. 26. – p.p. 3230 – 3233.
2. Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings / S. Kudapa [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 1999. – Vol. 120–121. – p.p. 259 – 264.
3. Grigore, E. Zirconium carbonitride films deposited by combined magnetron sputtering and ion implantation (CMSII) / E. Grigore, C. Ruset, X. Li, H. Dong. // Surf. Coat. Technol. – 2010. – Vol. 204, Iss. 12–13. – p.p. 1889 – 1892.
4. Characterization of Zr-based hard coatings for medical implant applications / M. Balaceanu [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2010. – Vol. 204, Iss. 12–13. – p.p. 2046 – 2050.
5. Rie, K.-T. Plasma-CVD of TiCN and ZrCN films on light metals / K.-T. Rie, J. Wöhle. // Surf. Coat. Technol. – 1999. – Vol. 112. – p.p. 226 – 229.
6. Gu, Jian-De Investigation of the corrosion resistance of ZrCN hard coatings fabricated by advanced controlled arc plasma deposition / Jian-De Gu, Pei-Li Chen. // Surf. Coat. Technol. – 2006. – Vol. 200. – Iss. 10. – p.p. 3341 – 3346.
7. Larijani, M.M. The effect of carbon fraction in Zr(C, N) films on the nano-structural properties and hardness / M.M. Larijani, M.B. Zanjanbar, A. Majdabadi // J. Alloys Compd. – 2010. – Vol. 492. – Iss. 1–2. – p.p. 735 – 738.
8. Recent progress in the superhard nanocrystalline composites: towards their industrialization and understanding of the origin of the superhardness / S. Vepřek [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 1998. – Vol. 108–109. – p.p. 138 – 147.

9. Musil, J. Hard nanocomposite Zr–Y–N coatings, correlation between hardness and structure / J. Musil, H. Poláková, // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 127, Iss. 1. – p.p. 99–106.
10. Microstructure, mechanical properties and cutting performance of superhard (Ti,Si,Al)N nanocomposite films grown by d.c. reactive magnetron sputtering / S. Carvalho [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177–178. – p.p. 459–468.
11. Field, S.K. Tribological properties of graphite-like and diamond-like carbon coatings / S.K. Field, M. Jarratt, D.G. Teer. // Tribol. Int. – 2004. – Vol. 37, Iss. 11–12. – p.p. 949–956.
12. Zehnder, T. Nanocomposite TiC/a–C:H hard coatings deposited by reactive PVD / T. Zehnder, J. Patscheider // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 133–134. – p.p. 138–144.
13. Structure–property relations of arc–evaporated Al–Cr–Si–N coatings / J. Soldán [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2008. – Vol. 202. – Iss. 15. – p.p. 3555–3562.
14. Structural and microtribological studies of Ti–C–N based nanocomposite coatings prepared by reactive sputtering / D. Martínez–Martínez [et al.] // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 472. – Iss. 1–2. – p.p. 64–70.
15. Growth, microstructure, and mechanical properties of arc evaporated TiC<sub>x</sub>N<sub>1–x</sub> (0 ≤ x ≤ 1) films / L. Karlsson [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 126, Iss. 1. – pp. 1–14.
16. Bull, S.J. Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 1: coating architecture and hardness modelling / S.J. Bull, D.G. Bhat, M.H. Staia. // Surf. Coat. Technol. – 2003. – Vol. 163–164. – p.p. 499–506.
17. Bull, S.J. Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: tribological performance/ S.J. Bull, D.G. Bhat, M.H. Staia. // Surf. Coat. Technol. – 2003. – Vol. 163–164. – p.p. 507–514.
18. Polcar, T. The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures / T. Polcar, R. Novák, P. Široký. // Wear. – 2006. – Vol. 260. – Iss. 1–2. – p.p. 40–49.
19. Formation mechanisms of low–friction tribo–layers on arc–evaporated TiC<sub>1–x</sub>N<sub>x</sub> hard coatings / M. Rebelo de Figueiredo [et al.] // Wear. – 2008. – Vol. 265. – Iss. 3–4. – p.p. 525–532.
20. Properties of arc plasma deposited TiCN/ZrCN superlattice coatings / M. Balaceanu [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – Iss. 1–4. p.p. 1084–1087.
21. Овчинников, Е.В. Структурно–морфологические трансформации алмазоподобных покрытий, подвергнутых энергетическому воздействию / Е.В. Овчинников [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2014. – № 9. – С. 58–65.

**Авраменко Владимир Александрович**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г.Гродно  
студент 6–курса факультета инновационных технологий машиностроения  
E–mail: ovchin\_1967@mail.ru

**Флейта Александр Владимирович**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г.Гродно  
студент 6–курса факультета инновационных технологий машиностроения

**Акула Игорь Петрович**  
ГУ «Физико–технический институт НАН Беларуси», г.Минск  
кандидат технических наук, ст. научный сотрудник  
E–mail: pec@bas-net.by

**Овчинников Евгений Витальевич**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г.Гродно  
кандидат технических наук, зам. декана факультета инновационных технологий  
E–mail: ovchin\_1967@mail.ru

**Эйсымонт Евгения Ивановна**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г.Гродно  
магистр  
E–mail: gffh@mail.ru

**Чекан Николай Михайлович**  
ГУ «Физико–технический институт НАН Беларуси», г.Минск  
Кандидат физико–математических наук, зав. лабораторией  
E–mail: pec@bas-net.by

V.A. AVRAMENKO, A.V. FLEYTA, Ye.I. EYSYMONT,  
I.P. AKULA, N.M. CHEKAN, Ye.V. OVCHINNIKOV

## NANOCRYSTALLINE COMPOSITE COATINGS BASED CARBONITRIDE REFRACTORY METALS AND DLC ENGINEERING AND TECHNICAL PURPOSE

*The structure and morphology of the multilayer composite coatings based on zirconium carbonitride under different conditions of formation of the coating. The energy state of the surface layers of coatings based on ZrCN. Calculated surface energy coatings developed on the basis of the obtained results of research on the processes of wetting.*

**Keywords:** cover, surface energy, morphology, structure, properties.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Wear behavior of DC unbalanced magnetron sputter deposited ZrCN films / S.H. Yao [et al.] // Mater. Lett. – 2005. – Vol. 59. – Iss. 26. – p.p. 3230 – 3233.
2. Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings / S. Kudapa [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 1999. – Vol. 120–121. – p.p. 259 – 264.
3. Grigore, E. Zirconium carbonitride films deposited by combined magnetron sputtering and ion implantation (CMSII) / E. Grigore, C. Ruset, X. Li, H. Dong. // Surf. Coat. Technol. – 2010. – Vol. 204, Iss. 12–13. – p.p. 1889 – 1892.
4. Characterization of Zr-based hard coatings for medical implant applications / M. Balaceanu [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2010. – Vol. 204, Iss. 12–13. – p.p. 2046 – 2050.
5. Rie, K.–T. Plasma–CVD of TiCN and ZrCN films on light metals / K.–T. Rie, J. Wöhle. // Surf. Coat. Technol. – 1999. – Vol. 112. – p.p. 226 – 229.
6. Gu, Jian–De Investigation of the corrosion resistance of ZrCN hard coatings fabricated by advanced controlled arc plasma deposition / Jian–De Gu, Pei–Li Chen. // Surf. Coat. Technol. – 2006. – Vol. 200. – Iss. 10. – p.p. 3341 – 3346.
7. Larijani, M.M. The effect of carbon fraction in Zr(C, N) films on the nano–structural properties and hardness / M.M. Larijani, M.B. Zanjbar, A. Majdabadi // J. Alloys Compd. – 2010. – Vol. 492. – Iss. 1–2. – p.p. 735 – 738.
8. Recent progress in the superhard nanocrystalline composites: towards their industrialization and understanding of the origin of the superhardness / S. Vepřek [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 1998. – Vol. 108–109. – p.p. 138 – 147.
9. Musil, J. Hard nanocomposite Zr–Y–N coatings, correlation between hardness and structure / J. Musil, H. Poláková, // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 127, Iss. 1. – p.p. 99– 106.
10. Microstructure, mechanical properties and cutting performance of superhard (Ti,Si,Al)N nanocomposite films grown by d.c. reactive magnetron sputtering / S. Carvalho [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 177–178. – p.p. 459 – 468.
11. Field, S.K. Tribological properties of graphite–like and diamond–like carbon coatings / S.K. Field, M. Jarrett, D.G. Teer. // Tribol. Int. – 2004. – Vol. 37, Iss. 11–12. – p.p. 949 – 956.
12. Zehnder, T. Nanocomposite TiC/a–C:H hard coatings deposited by reactive PVD / T. Zehnder, J. Patscheider // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 133–134. – p.p. 138 – 144.
13. Structure–property relations of arc–evaporated Al–Cr–Si–N coatings / J. Soldán [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2008. – Vol. 202. – Iss. 15. – p.p. 3555 – 3562.
14. Structural and microtribological studies of Ti–C–N based nanocomposite coatings prepared by reactive sputtering / D. Martínez–Martínez [et al.] // Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 472. – Iss. 1–2. – p.p. 64 – 70.
15. Growth, microstructure, and mechanical properties of arc evaporated Ti<sub>x</sub>N<sub>1–x</sub> (0≤x≤1) films / L. Karlsson [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2000. – Vol. 126, Iss. 1. – pp. 1–14.
16. Bull, S.J. Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 1: coating architecture and hardness modelling / S.J. Bull, D.G. Bhat, M.H. Staia. // Surf. Coat. Technol. – 2003. – Vol. 163–164. – p.p. 499– 506.
17. Bull, S.J. Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: tribological performance/ S.J. Bull, D.G. Bhat, M.H. Staia. // Surf. Coat. Technol. – 2003. – Vol. 163–164. – p.p. 507–514.
18. Polcar, T. The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures / T. Polcar, R. Novák, P. Široký. // Wear. – 2006. – Vol. 260. – Iss. 1–2. – p.p. 40–49.
19. Formation mechanisms of low–friction tribo–layers on arc–evaporated TiC<sub>1–x</sub>N<sub>x</sub> hard coatings / M. Rebelo de Figueiredo [et al.] // Wear. – 2008. – Vol. 265. – Iss. 3–4. – p.p. 525–532.
20. Properties of arc plasma deposited TiCN/ZrCN superlattice coatings / M. Balaceanu [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – Iss. 1–4. p.p. 1084 – 1087.
21. Ovchinnikov, Ye.V. Strukturno–morfologicheskiye transformatsiialmazopodobnykh pokrytiy, podvergnutykh energeticheskomu vozdeystviyu / Ye.V. Ovchinnikov [i dr.] // Poverkhnost. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya. – 2014. – № 9. – S. 58–65.

**Avramenko Vladimir Aleksandovich**  
 EE «Grodno State University. Yanka Kupala» Grodno  
 6–course student of the Faculty of Engineering of innovative technologies  
 E–mail: ovchin\_1967@mail.ru

**Fleita Alexander Vladimirovich**  
 EE «Grodno State University. Yanka Kupala» Grodno  
 6–course student of the Faculty of Engineering of innovative technologies

**Akula Igor Petrovich**  
 GU «Physico–Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus», Minsk  
 Ph.D., senior Researcher  
 E–mail: pec@bas–net.by

**Auchynnikau Yauheni Vitalievich**  
 UO «Grodno State University. Yanka Kupala» Grodno  
 Ph.D., deputy. Dean of the Faculty of innovative technologies  
 E–mail: ovshin\_1967@mail.ru

**Eisymont Evgenia Ivanovna**  
 UO «Grodno State University. Yanka Kupala» Grodno  
 master  
 E–mail: gffh@mail.ru

**Chekan Nikolai Mikhailovich**  
 GU «Physico – Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus», Minsk  
 Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head. laboratory  
 E–mail: pec@bas–net.by

Г.В. ЗИБРОВ, В.Н. СТАРОВ, Е.В. СМОЛЕНЦЕВ, А.В. ПОПОВ

## ВАРИАНТЫ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ И ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ГЕНЕРИРОВАНИЕ НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

*В работе рассмотрены принципы формирования вариантов проектных решений и выбора оптимальных направлений, обеспечивающих генерирование новых технических решений с учетом многокритериальной оценки альтернатив*

**Ключевые слова:** проектные решения, технологическая наследственность, комбинированные методы, акустико–эмиссионные критерии разрушения.

Для формирования вариантов проектных решений, не имеющих аналогов, используют разные принципы. При отсутствии готовых проектных решений часто используется направление проектирования известное как синтез технологий. Это наименее формализованный элемент процесса проектирования, который трудно поддается автоматизации с помощью ЭВМ. Основная доля работ выполняется проектировщиком и существенно зависит от его опыта, уровня теоретической подготовки, профессионального кругозора, владения эвристическими методиками и приемами [1, 2].

Общепризнано, что благодаря эффектам взаимовлияния парциальных процессов при реализации новых процессов формируется особый физико–химический механизм воздействия на объект обработки, отличающийся от механизмов составляющих парциальных воздействий и позволяющий в связи с этим получить новые высокие технологические результаты. Имеются в виду применение комбинированных методов обработки (КМО) [3] с учетом предыстории проектирования, создания и эксплуатации по линии технологической наследственности объекта [4], а также неразрушающие методы диагностики с использованием акустико–эмиссионных критериев разрушения на основе инвариантов (АЭКИ), которые оценивают прочностные характеристики конструкций и систем с учётом степени опасности дефектов вне зависимости от их формы, размеров и предыстории эксплуатации [5–8].

Важным направлением развития комбинированных методов размерной обработки является интенсификация процесса разрушения материала путем реализации в рабочей зоне процессов иной природы. Считается [7], что проблема интенсификации отдельных методов размерной обработки решается тремя путями:

- введением в рабочую зону дополнительных энергетических потоков и создание в ней взаимодействия различных физических полей;
- структурной оптимизацией КМО;
- параметрической оптимизацией парциальных процессов.

Первый из указанных путей является наиболее эффективным и перспективным, так как он позволяет находить и использовать новые физико–технологические эффекты и разрабатывать нетрадиционные технологии на их основе.

Наибольшее развитие в теоретическом отношении получили работы, связанные с интенсификацией процесса резания, как базового в формообразовании. Принято, что задача интенсификации в этом случае может быть сформулирована, как процедура улучшения показателя обрабатываемости ( $\Pi_{об}$ ), определяемого набором технологических параметров вида, представленных в виде матрицы вида:

$$\Pi_{об} = \begin{vmatrix} P_{xyz} & W & V \\ \Delta & R_i & U \\ K_{им} & K_{вд} & \theta \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где  $P_{xyz}$ – вектор силовых воздействий, Н;  
 $W$ – удельная энергоемкость, Дж/м;  
 $V$ – скорость формообразования, м/с;  
 $\Delta$  – показатель точности обработки, мкм;

$R_i$  – показатели топологии генерируемой поверхности, мкм;

$U$  – скорость износа инструмента, мкм/с;

$K_{им}$  – коэффициент, учитывающий физико–химическое взаимодействие инструмента и обрабатываемого материала;

$K_{уд}$  – коэффициент, характеризующий условия протекания процесса (например, удаления шлама);

$\theta$  – установившаяся температура в зоне обработки, °С.

Сравнение методов обработки по приведенному выше показателю осуществляется дифференциальным методом с использованием весовых коэффициентов, учитывающих следующие направления.

1. Направление проектирования технологических объектов, связанное с генерированием новых не имеющих аналогов технических решений, т.е. новое техническое решение (НТР), имеет присущие ему свойства, в первую очередь, такие.

2. Новое техническое решение отражает достигнутый на момент проектирования технологий наивысший уровень знаний в данной предметной области, включая фундаментальные знания, ориентированные на новый качественный уровень технологий.

3. Новое техническое решение должно обеспечивать заданное функциональное преобразование объекта производства безотносительно к эффективности этого преобразования. Такому уровню отвечает управление технологической наследственностью объекта на этапах его жизненного цикла. Поэтому на данном этапе формируют множество принципиально возможных технологий, а задачу выбора наилучшего варианта осуществляют на последующих этапах, начиная с совершенствования проектирования.

4. Новое техническое решение наряду с эволюционным совершенствованием существующих технологий может привести к скачкообразному повышению уровня достигаемого с их применением качества. Например, применение излучения оптического квантового генератора резко продвинуло вперед технологии неразрушающего контроля и дефектоскопии.

5. Создаваемые посредством новых технологий объекты обладают особой структурой, т.е. имеют иное, чем традиционные, внутри устройство, у этих технологических объектов также иная иерархичность, этим технологиям присуща многомерность описания.

Различные технологические объекты обладают разной структурой на основе особых ресурсов – элементов, их свойств и отношений, поэтому процесс проектирования во многих случаях целесообразно разделять на два этапа. Один из них связан со структурным проектированием, второй – с нахождением параметров элементов структуры, т. е. внутренних параметров.

При поиске технологического маршрута процесса определяют перечень операций и правила их упорядочивания, отношения между ними. Проектируя операции, находят перечень и взаимосвязи технологических модулей. Это задачи структурного проектирования. Определение параметров операций в первом случае и переходов во втором это задачи параметрического проектирования. Предложенное выделение перечисленных этапов упрощает синтез технологий и облегчает решение задач оптимизации проектных решений.

Имеющуюся иерархичность технологических объектов обуславливает иерархичность задач синтеза. Существует закономерность: чем выше уровень проектирования, тем меньше множество вариантов решения и тем выше влияние качества решения на конечный результат.

Такая многомерность описания технологии выражается в разработке методик и относительно независимом подходе к решению перечисленных ниже задач синтеза.

Первое, это синтез методов обработки (СМО<sub>Б</sub>), который заключается в нахождении такой совокупности процессов физической, химической или иной природы, совместное протекание которых обеспечивает заданное изменение состояния объекта технологического воздействия. В основе СМО<sub>Б</sub> лежит некоторый физико– или химико–технический эффект (т.е. ФТЭ или ХТЭ), описывающий результат протекания соответствующих процессов. Понятия методы обработки (МО<sub>Б</sub>) и ФТЭ часто выступают в качестве синонимов, хотя первое из них, как правило, в большей степени объектно–ориентировано.

При разработке методов обработки, пользуются банком ФТЭ и ХТЭ, реализуя тем самым процедуру выбора готового решения. Для синтеза МО<sub>Б</sub> предложены методики и алго-

ритмы, базирующиеся на комбинаторике физически и химически совместимых между собой процессов. Они имеют следующие особенности.

1. Синтез способов обработки (СО<sub>Б</sub>), основанных на данном МО<sub>Б</sub>, заключается в нахождении такой совокупности приемов, правил, ограничений, которая делает возможным достижение технологического результата или повышает эффективность последнего. Для идентификации СО<sub>Б</sub>, как отдельного элемента соответствующего множества, часто используют понятие отличительного признака, характеризующего индивидуальность структуры способов обработки, а именно: перечень приемов, отношений, свойств и т.д. Синтез МО<sub>Б</sub> и СО<sub>Б</sub>, тесно связан с патентно-правовой защитой новых инженерных решений, что является важным аспектом технической политики нашего государства, т. к. изобретательская деятельность сыграла важную роль в разработке эффективных методик и алгоритмов поиска НТР.

2. Синтез технологий, являющийся целенаправленной совокупностью синтезов способов обработки, новой диагностики, а в итоге – получения требуемого качества изделия.

3. Синтез средств технологического оснащения представляет собой проектную задачу создания технических объектов (конструкций), которая несколько отличается от задач технологического проектирования. Однако, в исходных данных формируемых технологами, уже используются результаты проектирования, направленного на решения разнообразных технологических задач.

Во всех случаях поиск НТР рассмотренных задачах синтеза и их модификациях подчиняется следующей общей последовательности (методике):

- первоначально выделяются элементы структуры объекта, их свойства и отношения;
- затем обосновывается, выбирается и строится модель. Чаще всего это математическая модель объекта, например, с использованием аппарата теории множеств или математической логики. Хотя на ранних стадиях разработки модель из-за трудностей формализации проектной задачи может носить также описательный характер;
- далее формируется множество возможных вариантов объектов (структур) проектирования, то есть таких сочетаний элементов, их свойств и отношений, которые обеспечивают функцию объекта и удовлетворяют наложенным условиям и ограничениям.

Описанная методика не вызывает особых затруднений, может быть формализована и выполнена с помощью ЭВМ. Однако, при достаточно большом числе элементов с учетом их сложности, например, конструкции силовых агрегатов авиационных или ракетных двигателей, количество возможных комбинаций столь велико, что путь перебора окажется бесперспективным даже при использовании совершенных ПЭВМ.

Однако, до сих пор не решены или не полностью решены задачи формализации комплекса условий, правил и ограничений, регламентирующих подготовку производства и технологию производства изделия. Поэтому необходимостью является привлечение более рациональных стратегий поиска новых решений. Такие стратегии, как правило, основываются на эвристических приемах (ЭП). Для того чтобы механизм реализации, например, физических воздействий был эффективен, требуется, чтобы после синтеза технических решений и дальнейших процедур была проведена последующая оптимизация.

На рассматриваемых этапах работы возникает проблема принятия решения, которая заключается в комбинировании формализованных и неформализованных процедур. При этом формальными приемами получают информацию, позволяющую некоторому лицу (или коллективному органу) принимать обоснованное решение. Можно также утверждать, что существует принципиальная неформализуемость некоторых проектных действий.

По мнению исследователей, процесс проектирования сложных технических систем, (силовые агрегаты, летательные аппараты, энергетические реакторы, специальные конструкции судов и подводных лодок и т.п.), никогда не сможет быть до конца формализован.

Работы, которые выполняются на указанном этапе, во многом имеют субъективный фактор в виде лица, принимающего решение (ЛПР) и лиц, ему помогающих (эксперты, консультанты). Назначение последних это структуризация тех либо иных аспектов проектного решения, создание качественных и количественных оценок, предпочтений в условиях недостаточной исходной информации. Отметим, что экспертным методом получают прогнозы

развития различных ситуаций, оценивают перспективность новых образцов техники и новых технологий.

Теперь уточним понятие неопределенности при принятии решения. Заметим, что в задачах технологического проектирования встречаются неопределенности двух типов: неопределенности целей и условий.

Пусть сформировано множество вариантов решения  $E$  и каждому варианту  $E_i$  принадлежащему  $E$ , соответствует некоторый результат  $e_i$ . Этот результат характеризует полезность, эффективность решения.

Если существует функциональная зависимость вида  $e_i = f_i(x)$ , где  $x$  – вектор, определяющий способ действий, идентифицирующий решение, то функцию  $f_i(x)$  называют функцией полезности или целевой функцией. Неопределенность условий заставляет принимать решения, когда целевые функции содержат неопределенный параметр  $a$ , т. е., заданы не совсем точно.

В зависимости от конкретных значений этого параметра для каждого варианта решения можно получить соответствующие результаты  $e_i = f_i(x, a_i)$ , представленные в виде матрицы решения, таблица 1.

Таблица 1 – Матрицы решения

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	...	$a_j$	...	$a_n$
$E_1$	$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	...	$e_{1j}$	...	$e_{1n}$
$E_2$	$E_{21}$	$e_{22}$	$e_{23}$	...	$e_{2j}$	...	$E_{2n}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$E_m$	$e_{m1}$	$E_{m2}$	$e_{m3}$	...	$e_{mj}$	...	$e_{mj}$

Неопределенность условий часто связана со случайным характером тех или иных событий, характеризующих проведение операций, и тогда неопределенный параметр  $a$  целевой функции можно интерпретировать, как вероятность наступления этих событий.

Иногда трудно предугадать характер влияния внешних условий на конечный результат и приходится просчитывать результаты решений при нескольких фиксированных значениях этих условий. Некоторая неопределенность целей в технологическом проектировании и производстве связана с неоднозначностью результата решения. Это выражается в том, что каждому решению ставится в соответствие не один  $e_i$ , а несколько результатов  $e_{ik}$  влияющих на выбор решения и выражающих оценку локальных целей  $Z_k$ .  $k = 1, 2, \dots, K$ .

Эффективность используемой технологии оценивается набором единичных показателей, формирующих соответствующий вектор показателя качества. Естественно возникает стремление разработчика представить результат проектирования таким вектором. Наличие векторного показателя эффективности технологии относит нашу задачу выбора проектного и технологического решения к классу задач многокритериальной оценки альтернатив. В теории рассматриваются некоторые наиболее употребительные способы решения таких задач [4], которые можно свести к следующему.

Прямой метод, основанный на скалярной свертке векторного показателя эффективности, то есть на задании функциональной зависимости между некоторым обобщенным критерием эффективности и единичными показателями с учетом важности (весомости) последних. Такая зависимость директивно задается ЛПР или экспертом без какого-либо теоретического обоснования и отражает их прошлый опыт в принятии подобных решений. Отсюда следует возможность разработки большого числа способов. Для этого лишь необходимо однозначно определить вид функциональной зависимости, ее параметры и вероятностные оценки ее составляющих при принятии решения в условиях неопределенности.

При технологическом проектировании используют также разновидности обсуждаемого метода, такие как:

– Аддитивная свертка векторного показателя, которая основана на замене  $K$  единичных показателей одним критерием вида:

$$e_j^c = \sum_{j=1}^K c_j e_{ij}; \sum_{j=1}^K c_j = 1, \quad (2)$$

где  $C_j$  – весомость  $j$ -го показателя эффективности.

При этом ранжирование показателей по значимости и назначению весовых коэффициентов производят эксперты. Выполняя скалярную свертку, необходимо помнить о том, что эти показатели могут оцениваться величинами разного порядка и иметь различную размерность. Это затруднение устраняют путем использования в формуле (2) относительных частных показателей (по отношению к базовым значениям, устанавливаемым для каждого показателя экспертами).

– Выделение главного критерия является простейшим приемом скалярной свертки для преодоления неопределенности целей. Он заключается в ранжировании  $K$  единичных показателей по значимости и выделении главного показателя  $e_g$ , который вносит наибольший вклад в достижение цели. Остальные показатели представляют в виде ограничений. Задача выбора формулируется, например, так:

$$e_0 = \max_i e_{ij}; \quad e_{ij} > [e_j] \quad i=1, \dots, m; j=1, \dots, n; j \neq g; \quad (3)$$

где  $[e_j]$  – допустимые значения  $j$ -го показателя эффективности.

– Введение нормативов и оценка отклонений от них. Пусть имеется система нормативных значений показателей  $e$ , заданных ЛПР. Тогда свертку производят по формуле:

$$e_i^c = \sum_{j=1}^K \left( \frac{e_j - e_j^H}{e_j^H} \right)^2. \quad (4)$$

Таким образом, получают скалярный критерий для каждого варианта решения. Дальнейший выбор наилучшего варианта по этому критерию не представляет затруднений.

Укажем, что все модификации прямого метода оценки альтернатив страдают общими недостатками, вытекающими из доминирующего характера субъективного фактора.

Метод порогов несравнимости основан на идее сужения множества альтернатив и базируется на отношениях предпочтения, эквивалентности и несравнимости при оценке альтернатив. Все показатели эффективности разбивают на группы. Внутри группы ухудшение одного показателя можно компенсировать улучшением другого. Показатели, относящиеся к разным группам, сравнению не подлежат.

Сужение множества возможных решений осуществляется попарным сравнением альтернатив. Если альтернатива  $A$  по каждой группе показателей имеет оценки не хуже чем  $B$ , а хотя бы по одной группе эти оценки лучше, то говорят, что  $A$  предпочтительнее  $B$  или  $A$  доминирует над  $B$ .

Если оценки этих альтернатив по всем группам показателей совпадают, то альтернативы эквивалентны. Если же  $A$  превосходит  $B$  по одним группам критериев, но уступает  $B$  по другим, то альтернативы признаются несравнимыми. Используя условие предпочтения, можно выделить в множестве  $E$  всех альтернатив подмножество  $E_n$ , состоящее из эквивалентных и несравнимых альтернатив, называемое ядром множества  $E$  или множеством Парето. Принцип Парето не выделяет единственное решение: он позволяет лишь сузить круг альтернатив, из которых надлежит сделать выбор. Однако, его использование дает возможность в ряде случаев многократно облегчить задачу.

Метод компенсаций, который основан на следующем компромиссе: допуская ухудшение решения по одному показателю, стремятся компенсировать потерю изменением другого. Так, например, показатели  $e_1, e_2, \dots, e_k$  ранжируют по значимости и находят вариант решения, соответствующий экстремальному значению показателя  $e_1$ , при произвольных значениях других показателей.

Если такое решение найдено ( $e_1 = e_1^*$ ), то ищут решение, доставляющее экстремум показателю  $e_2$  при произвольных  $e_3, e_4, \dots, e_k$  и  $e_1 = e_1^* - \Delta e_1$ , где  $\Delta e_1$  – допустимое ухудшение первого показателя.

Далее ситуация повторяется (назначая  $\Delta e_2$ , необходимо помнить об ограничении  $\Delta e_1$ ). Продолжая такие шаги, получают компромиссный вариант, выявляя попутно взаимосвязи показателей и иную информацию, необходимую ЛПР.

Таковы особенности поиска эффективных технологий и оценки их применения посредством единичных показателей, формирующих соответствующий вектор показателя

качества, наличие которого относит нашу задачу выбора проектного и технологического решения к классу задач многокритериальной оценки альтернатив.

На основании проведенного исследования можно говорить о том, что существующие механизмы реализации воздействий на создаваемый объект сложны и не поддаются простой формализации. Проведение синтеза и оптимизации качественно новых технических решений существуют пока только в виде общих рекомендаций и принципов. Они не обеспечивают проектировщикам однозначный выбор прогрессивных технологий и инструмента управления формированием сочетаний всевозможных воздействий для достижения предельных технологических показателей.

Мы указали лишь некоторые современные пути, а именно: применение комбинированных методов обработки, с учетом предыстории проектирования и обеспечением заданных качественных показателей создаваемых деталей и узлов; выбора оптимальных технологий подготовительных производств, а на их основе технологий создания последующей эксплуатации объекта с учетом факторов технологической наследственности, а также применение неразрушающих методов диагностики с использованием акустико-эмиссионных критериев разрушения на основе инвариантов, которые оценивают прочностные характеристики конструкций и систем с учётом степени опасности дефектов вне зависимости от их формы, размеров и предыстории эксплуатации на этапах жизненного цикла изделий. Подобный системный подход открывает пути к применению новых технологий в отечественном специальном машиностроении, обеспечивающем укрепление оборонного комплекса страны и вывод его на новый уровень.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, Б.И. Эвристические методы в технологии машиностроения: альбом типовых приемов: учебное пособие для вузов / Ю.С. Степанов, А.Е. Шукин, Б.И. Афанасьев. – М.: Машиностроение, 1996. – 128 с.
2. Методология инженерного поиска / С.И. Брусков, Г.А. Харламов, Ю.С. Степанов, А.С. Тарапанов. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2005. – 216 с.
3. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 2005 – 511 с.
4. Старов, В.Н. Моделирование процессов изменения работоспособности оборудования с учетом технологической наследственности. Монография / В.Н. Старов, М.Н. Краснова // Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 140 с.
5. Попов, А.В. Метод функциональных инвариантов в задачах оценки прочности на основе акустической эмиссии // Дефектоскопия, 2008. – № 2. – С. 23–27.
6. Попов, А.В. Методы определения эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций вооружения и военной техники на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов / А.В. Попов, В.Н. Старов, Д.Е. Барабаш, С.Ю. Жачкин // Вестник ВАИУ. – № 1 (15). – 2012. – С 28–36.
7. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина. – М.: Дрофа, 2002. – 656 с.
8. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

**Зибров Геннадий Васильевич**

Военный учебно-научный центр ВВС  
«Военно-воздушная академия имени профессора  
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
Доктор педагогических наук,  
начальник Военно-воздушной академии  
г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а  
Тел.: 8(473)2369018

**Старов Виталий Николаевич**

ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС Рос-  
сии  
Доктор технических наук, профессор  
394052. г. Воронеж ул. Краснознаменная, д. 231  
E-mail vigps\_onirio@mail.ru

**Смоленцев Евгений Владиславович**

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный техни-  
ческий университет»  
Доктор технических наук, профессор  
394026, г. Воронеж, Московский пр., д. 14  
Тел.: 8-4732348145  
E-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

**Попов Алексей Владимирович**

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А.  
Гагарина»  
Доктор технических наук, доцент  
г. Воронеж, ул. Краснознаменная, д. 153  
Тел.: 8(473)2369018

G.V. ZIBROV, V.N. STAROV, E.V. SMOLENTSEV, A.V. POPOV

## PROJECT ALTERNATIVES AND SELECTION OPTIMAL DIRECTION PROVIDING GENERATION OF NEW TECHNICAL SOLUTIONS

*The paper discusses the principles of Project Alternatives and selection of optimal directions to ensure the generation of new technical solutions based on multicriteria evaluation of alternatives*

**Keywords:** *design solutions, technological heredity object, combined treatment, acoustic emission.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Afanasyev, B.I. Evristicheskiye metody v tekhnologii mashinostroyeniya: albom tipovykh priyemov: uchebnoye posobiye dlya vuzov / YU.S. Stepanov, A.Ye. Shchukin, B.I. Afanasyev. – M.: Mashinostroyeniye, 1996. – 128 s.
2. Metodologiya inzhenerenogo poiska / S.I. Brusov, G.A. Kharlamov, YU.S. Stepanov, A.S. Tarapanov. – M.: Izd-vo «Mashinostroyeniye-1», 2005. – 216 s.
3. Smolentsev, Ye.V. Proyektirovaniye elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki / Ye.V. Smolentsev. – M.: Mashinostroyeniye, 2005 – 511 s.
4. Starov, V.N. Modelirovaniye protsessov izmeneniya rabotosposobnosti oborudovaniya s uchetom tekhnologicheskoy nasledstvennosti. Monografiya / V.N. Starov, M.N. Krasnova // Voronezh: GOU VPO «Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet», 2010. – 140 s.
5. Popov, A.V. Metod funktsionalnykh invariantov v zadachakh otsenki prochnosti na osnove akusticheskoy emissii // Defektoskopiya, 2008. – № 2. – S. 23–27.
6. Popov, A.V. Metody opredeleniya ekspluatatsionnoy prigodnosti silovykh elementov konstruktsiy vooruzheniya i voyennoy tekhniki na osnove invariantov akustiko–emissionnykh protsessov / A.V. Popov, V.N. Starov, D.Ye. Barabash, S.YU. Zhachkin // Vestnik VAIU. – № 1 (15). – 2012. – S 28–36.
7. Fiziko–khimicheskiye metody obrabotki v proizvodstve gazoturbinnnykh dvigateley / Pod red. B.P. Saushkina. – M.: Drofa, 2002. – 656 s.
8. Mikhaylov, A.N. Osnovy sinteza funktsionalno–oriyentirovannykh tekhnologiy mashinostroyeniya /A.N. Mikhaylov. –Donetsk: DonNTU, 2009. – 346 s.

#### **Zibrov Gennady Vasilievich**

Military training and scientific center of the air force  
Doctor of pedagogical Sciences  
Head of the air force Academy  
Voronezh, Starykh Bolshevikov str., 54  
Phone: 8(473)2369018

#### **Starov Vitaly Nikolaevich**

FGBOU VPO Voronezh Institute of of EMERCOM of  
Russia, Voronezh  
Doctor of technical Sciences, Professor  
394052 Voronezh, Krasnoznamennaya street, h. 231  
E-mail: vigps\_onirio@mail.ru

#### **Smolentsev Evgeny Vladislavovich**

Voronezh State Technical University, Voronezh  
Doctor of technical Sciences, Professor  
394026, Moscovskiy prospect, 14  
Phone 8–4732348145  
E-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

#### **Popov Alexey Vladimirovich**

Military training and scientific center of the air force, Vo-  
ronezh  
Doctor of technical Sciences, associate Professor  
Voronezh, Krasnoznamennaya street, h. 153  
Phone: 8(473)2369018

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУСКОЗАЩИТНОЙ МУФТЫ НА ВЕЛИЧИНУ ФРИКЦИОННОГО МОМЕНТА

*В статье представлены характеристики муфты в безразмерной форме, по которым можно проанализировать влияние радиуса профиля регулирующего диска, жесткости нажимной пружины, предварительного усилия поджатия нажимной пружины, числа и массы шаров на величину фрикционного момента.*

**Ключевые слова:** муфта, момент, технологическая машина.

Для анализа влияния различных параметров на работу пускозащитной муфты [1–9] удобно использовать её характеристику. Под характеристикой пускозащитной муфты будем понимать зависимость безразмерной величины коэффициента сцепления  $K_\phi$  от  $\chi$ . Коэффициент  $K_\phi$  – это отношение фрикционного момента, развиваемого муфтой, к максимальному фрикционному моменту при угловой скорости ведомой части, равной нулю ( $\omega_2 = 0$ ) и при угловой скорости ведущей части, равной номинальной скорости ротора электродвигателя ( $\omega_1 = \omega_n$ ). Величина  $K_\phi$  показывает, во сколько раз фрикционный момент при заданной угловой скорости  $\omega_2$  больше фрикционного момента при  $\omega_2 = 0$ . Коэффициент  $\chi$  – это относительная угловая скорость, которая определяется отношением  $\omega_2/\omega_n$ . Такие характеристики могут быть построены для каждого конкретного исполнения муфты. Максимальный фрикционный момент  $T_{\phi n}$  при  $\omega_2 = 0$  рассчитывается по формуле:

$$T_{\phi n} = 0,5\mu z_{\text{тр}} D_{\text{ср}} N_{\phi n} \quad (1)$$

Величина усилия на фрикционных поверхностях муфты в момент страгивания технологической машины с места определяется при  $\beta = \beta_k$  и  $y = y_k$  следующей зависимостью:

$$N_{\phi n} = 2T_{\text{сп}}/\mu z_{\text{тр}} D_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{сп}}$  – момент сил сопротивления рабочей машины в начале пуска;

$y_k$  и  $\beta_k$  – радиус расположения шаров и их угол контакта с регулирующим диском в момент касания фрикционных поверхностей.

Значение текущего фрикционного момента находится по формуле:

$$T_\phi = 0,5\mu z_{\text{тр}} D_{\text{ср}} N_\phi \quad (3)$$

С учётом выражений (4) для  $N_1$  и (5) для  $\beta$ :

$$\begin{cases} F_y \sin \beta - N_1 \cos \beta - F_1 \sin \beta - F_2 = 0, \\ N_2 - F_y \cos \beta - N_1 \sin \beta + F_1 \cos \beta = 0, \\ F_2 = F_1 = fN_1, \\ N_1 = 1,05(F_{n \min} + c_n \Delta_n), \\ N_\phi = N_1 - F_{\text{сmax}}, \\ F_y = z_{\text{ш}} m_{\text{ш}} [y_p + (R - r) \cos \beta] \omega_c^2, \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{z_{\text{ш}} m_{\text{ш}} y \sin \beta \left[ \frac{(\omega_1 + \omega_2) y + \omega_1 r \cos \beta}{2y + r \cos \beta} \right]^2}{\cos \beta + f \sin \beta + f} - 1,05[F_{n \min} + c_n (R - r)(\sin \beta_k - \sin \beta)] = 0, \quad (5)$$

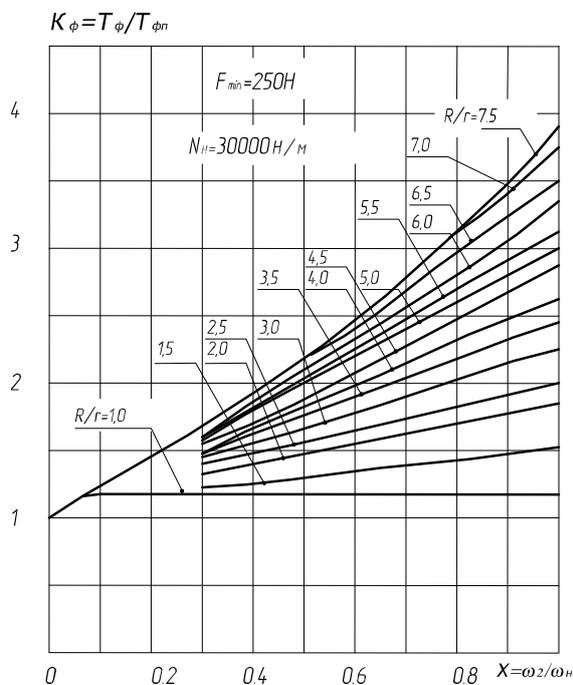
где  $F_{ц}$  – центробежная сила;  
 $\beta$  – угол контакта шара с регулирующим диском;  
 $N_1, N_2, F_1, F_2$  – нормальные реакции и силы трения в точках контакта шара с нажимным и регулирующим дисками;  
 $f$  – коэффициент трения;  
 $F_{нmin}$  – усилие предварительного сжатия нажимной пружины;  
 $c_n$  и  $\Delta_n$  – жесткость и перемещение нажимной пружины;  
 $N_{\phi}$  – усилие на фрикционных поверхностях;  
 $F_{вmax}$  – максимальная сила сжатия возвратной пружины;  
 $z_{ш}$  и  $m_{ш}$  – число и масса шаров;  
 $y_p$  – координата центра окружности радиуса  $R$ ;  
 $R$  – радиус профиля регулирующего диска;  
 $r$  – радиус шара;  
 $\omega_c$  – угловая скорость сепаратора.

При варьировании ряда параметров можно получить семейства таких характеристик, которые дают возможность проанализировать влияние этих параметров на величину фрикционного момента, характеризуемую значением коэффициента сцепления  $K_{\phi}$ . В качестве примера для одного из вариантов муфт на рисунках 1...4 показаны семейства таких характеристик. Эти кривые получены для одной из реализаций муфт при следующих исходных данных:

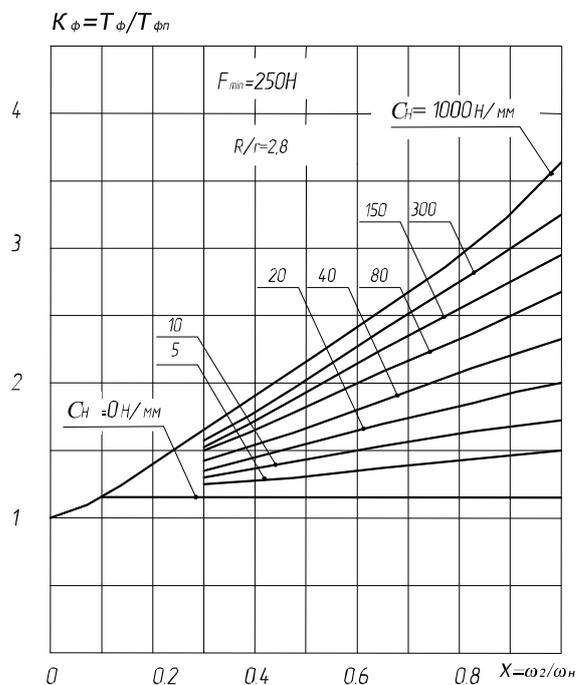
$$z_{ш} = 8, r = 0,014\text{м}, R = 0,038\text{м}, z_{тр} = 2, D_{ср} = 0,07\text{м}, \beta_0 = 75^\circ, \beta_k = 71^\circ,$$

$$\omega_n = 150 \text{ с}^{-1}, F_{вmax} = 24\text{Н}, F_{вmin} = 250\text{Н}, c_n = 30000\text{Н/м}, \mu = 0,25; f = 0,1.$$

На рисунке 1 приведены характеристики муфты при варьировании радиуса профиля регулирующего диска, на рисунке 2 – жесткости нажимной пружины, на рисунке 3 – предварительного усилия поджатия нажимной пружины, на рисунке 4 – числа и массы шаров.



**Рисунок 1 – Характеристика муфты при различных значениях отношения радиуса профиля регулирующего диска к радиусу шара**



**Рисунок 2 – Характеристика муфты при различных значениях жёсткости нажимной пружины**

Анализ полученных кривых позволяет сделать вывод о том, что с ростом предварительного усилия поджатия нажимной пружины, её жесткости, радиуса профиля регулирующего диска, массы и числа шаров возрастает величина фрикционного момента, передаваемого муфтой.

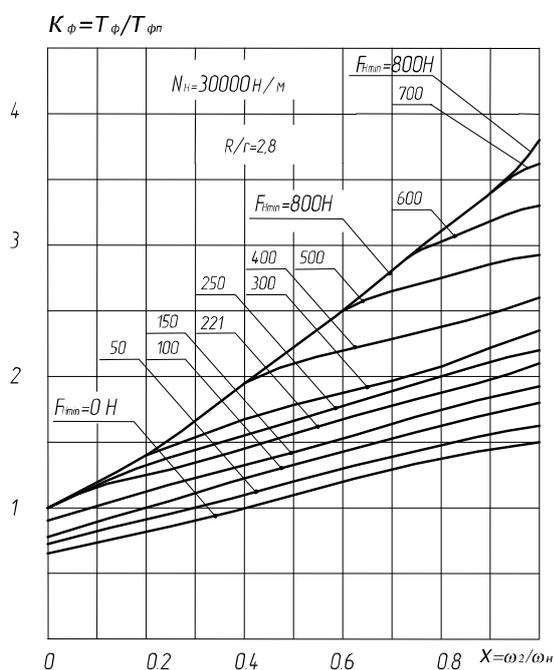


Рисунок 3 – Характеристика муфты при различных значениях предварительного усилия поджатия нажимной пружины

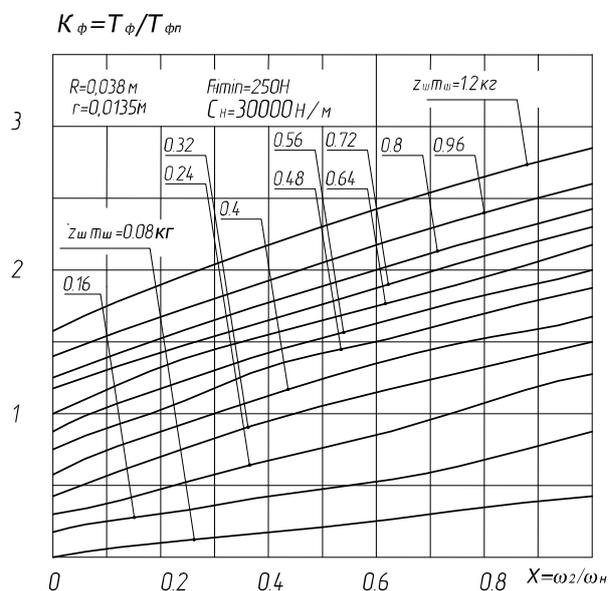


Рисунок 4 – Характеристика муфты при различных значениях числа и массы шаров

Характер этих кривых показывает, что с ростом угловой скорости ведомой полумуфты фрикционный момент во всех случаях увеличивается. Расчётным путём получено, что фрикционный момент будет постоянным при любой скорости ведомой части только при нулевой жёсткости нажимной пружины или при радиусе профиля регулирующего диска, равном радиусу шара.

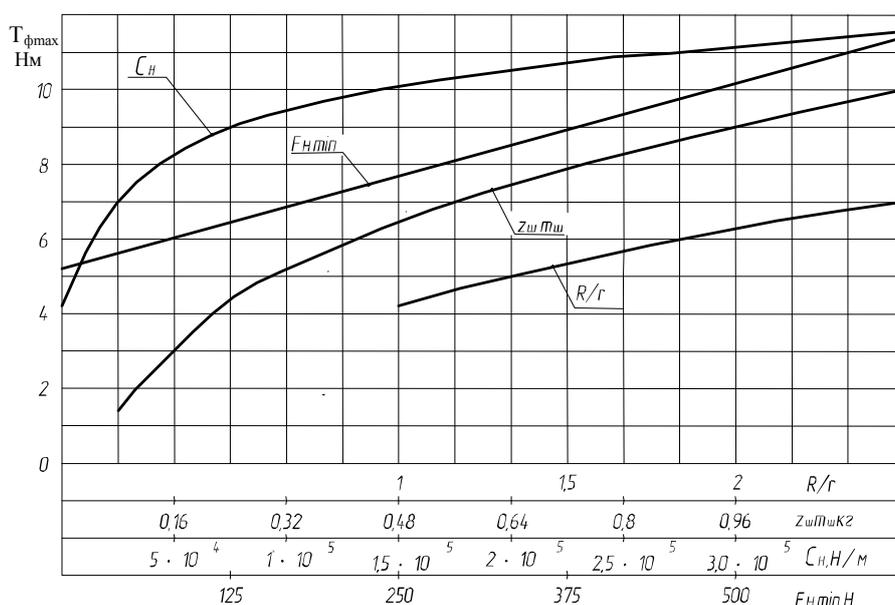


Рисунок 5 – Зависимость максимального фрикционного момента муфты от параметров

Путём варьирования параметров муфты ( $c_n$ ,  $F_{\text{нmin}}$ ,  $R$ ,  $z_{\text{ш}}$ ,  $m_{\text{ш}}$ ) можно изменять её характеристику в широких пределах и осуществлять выбор наиболее рациональной конструкции муфты для данной машины. Пользуясь семейством этих характеристик, можно получить зависимость максимального фрикционного момента от параметров муфты при  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_n$  (рисунок 5).

Все кривые, представленные на рисунке 5, имеют возрастающий вид. Зависимость максимального фрикционного момента от жёсткости нажимной пружины носит ярко выраженный нелинейный характер. При малых значениях жесткости пружины с увеличением последней максимальный фрикционный момент резко изменяется. При дальнейшем увеличении жёсткости влияние последней на величину момента является незначительным. Зависимость максимального фрикционного момента от общей массы шаров носит также нелинейный характер. Зависимости максимального фрикционного момента от предварительного усилия поджатия нажимной пружины и от радиуса профиля регулирующего диска представляют собой практически линейные функции. Качественно характер кривых будет аналогичен и для других типоразмеров муфт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев, Ю.С. Исследование машинного агрегата с фрикционной муфтой и центробежным механизмом включения / Ю.С. Корнеев. М.: Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1986. – № 4. – С. 31 – 35.
2. Корнеев, Ю.С. Метод расчёта и проектирования фрикционных муфт с центробежным механизмом включения. Дисс. ... канд. техн. наук. Л.: Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, 1987. – 125 с.
3. Вильнер, С.С. Теоретические и экспериментальные исследования процесса включения фрикционных муфт / С.С. Вильнер // Труды семинара по теории машин и механизмов: АН СССР. – 1950. – т. 9. – вып. 34.
4. Кирдяшев, Ю.Н. Экспериментально-теоретическое исследование процесса включения и коэффициентов трения дисковых муфт сцепления при повышенных скоростях скольжения: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1953. – 16 с.
5. Мосин, О.И. Исследование и установление основных параметров пусковых фрикционных муфт с гидравлическим замедляющим устройством для привода шахтных конвейеров: Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Караганда, 1968.
6. Поляков, В.С. Муфты. Конструкции и расчет / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш. – Л.: Машиностроение, 1973. – 336 с.
7. Поляков, В.С. Справочник по муфтам / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш, О.А. Ряховский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 344 с.
8. Редькина, Э.М. Исследование процесса включения однодисковых муфт: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1974. – 16 с.
9. Altman, F.G. Antriebs-elemente und mechanische Getriebe / F.G. Altman – VDI, В. 95, 1953, n. 19.

**Корнеев Юрий Степанович**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
Кандидат технических наук, доцент  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: 41–98–96

**Гордон Владимир Александрович**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: 41–98–48

**Корнеева Елена Николаевна**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел.: 41–98–48

**Корнеева Татьяна Юрьевна**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
Кандидат экономических наук,  
ст. преподаватель  
Тел.: 41–98–48

**Играшкина Наталия Александровна**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
Студентка гр. 31 – С  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29

Yu.S. KORNEEV, V.A. GORDON, E.N. KORNEEVA, N.A. IGRASHKINA, T. Yu. KORNEEVA

## THE INFLUENCE OF PARAMETERS OF START-PROTECTIVE CLUTCH ON THE SIZE OF THE FRICTIONAL MOMENT

*This article is devoted to the characteristics of the clutch in a dimensionless form, by means of which it is possible to analyse the influence of profile radius of the regulating disk, of the rigidity of a press spring, of the preliminary preload effort of a press spring, of the number and mass of spheres on the size of the frictional moment.*

**Keywords:** clutch, moment, technological machine.

### BIBLIOGRAPHY

1. Korneyev, Yu.S. Issledovaniye mashinnogo agregata s friktsionnoy muftoy i tsentrobezhnym mekhanizmom vklyucheniya / Yu.S. Korneyev. M.: Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye. – 1986. – № 4. – S. 31 – 35.
2. Korneyev, Yu.S. Metod raschota i proyektirovaniya friktsionnykh muft s tsentrobezhnym mekhanizmom vklyucheniya. Diss.... kand. tekhn. nauk. L.: Leningradskiy politekhnicheskii institut im. M.I. Kalinina, 1987. – 125 s.
3. Vilner, S.S. Teoreticheskiye i eksperimentalnyye issledovaniya protsessa vklyucheniya friktsionnykh muft / S.S. Vilner // Trudy seminarov po teorii mashin i mekhanizmov: AN SSSR. – 1950. – t. 9. – vyp. 34.
4. Kirdyashev, Yu.N. Eksperimentalno–teoreticheskoye issledovaniye protsessa vklyucheniya i koeffitsiyentov treniya diskovykh muft stsepleniya pri povyshennykh skorostyakh skolzheniya: Avtoref. dis. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. – L.: LPI, 1953. – 16 s.
5. Mosin, O.I. Issledovaniye i ustanovleniye osnovnykh parametrov puskovykh friktsionnykh muft s gidravlicheskim zamedlyayushchim ustroystvom dlya privoda shakhtnykh konveyerov: Avtoreferat dis. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. – Karaganda: 1968. – c.
6. Polyakov, V.S. Mufty. Konstruktsii i raschet / V.S. Polyakov, I.D. Barbash. – L.: Mashinostroyeniye, 1973. – 336 s.
7. Polyakov, V.S. Spravochnik po muftam / V.S. Polyakov, I.D. Barbash, O.A. Ryakhovskiy. – L.: Mashinostroyeniye, 1979. – 344 s.
8. Redkina, E.M. Issledovaniye protsessa vklyucheniya odnodiskovykh muft: Avtoref. dis. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. – L.: LPI, 1974. – 16 s.
9. Altman, F.G. Antriebs-elemente und mechanische Getriebe / F.G. Altman – VDI, B. 95, 1953, n. 19.

**Korneev Yuriy Stepanovich**

State University – ESPC  
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
302020, Orel, Naugorskoe Highway  
29  
Tel.: 41–98–96

**Gordon Vladimir Alexandrovich**

State University – ESPC  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of «Higher Mathematics»  
302020, Orel, Naugorskoe Highway  
29  
Tel.: 41–98–48

**Korneeva Elena Nikolaevna**

State University – ESPC  
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Tel.: 41–98–48

**Korneev Tatiana Yurievna**

State University – ESPC  
Candidate of Economic Sciences, Art. teacher  
Tel.: 41–98–48

**Igrashkina Natalia Aleksandrovna**

State University – ESPC, Orel  
Student gr. 31 – C  
302020, Orel, Naugorskoe Highway 29

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ БИМЕТАЛЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*В статье проведен анализ и сделаны выводы, что ускорение научно-технического прогресса требует внедрения ресурсосберегающих технологий, создания и освоения принципиально новых материалов и технологических процессов их получения.*

*К ряду перспективных относятся биметаллы и слоистые композиционные материалы (СКМ), представляющие собой композиции из разнородных металлов и сплавов, обладающих различными физико-механическими свойствами, что позволяет получать материалы с заданным комплексом свойств применительно к конкретным условиям эксплуатации.*

*Разработаны и созданы новые тепло- и электропроводящие слоистые композиционные материалы, способные воспринимать и передавать концентрированные протоки плазмы, электрической, тепловой и химической энергии.*

*Применение этих материалов в ряде производств позволило сократить до 80% потребление таких дефицитных и дорогостоящих материалов, как вольфрам, молибден, тантал, хром, титан, медь, снизить расход электрической и тепловой энергии, сократить трудовые затраты за счет увеличения надежности, долговечности и работоспособности деталей и изделий, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, усовершенствовать системы защиты окружающей среды.*

*Ключевые слова:* энергосбережение, слоистый композиционный материал, биметалл, сварка взрывом, ресурсосбережение.

Повышение конкурентоспособности в условиях бурного развития науки и техники является приоритетной задачей для любого предприятия. Обеспечению реализации данной задачи служит ряд факторов, среди которых снижение затрат на производство, повышение качества выпускаемой продукции, снижение ресурсоемкости и др. Над решением всех описанных задач работают многочисленные организации, постоянно появляются все более эффективные технологии и средства производства. В данной работе обобщены результаты многолетней работы в области создания слоистых конструкций из металлов и композиционных материалов. Применение данных технологий и материалов внесло значительный вклад в развитие ресурсосберегающих технологий.

Сварка взрывом слоистых композитов. Развитие современной науки и техники привело к открытию новых явлений и созданию ранее не известных технологических процессов, приборов и оборудования, в которых используются потоки энергии в сложной комбинации электромагнитных, температурных, силовых полей при воздействии глубокого вакуума и высоких давлений газа и жидкости, агрессивных сред и излучений.

Наиболее интенсивную температурную нагрузку испытывают материалы, работающие под воздействием потоков и сгустков высоко- и низкотемпературной плазмы, электронных и ионных лучей и далее в порядке убывания – лазерного излучения, потока ионизированного газа магнетогидродинамического генератора (МГД), расплавов металлов и шлаков в металлургии, ионно-плазменного излучения, токовых и тепловых нагрузок в электрохимии растворов и расплавов.

Таким образом, многочисленные традиционные и вновь создаваемые современные все более мощные источники потоков энергии требуют для их получения и эксплуатации принципиально новых проводящих электрическую, тепловую и механическую энергию материалов.

Одни металлы, используемые в технике, имеют высокую электро- и теплопроводность, что способствует диффузии и снижению температуры и концентрации тепловых полей и электрических зарядов точечных источников, другие металлы хорошо воспринимают удары плазменных, электронных пучков, электрических разрядов, лазерных лучей, так как энергия контактного взаимодействия (теплого, электрического, механического) может быстро отводиться от контактной зоны и рассеиваться. Эти свойства можно существенно изменять за счет создания композиционных материалов со значительно улучшенными параметрами: высокими прочностью и модулем упругости, малой чувствительностью к изменениям температуры или тепловым ударам, высокой электро- и теплопроводностью, хорошей воспроизводимостью свойств и технологичностью при конструировании, производстве, обработке давлением, соединении и окончательной механической обработке.

Согласно классификации композитов в соответствии с морфологией составляющих их фаз эти материалы разделяются на три категории: дисперсно-упрочненные и армированные

ультра- и нанодисперсными частицами, волокнистые и слоистые композиционные материалы (СКМ) [1].

Наиболее приемлемыми для широкого промышленного освоения в настоящее время являются композиционные материалы из металлических слоев (СКМ), которые имеют важные преимущества перед однокомпонентными при использовании в конструкциях различного назначения.

Слоистый композиционный материал состоит не менее чем из двух слоев разнородных металлов, прочно соединенных и сочетающих в себе несколько полезных свойств (биметалл), а в большинстве случаев из нескольких слоев, каждый из которых выполняет одну и более определенных функций.

Цель создания СКМ состоит в том, чтобы достичь комбинации свойств, не присущей исходным материалам, которые сами по себе не удовлетворяют всем предъявляемым к материалу требованиям по физическим, химическим, электрическим и магнитным свойствам.

Для изготовления СКМ применяют в основном деформационные процессы: горячее и холодное прессование, спекание, экструдирование и прокатку с промежуточными отжигами, диффузную сварку и сварку взрывом.

Сварка взрывом [2, 3], при которой в качестве источника энергии используют взрывчатые вещества для получения биметаллов и СКМ, обладает рядом преимуществ. Для любой операции обработки материалов необходимы помещение, оборудование, инструмент, источник энергии. Перевод технологического процесса на изготовление новой детали требует изготовления новой оснастки, замены инструмента, переналадки оборудования, то есть затрат времени и трудовых ресурсов. Операция сварки взрывом уникальна тем, что взрывчатое вещество является одновременно и источником энергии, и инструментом, и приспособлением и станком. Поэтому затрат времени на проектирование и изготовление оснастки, а также освоение операции практически не требуется. Это позволяет наладить гибкое производство, способное быстро переключаться с выпуска одного вида слоистого материала на другой, что особенно важно при выпуске малотоннажной продукции.

В процессе сварки продукты детонации создают давления порядка 1...10 ГПа, разгоняют прилегающий слой металла до скорости 500...1000 м/с, который при взаимодействии с неподвижным слоем вызывает контактные давления порядка 10 ГПа, и более, интенсивную пластическую деформацию и соединение контактирующих поверхностей.

Кратковременность процесса сварки, экстремально высокие давление и температуры позволяют сваривать металлы, обладающие контрастными свойствами, способные образовывать интерметаллидные соединения. Это еще одно из важнейших преимуществ сварки взрывом.

Теоретические и экспериментальные исследования явлений высокоскоростного контактного взаимодействия металлических слоев при получении биметаллов и СКМ сваркой взрывом позволили разработать программы расчета основных параметров технологического процесса – скорости полета, давления в контактной зоне как биметалла, так и многослойных композиций, причем техника расчета параметров процесса сварки взрывом доведена до инженерного уровня с возможностью выбора технологических параметров процесса непосредственно в производственных условиях.

Свойства слоистых композитов. Сложность строения композиционных материалов для работы в условиях многофакторного воздействия интенсивных потоков энергии привела к потребности разработки конструкции материала и оптимизации его свойств для каждого конкретного случая эксплуатационных условий. В общем случае свойства СКМ определяются по правилу сложения свойств составляющих в пропорции с их объемными частями (правило аддитивности) [4].

При создании и эксплуатации СКМ их физико-механические характеристики могут отличаться от расчетных, что обусловлено влиянием воздействия технологических процессов изготовления и эксплуатации на свойства компонентов композиции и структуры зон соединения, которые могут изменяться в определенных пределах.

Использование СКМ в промышленности. Широкий диапазон свойств СКМ обеспечивает их эффективное использование в самых разнообразных областях народного хозяйства.

Микроэлектроника. Важнейшие параметры изделий электронной техники зависят, прежде всего, от свойств используемых материалов и совершенства технологических процессов их изготовления.

Широкое распространение при производстве интегральных схем, фотошаблонов и других деталей микроэлектроники получили методы ионно-плазменного и магнетронного распыления металлов и осаждения на подложку в виде тонких слоев, выполняющих роль проводников, резисторов, индукционных и емкостных элементов. При распылении в процессе электрического разряда в атмосфере аргона рабочий материал является катодом. Ионы ар-

гона, соударяясь с твердой мишенью из распыляемого материала, выбивают атомы последнего, которые затем конденсируются на подложках и стенках камеры.

Использование магнитного поля увеличивает разряд и, таким образом, скорость распыления. При этом удельная мощность нагрузки на катод и мишень должна составлять 20...30 Вт/см<sup>2</sup>, что предъявляет жесткие требования к качеству соединения материала мишени и катода. Именно оно определяет равномерность распределения потенциала на поверхности мишени и скорость ее охлаждения. Новая конструкция катодного узла, основным элементом которой является биметалл медь–распыляемый материал, обеспечивает его надежную работу при потоках энергии до 100 Вт/см<sup>2</sup>. При этом площадь катода может составлять 3000 см<sup>2</sup> и более.

Композиционных мишени для установок ионно–плазменного напыления изготовлены из соединений слоя меди с такими металлами, как вольфрам, молибден, хром, тантал, ниобий, палладий, ванадий, титан, цирконий, алюминий, железо, никель, гафний и др. Изготовлены также многокомпонентные секционные и рельефные мишени типа ванадий–палладий–медь, вольфрам–титан–медь и железо–ванадий–цирконий–медь, применение которых в микроэлектронике позволило улучшить качество и долговечность изделий [5].

Металлы и сплавы обычно содержат различные сопутствующие элементы, посторонние примеси: включения, растворенные газы. Для рафинирования металлов часто применяется их переплав в условиях вакуума. Электронно–лучевой переплав обеспечивает наиболее полную и глубокую по сравнению со всеми остальными методами очистку материала от всех примесей и посторонних включений. Обработка поверхности заготовок, используемых в микроэлектронике биметаллических мишеней, электронным лучом обеспечивает высококачественную очистку металла, поскольку переплавляемый металл не соприкасается с посторонними материалами формы, тигля, кристаллизатора, дополнительные загрязнения не попадают на мишень.

Метод сварки взрывом позволяет получать не только прочные, но и вакуумно–плотные соединения, что дает возможность широко использовать его при изготовлении тиглей, кристаллизаторов и других деталей вакуумных установок.

Металлургия. В прогрессивных процессах металлургического производства, таких как плавка в жидкой ванне, плавка во взвешенном состоянии, непрерывная разливка металла, требуется применение деталей из материалов, способных работать при высоких температурах в условиях охлаждения (кессоны).

В настоящее время наиболее распространены медные литые кессоны с медным или стальным змеевиком для охлаждения и кессоны из медного проката толщиной 100 мм и более со сверленными отверстиями для охлаждения, которым присущи существенные недостатки.

Применение для конструкций кессонов биметалла позволяет использовать в качестве теплоотводящего слоя медный прокат толщиной до 30 мм, который не имеет литейных раковин, «залечивающихся» в процессе прокатки. Вынос водоохлаждающих каналов из медного теплоотводящего слоя обеспечивает снижение веса кессона за счет уменьшения толщины медного слоя. При этом срок службы изготовленных из биметалла кессонов по сравнению с традиционными литыми увеличивается в 4 раза. Применение биметалла обеспечивает стабильность теплофизических и высоких механических свойств плит в любом сечении: герметичности зон соединения меди и стали; отсутствие краевых дефектов по периметру; плотность сварных швов при соединении биметаллических плит с элементами, формирующими каналы охлаждения, а также работоспособность в условиях термоциклирования.

Основным способом получения таких металлов, как медь никель, цинк является электролиз растворов солей. Но в технологии имеются недостатки, связанные с оснащением непосредственно электролизных ванн: конструкции электродов и токоподводов не позволяют обеспечить равномерное распределение тока по всем ячейкам, вследствие чего снижаются производительность процесса и качество металла.

При осаждении меди и никеля используются катоды (матрицы) из титана или нержавеющей стали. В конструкции традиционных катодов медные токоведущие штанги крепятся к полотну матрицы медными заклепками или болтами. Различное электросопротивление контакта по заклепкам приводит к неравномерному распределению напряжения по полотну матрицы. Так как одновременно используется большое количество матриц, подключенных параллельно, то, если сопротивление одной матрицы увеличивается, она получает меньший ток, что приводит не только к низкой скорости осаждения металла на этой матрице, но и к увеличению токовых нагрузок на остальные матрицы. Это вызывает снижение выхода по току на остальных матрицах, дополнительный их разогрев, увеличение электросопротивления контактов и выход матриц из строя, снижение веса осажденного металла (до 30%), увеличение брака по тонкости осадка (до 20%), потери электроэнергии (до 6%).

Применение биметалла позволило разработать принципиально новую конструкцию матриц, в которой заклепочное соединение полотна с токоподводом заменено сварным. Между двумя симметричными биметаллическими токоподводами из медных токоведущих шин и приваренными к ним сваркой взрывом полосами нержавеющей стали (титана) размещено полотно матрицы из нержавеющей стали (титана), соединенное по периметру контакта аргонодуговой сваркой [6].

Электрический ток за счет полного физического контакта меди и нержавеющей стали (титана) в биметалле через сварные швы равномерно распределяется по ширине полотна матрицы, вследствие чего устраняется брак по тонкости осадка, и обеспечивается увеличение массы металла, снятого с ванн [6].

Цинк получают путем электролиза очищенного раствора сульфата цинка. В последние годы разрабатывается принципиально новая опытно–промышленная установка для электролиза цинка – биполярный электролизер, аналогичная широко применяемым при производстве хлора, водорода и др. Преимущества новой конструкции заключаются в том, что она позволяет коренным образом изменить условия труда при электролизе, механизировать съем осадка, утилизировать газы. В биполярном электролизере функции анода в ячейке выполняет свинцовый лист, обратная сторона которого плакирована титаном и используется как катод в соседней ячейке.

Количество электрохимических ячеек в ванне достигает 75 шт., а размер одного биелектрода – 1800х700 мм. В качестве материала катода выбран титан, который имеет высокую коррозионную стойкость и малую прочность сцепления с цинком при электролизе.

Несмотря на преимущества такой конструкции электролизера, его внедрение в производство было невозможно из–за отсутствия технологии получения биметалла титан–свинец. Использование биметалла титан–свинец для биполярных электродов в электролизе цинка позволило отказаться от массивных свинцовых анодов, легированных серебром, увеличить выход продукции на тех же производственных площадях.

В процессах электролиза и рафинирования алюминия из расплавов значительную статью затрат составляет электроэнергия, поэтому организация ресурсосберегающей технологии, в первую очередь, должна обеспечивать снижение ее потерь. Наличие большого числа контактных соединений разнородных металлов в токоподводах (десятки тысяч узлов), эксплуатируемых при повышенной температуре, кроме прямых потерь вследствие нарушения контакта, обуславливает необходимость создания мощной контрольной и ремонтной служб для поддержания контактов в удовлетворительном состоянии и приводит к значительным эксплуатационным затратам.

Самым неблагоприятным с точки зрения затрат является контакт между алюминием и сталью в токоподводах электролизеров, работающих в непосредственной близости с расплавом электролита. Температура контактного узла достигает при этом 350°С при значительных токовых, а также механических нагрузках. В таких условиях биметалл алюминий–сталь теряет прочность в течение 2–3 суток вследствие образования на поверхности соединения хрупкой интерметаллидной прослойки.

С учетом перечисленных требований была разработана конструкция теплопрочного слоистого композиционного материала сталь–азотированная сталь–алюминий–алюминий и технология его изготовления. Использование биметаллического переходника позволило соединить стальной стержень и алюминиевую шину обычной дуговой сваркой и ликвидировать разъемные контакты. На биметаллических переходниках из термостабильного биметалла работают корпуса алюминия высокой чистоты на Красноярском и Братском алюминиевых заводах, значительная часть анододержателей Таджикского алюминиевого завода [6].

Перевод одного корпуса рафинирования алюминия на новую конструкцию катододержателей снижает в 3 раза затраты на ремонт, позволяет ежегодно экономить десятки тонн меди и графита, уменьшить на 70% потери электроэнергии в контакте.

Химическое производство. Переход на безртутные методы производства соды и хлора связан с охраной окружающей среды. В настоящее время из производства полностью исключают ртутный метод, он заменяется мембранным. По новой мембранной технологии чистую каустическую соду получают без применения токсичной и дефицитной ртути в специальных устройствах, где основным узлом является биполярный электродный элемент, выполненный из слоистого биметаллического листа титан–сталь или из листов стали и титана, соединенных между собой дуговой сваркой через переходники из биметалла титан–сталь.

Технология сварки взрывом позволила изготовить для мембранных электролизеров листы биметалла титан–сталь в широком диапазоне толщин и размеров в плане.

Машиностроение. В изделиях, предназначенных для работы в условиях трения, широко используется бронза и латунь. Но эти материалы достаточно дороги из-за содержания в них олова и свинца.

Значительная экономия бронзы и латуни на таких деталях, как направляющие пресов, подшипники скольжения больших диаметров, возможна за счет применения биметалла сталь–латунь, сталь–бронза, полученного сваркой взрывом. Такой биметалл характеризуется хорошими антифрикционными свойствами, высокой прочностью и коррозионной стойкостью, он удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к сварным соединениям бронз со сталями, используемыми в парах трения: противостоит механическим нагрузкам и обладает высокой износостойкостью, прочностью соединения составляющих компонентов биметалла на отрыв не менее 250 МПа.

Высокие физико–механические свойства биметалла сталь–бронза сделали возможным его применение для изготовления таких сложных конструкций, как роторы аксиально–поршневых насосов высокого давления, что обеспечило упрощение конструкции ротора – она состоит из одной стальной детали с приваренным антифрикционным бронзовым слоем (ранее бронзовый диск крепился к ротору на шпильках). Упрочнение слоя бронзы в процессе сварки обеспечило повышение износостойкости, надежности ротора и увеличение рабочего давления насоса от 150 до 200 МПа.

При обработке резанием интенсивным механическим и тепловым воздействиям подвергается лезвие режущего инструмента и часть прилегающего инструментального материала. Поэтому замена части дефицитной дорогостоящей быстрорежущей стали на конструкционную в массивных режущих инструментах – протяжках, фасонных резцах, развертках – допустима с точки зрения работоспособности инструмента и целесообразна с позиции экономии высоколегированной стали. Расчет прочностных свойств режущего инструмента позволяет оптимизировать соотношение слоев быстрорежущей и конструкционной стали. Например, для плоской протяжки показана возможность применения в качестве несущего слоя стали 40Х, 45, 30, в некоторых случаях даже стали Ст3, а слой быстрорежущей стали использовать наполовину высоты зуба протяжки. Производственные испытания подтвердили высокую эксплуатационную надежность инструмента из биметалла, сваренного взрывом, кроме того, за счет упрочнения повысилась его долговечность при экономии до 90% дорогостоящей вольфрамсодержащей стали.

В сельхозмашиностроении, горнодобывающей промышленности и других отраслях множество деталей машин работает в условиях интенсивного износа – лемехи плугов, лапы и диски культиваторов, борон, молоточки молотильных аппаратов комбайнов, зубья ковшей экскаваторов.

Самозатачивающийся инструмент можно получить при использовании биметаллов с составляющими разной твердости в результате соединения специально подобранных сталей: Л53–Х6Ф1, Ст.2–сталь 60, Ст.3–65Г и др. Самозатачивание элементов почвообрабатывающих машин обеспечивается за счет различной интенсивности износа мягкого и твердого слоев и позволяет снизить эксплуатационные расходы на заточку и смену деталей, а также требуемое усилие и расход горючего при различных земляных работах [6].

Коррозионно–стойкие биметаллы. Защита металлов от коррозии – актуальная межотраслевая задача, одним из путей решения которой является изготовление биметаллов или слоистых материалов.

Коррозионно–стойкие биметаллы, приведенные в таблице 1 применяют в химическом и нефтяном машиностроении для изготовления емкостей, реакторов, сосудов высокого давления, испарителей (20К+10Х17Н13Р21), теплообменных аппаратов, конденсаторов, цилиндрических сосудов с несложными внутренними устройствами (Ст.3+12Х18Н10Т).

В химической промышленности при производстве соды для упарочных котлов и ряда аппаратов взамен стали стали 12Х18Н10Т используют биметаллы Ст.3–08Х17Т и Ст.3–15Х18Н10Т, что позволяет увеличить срок службы оборудования с двух до десяти лет. Оборудование из этих сталей за счет высоких эксплуатационных свойств и коррозионной стойкости может найти широкое применение в лесохимической промышленности в канифольно–терпентинном и экстракционном производстве, в производстве пищевой уксусной кислоты, этилбутилацетата и переработке древесных смол.

Применение на нефтеперерабатывающих предприятиях ректификационных колонн из биметалла сталь 20К+08Х13 вместо углеродистой стали обеспечивает высокую коррозионную стойкость аппаратов без применения специальных футеровок и увеличивает срок службы от двух до десяти лет. Несмотря на то, что ректификационная колонна из биметалла на 4–5% дороже, чем из углеродистой стали, сокращение эксплуатационных затрат обеспечивает существенный экономический эффект [6].

Таблица 1 – Сочетание сталей в коррозионно–стойких биметаллах

Марка стали плакирующего слоя	Марка стали основного слоя															
	ВСтЗсн	10	20К	22К	09Г2	09Г2С	16ГС	10ХСНД	10ХГСН1 Л	10ГН2МФ А	12МХ	12ХМ	12ХМ1	12Х18Н 10Т	12Х21Н 5Т	
08Х13	+		+		+	+	+									
08Х17Т	+		+													
15Х25Т	+		+													
08Х18Н10Т	+		+	+				+								
12Х18Н10Т	+		+		+	+	+	+	+				+			
Св.08Х19Н10Г2Б				+						+						
10Х17Н10М2Т	++		+													
10Х17Р13М3Т	+		+			+	+	+	+							
08Х17Н15М3Т	+		+				+	+	+							
06ХН28МДТ			+					+	+							
ХН65МВ			+						+							
Н70МФ			+						+							
ХН78Т	+		+						+							
Монель НМЖМц			+													
28–2,5–1,5	+															
Никель НП–2		+	+													
20К																

Знаком «+» отмечены сочетания сталей, выпускаемые промышленностью в виде биметаллов.

В целлюлозно–бумажной промышленности биметалл используется для изготовления варочных котлов, резервуаров для отходов, смесителей бумажной массы, корпусов и ванн сгустителей, резервуаров различных жидкостей, дисковых мельниц [6].

В судостроении коррозионно–стойкий биметалл применяется для изготовления различных деталей корпусных конструкций; в легкой и пищевой промышленности – для производства оборудования молочных заводов, резервуаров для брожения, емкостей перегонных установок, барабанных сушилок.

Когда коррозионная стойкость нержавеющей стали недостаточна, используют титан, тантал, платину, стоимость которых на порядки превышает стоимость стали. Поэтому использование биметаллов, которые содержат слой дефицитных дорогостоящих материалов, еще более экономически целесообразно.

Производство биметаллов иностранными фирмами. Практика освоения биметаллов как в России, так и за рубежом показала целесообразность их широкого внедрения.

Биметаллы позволяют существенно повысить эффективность производства широкого класса деталей и оборудования для предприятий химического, нефтяного, сельскохозяйственного, транспортного, энергетического и других отраслей машиностроения, приборостроения, радиоэлектроники, инструментального производства, атомной энергетики и космической техники, а также предприятий, производящих товары культурно–бытового и хозяйственного назначения.

Широкий круг применения биметаллов обусловил их производство в большинстве промышленно развитых стран. Сортамент их разнообразен как по видам и размерам, так и по сочетанию в них различных металлов. Ориентировочно мировое производство биметаллов разными методами составляет около 1 млн. тонн и имеет постоянную тенденцию к росту.

Наибольших успехов в производстве биметаллов добились США (фирмы Du Pont de Nemur, Lukene, Phoenix и др.), где в 1990 году было произведено свыше 250000 т.

Известно, что большие объемы биметаллов производит Япония (фирмы Asahi, Japan Steel Works, Mitsubishi и др.). В 1982 году суммарная площадь изделий, плакированных только сваркой взрывом (фирма Asahi), составила 16000 м<sup>2</sup> [7]. Производят и используют биметаллы такие страны, как Швеция, Великобритания, Индия, Франция. В основном они выпускают двухслойные коррозионно–стойкие стали на основе углеродистых, низколегированных сталей плакированием хромистыми, хромоникелевыми, хромоникельмолибденовыми и другими высоколегированными сталями [6].

Почти все перечисленные фирмы производят биметалл сваркой взрывом – наиболее надежным и экономичным способом производства биметалла. Например, шведская фирма

Nitro Nobel выпускает в год свыше 8000 тонн коррозионно–стойкого биметалла, предназначенного для дальнейшей прокатки.

В Бразилии построен участок сварки взрывом, позволяющий производить до 100 тыс. тонн биметалла в год. Основной сортament – коррозионно–стойкие материалы и трубные решетки, плакированные цветными металлами.

Большой объем разнообразных по своему назначению сваренных взрывом биметаллов – около 150000 т в год – производит фирма Du Pont de Nemur (США).

Значительные, но недостаточные в масштабах промышленного применения объемы слоистых материалов, в том числе и биметаллов, производят в СНГ. Только сваркой взрывом за последние годы изготовлено свыше 16000 т биметалла, около 4000 т закуплено (в изделиях) в дальнем зарубежье. И все же потребление биметалла в СНГ невелико по сравнению с общим объемом выпускаемого металла. Ежегодная возможная потребность биметалла более чем на порядок превосходит его производство. В последние годы развивается технология сварки взрывом металлов с нанокompозитами [8].

Технико–экономическая эффективность применения СКМ. Характерной особенностью новых видов СКМ, как и других наукоемких технологий, материалов, изделий, является многоплановость и многофакторность эффекта их использования в промышленности. Эффективность применения новых материалов обеспечивается за счет экономии дорогого дефицитного материала, электроэнергии, перераспределения параметров отдельных операций технологического процесса, повышающего скорость и выход годной продукции.

Особенно актуален в настоящее время экологический эффект, получающийся от вывода токсичных веществ (ртути, свинца) из установок, сокращения выбросов токсичных веществ, ионов тяжелых металлов, пыли в окружающую среду, снижения времени нахождения людей во вредных условиях.

Примером широких возможностей ресурсосберегающего эффекта от использования СКМ является их применение в технологии получения интегральных схем в качестве мишеней машин ионно–плазменного и магнетронного распыления.

Использование биметалла распыляемый слой – медная подложка в современной электронике вместо особо чистых и редких металлов, таких как никель, цирконий, хром, ванадий, ниобий, палладий, серебро, гафний, тантал, платина, обеспечивает достижение многофакторного эффекта. Во–первых, сокращается потребление дорогостоящих и дефицитных материалов до технически возможного предела за счет исключения технологических потерь. Во–вторых, замена операций пайки серебром на сварку взрывом исключает брак по причине некачественной пайки по всей поверхности соединения. В–третьих, за счет более эффективного теплоотвода повышается плотность потока бомбардирующих ионов аргона и увеличивается производительность установок и, самое главное, за счет предотвращения капельного распыления уменьшается размер единичного элемента гибридной интегральной схемы и достигается высокая плотность размещения элементов на квадратном сантиметре. Кроме того, значительно улучшается качество осаждаемых покрытий и выход годной продукции – интегральных схем, фотошаблонов и других элементов микроэлектроники.

Применение теплопроводящего биметалла медь – нержавеющая сталь в конструкциях водоохлаждаемых кессонов стенок печей и желобов для разлива шлака биметалла позволило использовать плиты из медного проката толщиной 30 мм вместо 90–миллиметровой литой. Прокатная плита имеет значительно более качественную структуру по сравнению с литой, что повышает прочностные и теплопроводящие свойства меди и обеспечивает увеличение долговечности и сокращение трудозатрат на ремонт медеплавильных агрегатов.

Экологический эффект от сокращения времени пребывания работников во вредных условиях повышенных температур и загазованной атмосферы в процессе эксплуатации желобов разлива шлаков получен благодаря способности биметалла в условиях неравномерного теплового потока обладать повышенной склонностью к короблению и самоочистке от хрупких пленок шлака.

Качество электропроводящей арматуры цехов электролиза жидкостей и расплавов при получении никеля, меди, цинка, хлора, алюминия, магния оказывает существенное влияние на весь производственный цикл. Внедрение новых видов биметаллических и многослойных проводниковых материалов способствует экономии электроэнергии, титана, меди, графита, серебра. Более существенный экономический эффект был получен за счет дополнительного выпуска на тех же площадях и на том же оборудовании меди, никеля, алюминия высокой чистоты. Достигнута условная экономия трудовых ресурсов за счет сокращения трудозатрат на ремонты – 2860 чел.

Экологический и социальный эффект использования СКМ в цветной металлургии получен за счет улучшения условий работы в гальванических цехах и сокращения пребывания персонала в зоне электролизных производств.

При электролизе хлора с использованием биметаллических биполярных электродов из технологического процесса исключено применение токсичной ртути, при электролизе цинка в биметалле титан–свинец значительно уменьшено содержание токсичного свинца.

При производстве печатных плат в радиоэлектронных отраслях промышленности образуются травильные растворы, содержащие ионы тяжелых металлов, в данном случае меди. Попадание этих растворов в окружающую среду вызывает необратимые последствия. Использование биметаллов в ваннах очистки промышленных сточных вод электролизом обеспечило повышение эффективности процессов.

В целом, среднегодовой эффект от внедрения 1 тонны композиционных материалов составляет около 400 млн. руб. в различных отраслях народного хозяйства.

Результаты внедрения новых материалов с высокопрочными высоколегированными компонентами, а также с аморфными и микрокристаллическими слоями в таких отраслях, как металлургия, электроника, приборостроение, позволяют сделать вывод о том, что они будут находить все более широкое применение в различных отраслях техники. Новые области их использования: авиация и космонавтика, судостроение, производство деталей других транспортных аппаратов.

Перспективным направлением в разработке и применении СКМ является получение деталей с несплошностями заданной конфигурации, по которым в дальнейшем производится формование каналов давлением жидкости при комнатной температуре или давлением газа при температурах, обеспечивающих течение металла в режиме сверхпластичности. По этому методу разрабатываются технологические процессы получения бесшовных конструкций кессонов водоохлаждаемых элементов металлургической печи. В авиации, космонавтике и транспортном машиностроении получают распространение конструкции слоистой пространственной конфигурации в виде двух листов с ячеисто–сотовой формой заполнителя.

Композиция на основе слоев титана с электропроводящими слоями диоксида марганца, кобальта, полученные с использованием импульсного нагружения, наряду с известными биметаллами и многослойными материалами найдут широкое применение в создании экологически чистых производств и охране окружающей среды от выбросов промышленных стоков гальванических производств, содержащих токсичные ионы тяжелых металлов.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Физическое металловедение. Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена, Москва, Металлургия, 1987. – Т. 2. – 623 с.
2. Пеев, А.П. Особенности сварки взрывом меди с одновременной ультразвуковой обработкой / А.П. Пеев, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, Е.В. Кузьмин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – Т. 6. – № 18(121). – С. 18–23.
3. Физика взрыва в 2 т. /Под ред. Л.П. Орленко, Москва: Физматлит, 2002. – Т. 1. – 832 с.
4. Сварка взрывом. Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2004. – № 1. – С. 57.
5. Оголихин, В.М. Разработка и получение композиционных материалов с определённой тепло- и электропроводностью сваркой взрывом / В.М. Оголихин, С.Д. Шемелин // Перспективные материалы. – 2007. – № 1. – С. 61–65.
6. Наумович, Н.В. Использование биметаллов в промышленности – эффективный путь экономии ресурсов / Н.В. Наумович, А.П. Корженевский, Р.В. Стефанович, Н.Ф. Клебанович. – Минск: БелНИИТИ, 1988. – 32 с.
7. Батаев, И.А. Формирование сваркой взрывом слоистых композиционных материалов из разнородных сталей / И.А. Батаев, Д.В. Павлюкова, Т.В. Журавина, Е.Б. Макарова, Д.С. Терентьев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 1. – С. 6–8.
8. Бондарь, М.П. Сварка взрывом металла с наноккомпозитом / М.П. Бондарь, Я.Л. Лукьянов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – № 14(101). – С. 91–98.

**Судник Лариса Владимировна**  
доктор технических наук, профессор, Директор НИИ «Импульсных процессов с опытным производством», Республика Беларусь  
E-mail: lsudnik@tut.by

**Петров Игорь Валентинович**  
начальник лаборатории НИИ «Импульсных процессов с опытным производством», Республика Беларусь  
E-mail: lab414@mail.ru

**Галиновский Андрей Леонидович**  
доктор технических наук, д.п.н., доцент, профессор кафедры Технологий ракетно–космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана  
E-mail: galcomputer@mail.ru

**Колпаков Владимир Иванович**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Технологий ракетно–космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана  
E-mail: kolpakov54@mail.ru

**Моисеев Валерий Александрович**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Технологий ракетно–космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана  
E-mail: Moiseev54@mail.ru

L.V. SUDNIK, I.V. PETROV, A.L. GALINOVSKY, V.I. KOLPAKOV, V.A. MOISEEV

## ADVANCED APPLICATIONS OF BIMETAL IN MECHANICAL ENGINEERING

*Acceleration of scientific and technical progress demands introduction of resource-saving technologies, creation and development of essentially new materials and technological processes of their receiving.*

*The bimetal and the layered composite materials (LCM) representing compositions from the diverse metals and alloys possessing various physicomaterial properties that allows to receive materials with the set complex of properties in relation to specific conditions of operation belong to a number of the perspective.*

*The new warm and electroconductive layered composite materials capable to perceive and transfer the concentrated channels of plasma, electric, thermal and chemical energy are developed and created.*

*Use of these materials in a number of productions allowed to reduce consumption of such scarce and expensive materials as tungsten, molybdenum, tantalum, chrome, the titan, copper to 80%, to cut a consumption of electric and thermal energy, to reduce labor expenses at the expense of increase in reliability, durability and operability of the details and products working in extreme service conditions to improve systems of environment protection.*

**Keywords:** energy saving, layered composite material, bimetal, welding by explosion, resource-saving.

### BIBLIOGRAPHY

1. Fizicheskoye metalovedeniye. Pod red. R.U. Kana, P. Khaazena, Moskva, Metallurgiya, 1987. – T. 2. – 623 s.
2. Peyev, A.P. Osobennosti svarki vzryvom medi s odnovremennoy ultrazvukovoy obrabotkoy / A.P. Peyev, S.V. Kuzmin, V.I. Lysak, Ye.V. Kuzmin // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – T. 6. – № 18(121). – S. 18–23.
3. Fizika vzryva v 2 t. /Pod red. L.P. Orlenko, Moskva: Fizmatlit, 2002. – T. 1. – 832 s.
4. Svarka vzryvom. Oborudovaniye i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa. – 2004. – № 1. – S. 57.
5. Ogolikhin, V.M. Razrabotka i polucheniye kompozitsionnykh materialov s opredelennoy teplo- i elektroprovodnostyu svarkoy vzryvom / V.M. Ogolikhin, S.D. Shemelin // Perspektivnyye materialy. – 2007. – № 1. – S. 61–65.
6. Naumovich, N.V. Ispolzovaniye bimetallov v promyshlennosti – effektivnyy put ekonomii resursov / N.V. Naumovich, A.P. Korzhenevskiy, R.V. Stefanovich, N.F. Klebanovich. – Minsk: BelNIINTI, 1988. – 32 s.
7. Batayev, I.A. Formirovaniye svarkoy vzryvom sloistyykh kompozitsionnykh materialov iz raznorodnykh staley / I.A. Batayev, D.V. Pavlyukova, T.V. Zhuravina, Ye.B. Makarova, D.S. Terentyev // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty). – 2010. – № 1. – S. 6–8.
8. Bondar, M.P. Svarka vzryvom metalla s nanokompozitom / M.P. Bondar, Ya.L. Lukyanov // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2012. – № 14(101). – S. 91–98.

#### **Sudnik Larisa Vladimirovna**

Dr.Sci.Tech., professor, the Director of scientific research institute «Pulse processes with pilot production», Republic of Belarus  
E-mail: lsudnik@tut.by

#### **Petrov Igor Valentinovich**

the chief of scientific research institute laboratory «Pulse processes with pilot production», Republic of Belarus  
E-mail: lab414@mail.ru

#### **Galinovsky Andrey Leonidovich**

Dr.Sci.Tech., dative of N, the associate professor, professor of chair of Technologies of space-rocket mechanical engineering of Bauman Moscow State Technical University  
E-mail: galcomputer@mail.ru

#### **Kolpakov Vladimir Ivanovich**

Dr.Sci.Tech., the associate professor, professor of chair of Technologies of space-rocket mechanical engineering of Bauman Moscow State Technical University  
E-mail: kolpakov54@mail.ru

#### **Moiseev Valeriy Aleksandrovich**

Cand.Tech.Sci., the associate professor Tekhnology of space-rocket mechanical engineering of Bauman Moscow State Technical University.  
E-mail: Moiseev54@mail.ru

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.9

Е.А. КУДРЯШОВ, И.М. СМИРНОВ

## **КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКТИВНО СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ КАК ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ЭТАП ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*Описаны конструктивные особенности поверхностей деталей машин с элементами прерыва, образующими в сочетании с поверхностями первого и второго порядка прерывистость резания.*

*Ключевые слова:* детали машин, поверхность первого и второго порядка, элементы прерыва, прерывистое резание.

Детали машиностроительного назначения имеют широкое разнообразие конструктивно и технологически сложных поверхностей, обработка которых требует длительной и трудоемкой технологической подготовки. Конструктивно сложные поверхности имеют ряд общих количественных и качественных характеристик, связанных с их образованием и обработкой. Это утверждение справедливо для технологий механической обработки различных типов: единичных, типовых и групповых. Различие технологий заключается в том, что в мелкосерийном производстве детали обрабатываются последовательно и при минимальном количестве операций, а в массовом производстве задача обработки заготовки решается параллельно при высоком уровне дифференциации технологического процесса на операции.

Большую роль в разработке технологического процесса механической обработки играет классификация, позволяющая выбрать оптимальную последовательность и рациональные методы обработки поверхностей, а также соответствующие им оборудование и режущий инструмент [1–10].

Цель классификации – свести многообразие форм поверхностей к сочетанию ограниченного числа элементов конструкции.

Основной задачей классификации является приведение всего многообразия заготовок, поверхностей и их сочетаний к минимальному количеству типов, для которых можно разработать типовые технологические процессы в нескольких вариантах, чтобы для обработки заготовки в целом, отдельной поверхности или сочетания элементарных поверхностей можно было выбрать рациональный процесс для данных условий производства.

Формы элементарных поверхностей по особенностям образования разделены на три группы: плоскости (поверхности первого порядка); цилиндры и конусы (поверхности второго порядка) и специфичные поверхности. В основном, в деталях машин находят применение поверхности первого и второго порядка, способы образования которых относительно просты. Однако подавляющее большинство деталей имеет конструктивно сложные поверхности. Образование сложных геометрических форм поверхностей связано с конструкцией деталей, необходимостью размещения на элементарных поверхностях первого и второго порядка разного рода второстепенных конструктивных элементов (отверстия, шлицы, пазы, лыски и др.), что создает определенные трудности при механической обработке. Это очень важное обстоятельство нашло отражение на схеме (рисунок 1), где конструктивно сложные поверх-

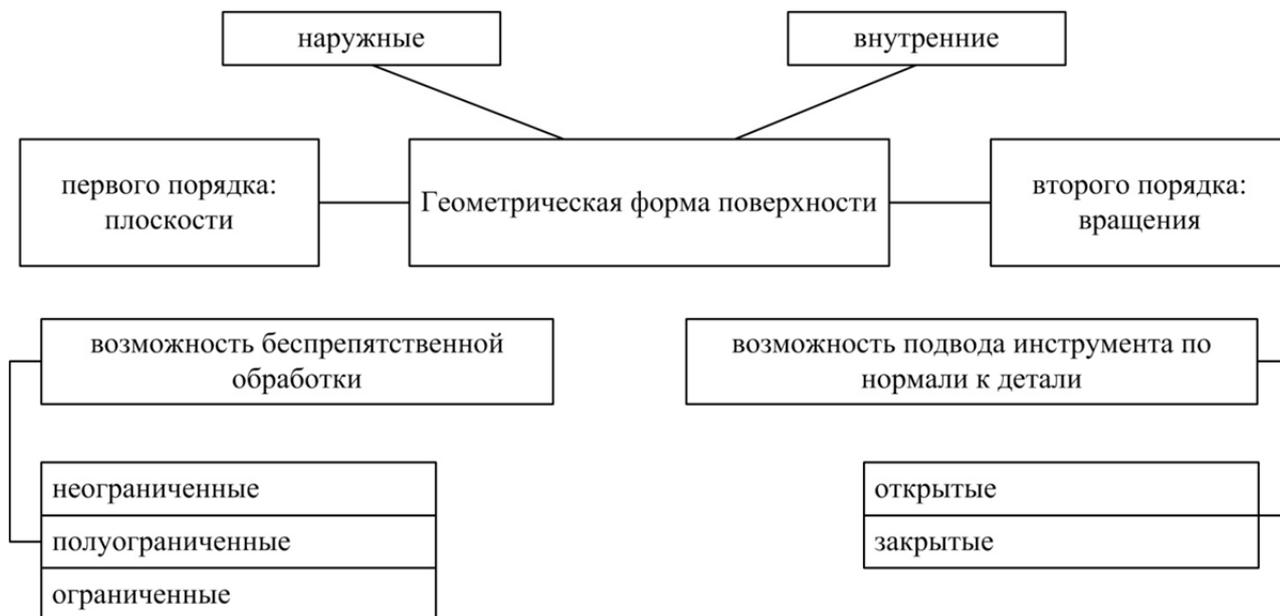
ности объединены в группу специфичных поверхностей, с необходимой дифференциацией по признакам прерывистости.



*Рисунок 1 – Классификация форм поверхностей деталей*

Классификация элементарных поверхностей и их сочетаний при наличии на поверхностях первого и второго порядка дополнительных вспомогательных конструктивных элементов усложняющих геометрическую форму деталей, производится по следующим признакам:

1 – по геометрической форме поверхности, рисунок 2.



*Рисунок 2 – Классификация по геометрической форме поверхности*

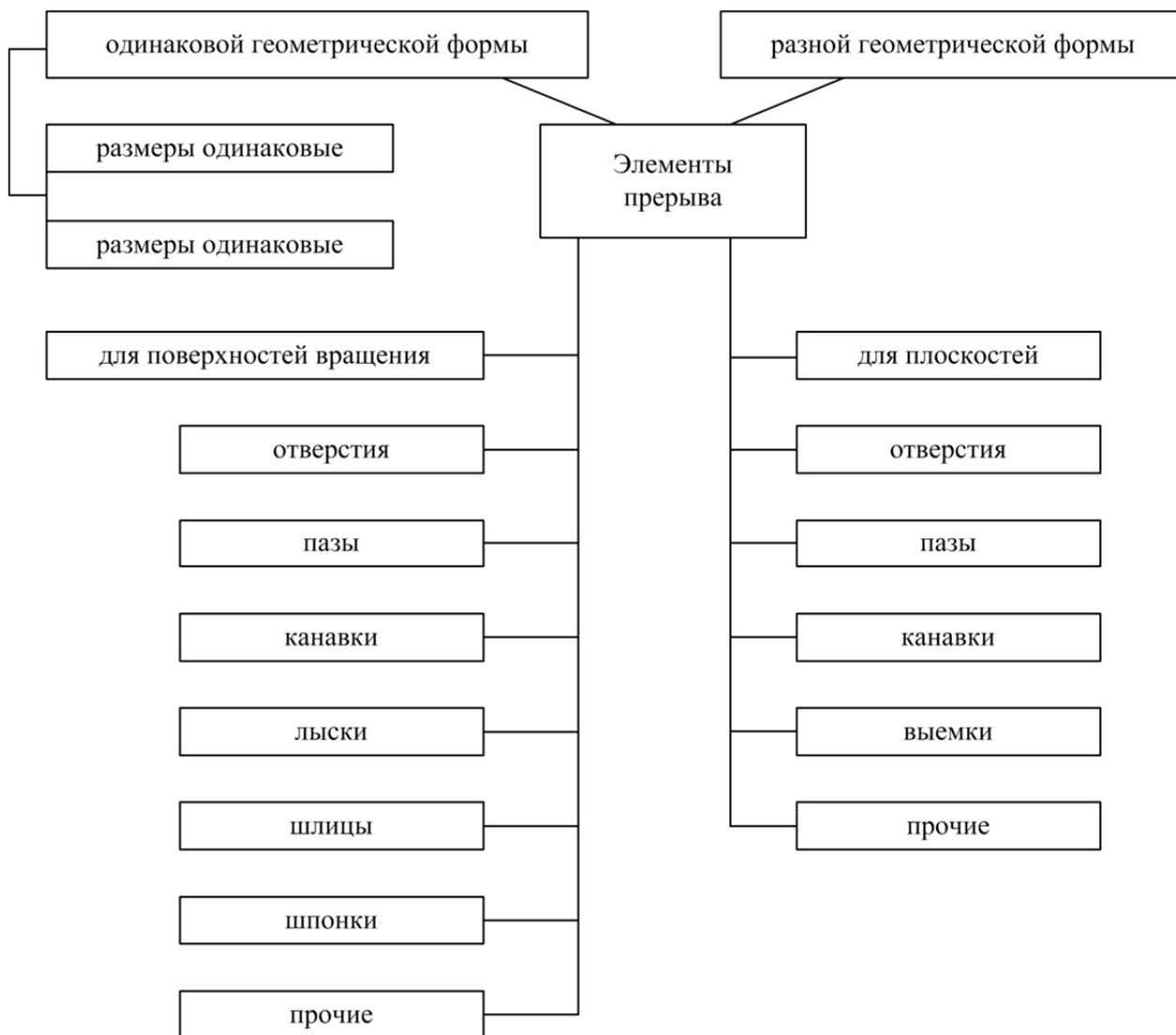
В зависимости от геометрических свойств образования поверхности подразделяются на наружные и внутренние, элементарные и конструктивно сложные.

Любая поверхность, ограничивающая деталь, может характеризоваться двумя признаками: 1) возможностью беспрепятственной обработки и 2) возможностью подвода инструмента по нормали к детали. По первому признаку поверхности подразделяются на неограниченные, полуограниченные и ограниченные. Поверхность является неограниченной, если ее можно обрабатывать беспрепятственно в любом направлении. Полуограниченную поверхность можно обрабатывать беспрепятственно в некоторых направлениях. Поверхность является ограниченной, если ее невозможно обрабатывать. По второму признаку следует различать открытые и закрытые поверхности. Открытой является поверхность, перпендикуляр к которой в любой точке не пересекает других поверхностей. В противном случае поверхность считается закрытой.

Наибольшими технологическими возможностями образования форм обладают открытые неограниченные поверхности;

2 – по геометрической форме элементов прерыва, рисунок 3.

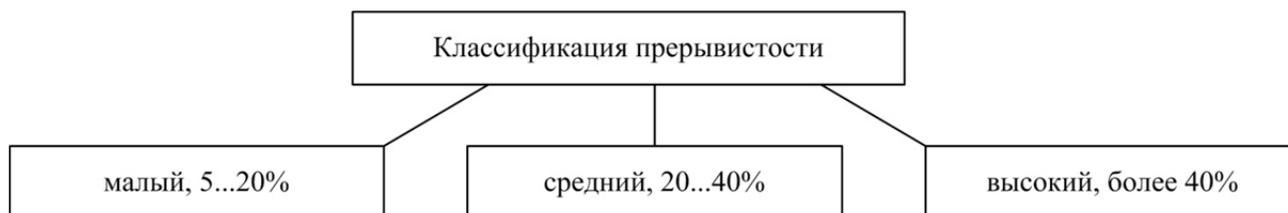
Как правило, большинство деталей имеют на обрабатываемых поверхностях дополнительные второстепенные конструктивные элементы: отверстия, пазы, канавки и прочие (плоскости), а также лыски, шлицы, шпонки и прочие (поверхности вращения).



*Рисунок 3 – Классификация по геометрической форме элементов прерыва*

Конструктивные элементы прерыва могут быть: одинаковой и разной геометрической формы, одинаковых и разных размеров;

3 – по коэффициенту прерывистости, рисунок 4.



*Рисунок 4 – Классификация по коэффициенту прерывистости*

Коэффициент прерывистости определяется отношением площади прерывистой поверхности к общей площади обрабатываемой поверхности детали. В зависимости от размера элементов прерыва (участка холостого пробега инструмента), величина коэффициента прерывистости может быть малой (до 20%), средней (20...40%), высокой (более 40%);

4 – по расположению элементов прерыва, рисунок 5.



*Рисунок 5 – Классификация по расположению элементов прерыва*

В зависимости от сочетания элементарных поверхностей с элементами прерыва, происходит конструктивное усложнение геометрической формы поверхностей деталей. Расположение элементов прерыва на элементарных поверхностях может происходить: а) относительно оси симметрии (симметрично, асимметрично, различно); б) относительно вектора формообразующего движения (параллельно, перпендикулярно, безразлично), причем расположение элементов может иметь хаотичный или изменяющийся характер, или следовать математическому закону; в) относительно подобных элементов (симметрично, асимметрично, различно);

5 – по условиям прерывания обрабатываемой поверхности, рисунок 6.

В зависимости от расположения элементов прерыва относительно элементарной поверхности первого и второго порядка, а также от кинематических особенностей метода механической обработки, образованные конструктивно сложные поверхности детали могут быть: а) постоянно прерывными, причем состояние прерывистости обработки может быть разовым за один оборот детали (н.п. шпоночный паз на цилиндрической поверхности детали), или «п» количество раз за один оборот детали (н.п. шлицевая поверхность детали); б) периодически прерывными (н.п. несколько элементов прерыва одной конфигурации и размеров на элементарной поверхности детали); в) комбинированными (н.п. несколько элементов

прерыва одной и разной конфигурации и размеров, расположенные систематически или различно по отношению друг к другу на элементарной поверхности детали).



*Рисунок 6 – Классификация по условиям прерывания обрабатываемой поверхности*

К достоинствам рассмотренной классификации относится возможность систематизации как элементарных, так и конструктивно сложных поверхностей не только по способам их образования, но и по дополнительным конструктивным элементам, создающим прерывистость резания при механической обработке.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов, Е.А. Технологический классификатор деталей и поверхностей, подлежащих обработке резанием / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2009. – №4. – С. 3–8.
2. Копылов, Ю.Р. Конструкторское и технологическое кодирование деталей в машиностроении / Ю.Р. Копылов, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. – 2009. – № 59. – С. 2–23.
3. Кудряшов, Е.А. Точение конструктивно–сложных поверхностей деталей инструментом из композита / Е.А. Кудряшов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – №2. – С. 50–55.
4. Смирнов, И.М. Повышение эффективности процессов механической обработки конструктивно сложных деталей машин / И.М. Смирнов. – М.: Изд–во Триумф, 2012.– 224 с.
5. Кудряшов, Е.А. К вопросу выбора рациональной марки и инструментального материала / Е.А. Кудряшов, И.М. Смирнов// *Методы. Системы. Технологии*. – Братск: БрГУ. – 2014. – №2 (22). – С.118–125.
6. Смирнов, И.М. Инструментальное обеспечение процессов механической обработки конструктивно сложных деталей машин / И.М. Смирнов. – М.: Изд–во Триумф, 2014.– 128 с.
7. Барсуков, Г.В. Моделирование микрорельефа абразивного инструмента и поверхности детали / Ю.С. Степанов, Е.А. Белкин, Г.В. Барсуков. – М.: Изд–во «Машиностроение–1», 2004. – 215 с.
8. Кудряшов, Е.А. Классификация деталей и поверхностей как предпосылка построения высокоэффективных технологий механической обработки / Е.А. Кудряшов, И.М. Смирнов // *Известия Юго–Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2014. – № 1. – С. 27–33.
9. Степанов, Ю.С. Развитие классификационных систем способов механической обработки / Ю.С. Степанов // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. – 2014. – № 3. – С. 21–24.
10. Кудряшов, Е.А. Поиск оптимальных решений при проектировании процессов механической обработки / Е.А. Кудряшов, И.М. Смирнов // *Системы. Методы. Технологии*. – Братск: БрГУ. – 2014. – №3 (23). – С. 94–98.

**Кудряшов Евгений Алексеевич**  
 38–ой научно–исследовательский инженерный институт, ОАО «НИИИ»  
 Государственная корпорация «Ростехнологии»,  
 г. Балашиха, Московская область  
 Доктор технических наук, профессор  
 Советник генерального директора  
 Телефон (факс): 8 (495) 524– 91– 50  
 E–mail: kea–swsu@list.ru

**Смирнов Игорь Михайлович**  
 38–ой научно–исследовательский инженерный институт, ОАО «НИИИ»,  
 Государственная корпорация «Ростехнологии»,  
 г. Балашиха, Московская область,  
 Кандидат технических наук, доцент,  
 Генеральный директор  
 Телефон (факс): 8 (495) 524– 91– 12  
 E–mail: oaoniii@pochta.ru

E.A. KUDRYASHOV, I.M. SMIRNOV

## CLASSIFICATION OF STRUCTURAL COMPLEX PARTS SURFACES AS PREPARATORY STAGE DESIGN TECHNOLOGY MACHINING

*The design features of surfaces of machine parts with elements interrupting forming in conjunction with the surfaces of the first and second order interrupting stost-cutting.*

**Keywords:** machine parts, the surface of the first and second order elements interrupting interrupted cuts.

### BIBLIOGRAPHY

1. Kudrjashov, E.A. Tehnologicheskij klassifikator detalej i poverhnostej, podlezhashhih obrabotke rezaniem / E.A. Kudrjashov, A.Ju. Altuhov, D.Ju. Lunin // Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty). – 2009. – № 4. – S. 3–8.
2. Kopylov, Yu.R. Konstruktorskoje i tehnologicheskoe kodirovanie detalej v mashinostroenii / Yu.R. Kopylov, A.V. Kirichek, Ju.S. Stepanov // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem. – 2009. – № 59. – S. 2–23.
3. Kudrjashov, E.A. Tochenie konstruktivno–slozhnyh poverhnostej detalej instrumentom iz kompozita / E.A. Kudrjashov // Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty). – 2012. – № 2. – S. 50–55.
4. Smirnov, I.M. Povyshenie jeffektivnosti processov mehanicheskoy obrabotki konstruktivno slozhnyh detalej mashin / I.M. Smirnov. – M.: Izd–vo Triumf, 2012. – 224 s.
5. Kudrjashov, E.A. K voprosu vybora racionalnoj marki i instrumentalnogo materiala / E.A. Kudrjashov, I.M. Smirnov // Metody. Sistemy. Tehnologii. – Bratsk: BrGU, 2014. – № 2 (22). – S.118–125.
6. Smirnov, I.M. Instrumentalnoe obespechenie processov mehanicheskoy obrabotki konstruktivno slozhnyh detalej mashin / I.M. Smirnov. – M.: Izd–vo Triumf, 2014.– 128 s.
7. Barsukov, G.V. Modelirovanie mikrorelefa abrazivnogo instrumenta i poverhnosti detali / Yu.S. Stepanov, E.A. Belkin, G.V. Barsukov. – M.: Izd–vo «Mashinostroenie–1», 2004. – 215 s.
8. Kudrjashov, E.A. Klassifikacija detalej i poverhnostej kak predposylka postroenija vysokojeffektivnyh tehnologij mehanicheskoy obrabotki / E.A. Kudrjashov, I.M. Smirnov // Izvestija Jugo–Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii. – 2014. – № 1. – S. 27–33.
9. Stepanov, Yu.S. Razvitie klassifikacionnyh sistem sposobov mehanicheskoy obrabotki / Yu.S. Stepanov // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem. – 2014. – № 3. – S. 21–24.
10. Kudrjashov, E.A. Poisk optimalnyh reshenij pri proektirovanii processov mehanicheskoy obrabotki / E.A. Kudrjashov, I.M. Smirnov // Sistemy. Metody. Tehnologii. – Bratsk: BrGU, 2014. – №3 (23). – S. 94–98.

#### **Kudryashov Evgeny Alekseevich**

38th research engineering institute, JSC NIII, Russian Technologies State corporation, Balashikha, Moscow region.  
Doctor of Engineering, professor, advisor to director general  
Phone (fax): 8 (495) 524 – 91 – 50  
E–mail: kea–swsu@list.ru

#### **Smirnov Igor Mikhaylovich**

38th research engineering institute, JSC NIII, Russian Technologies State corporation, Balashikha, Moscow region.  
Candidate of Technical Sciences, associate professor, CEO  
Phone (fax): 8 (495) 524 – 91 – 12  
E–mail: oaoniii@pochta.ru

С.Н. ТРУНОВ

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МАКРОПРОГРАММИРОВАНИЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ ЧПУ

*Статья посвящена обработке изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Проведен анализ метода параметрического макропрограммирования станков с ЧПУ с использованием элементов теории функционального синтеза и эволюции. Рассмотрен пример укрупненного алгоритма обработки детали на станке по управляющей программе с использованием метода параметрического макропрограммирования и приведено сравнение характеристик метода параметрического макропрограммирования с другими методами создания управляющих программ.*

**Ключевые слова:** система числового программного управления, параметрическое макропрограммирование, функциональный синтез, функциональная эволюция, адаптивное управление.

Качество обработки с использованием станков с ЧПУ напрямую зависит от качества управляющих программ. Поэтому для эффективного использования станков с ЧПУ необходимо обладать современными эффективными методами подготовки управляющих программ.

Одним из таких методов, является параметрическое макропрограммирование. Производители систем управления используют его в качестве расширения G-кода. В отличие от обычного программирования с использованием G-кодов, возможности параметрического программирования сравнимы с возможностями объектно-ориентированного программирования на языках высокого уровня. Использование его при разработке программ для ЧПУ открывает возможности вариантности вычислений, применения логических операторов, организации циклов, выбора по условию, работы с макропрограммами и т.д.

Эффективность внедрения в современное автоматизированное производство новых методов программирования для систем ЧПУ в значительной степени определяется заложенными в системы ЧПУ функциями. В теории функционального синтеза и функциональной эволюции [1] используется классификация, согласно которой все функции, реализуемые сложной системой, представляется возможным разделить на три группы: целевая функция, основные (базовые) функции системы и дополнительные функции системы. Целевая функция системы соответствует основному функциональному назначению системы. Основные функции отражают ориентацию системы и представляют собой совокупность макрофункций, реализуемых системой. Эти функции определяют существование систем определенного класса. Дополнительные сервисные функции расширяют функциональные возможности систем, сферу их применения и способствуют улучшению показателей эффективности систем.

Разделение функций на основные и дополнительные осуществляется в соответствии с формулировкой целевой функции системы, чем эта формулировка более конкретна, тем большее количество дополнительных функций переходит в группу основных. Например, если в целевой функции оговорить, что требуется обеспечить автоматическую переналадку системы в расчете на изменяющийся размерный ряд изделий, то функция автоматической переналадки, являющаяся, по существу, функцией способности к эволюции, становится основной функцией. Однако чаще всего основные функции связаны непосредственно с самим процессом формообразования, и функция способности к эволюции при таком подходе всегда будет являться дополнительной. Выбор множества реализуемых в системах ЧПУ функций осуществляется при их проектировании предприятиями-изготовителями. Определение подобного множества осуществляется как на этапе предпроектного анализа и составления тех-

нического задания на проектирование (функциональный синтез), так и при дальнейшей эксплуатации систем ЧПУ при необходимости их модернизации (функциональная эволюция).

Моделируя функции системы с учётом процессов преобразования потоков и методов, необходимых для обеспечения заданного формообразования, становится возможным определить множество функций, как множество, содержащее в первую очередь основные функции системы, которые выбираются на этапе выбора метода обработки и являются атрибутами данного метода. Набор этих функций в большинстве случаев бывает определен и реализован в использованном оборудовании и как бы привносится в систему вместе с этим оборудованием.

Вместе с тем весьма важной представляется задача выбора дополнительных функций, которые возникают, как в процессе синтеза, так и, в особенности, в процессе эволюции и которые также могут влиять на эффективность работы системы. Однако множество дополнительных функций может формироваться как на основе существующего состояния параметров, определяющих это множество (номенклатуры, методов, потоков и внешних условий), так и их прогнозируемого изменения с учетом стохастического характера подобного процесса. Первая группа функций будет явно улучшать выбранный критерий качества, причем оценка этого улучшения может быть даже детерминированной. Изменение критерия качества, вызванное функциями второй группы прогнозировать труднее, и для исходного состояния параметров определяющих множество функций, они не будут обеспечивать улучшения выбранного критерия качества.

В свете этого представляется целесообразным обратить внимание на такую разновидность дополнительных функций как потенциально–позитивные избыточные функции [1], т.е. дополнительные избыточные функции, обладающие потенциальной возможностью обеспечить повышение качества реализации целевой и основных функций в процессе функционирования системы в условиях стохастического изменения состояния параметров системы, определяющих множество ее функций. Именно к такому типу функций и относится функция параметрического программирования системы ЧПУ.

Рассмотрим, каким образом может проявляться потенциально–позитивный характер функции параметрического макропрограммирования при реализации четырех основных функций систем ЧПУ, связанных с четырьмя основными задачами систем ЧПУ (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Возможности использования параметрического программирования при реализации основных функций системы ЧПУ**

Терминальная функция реализует взаимодействие с оператором и диалог с другими системами управления. В рамках этой функции метод параметрического макропрограммирования

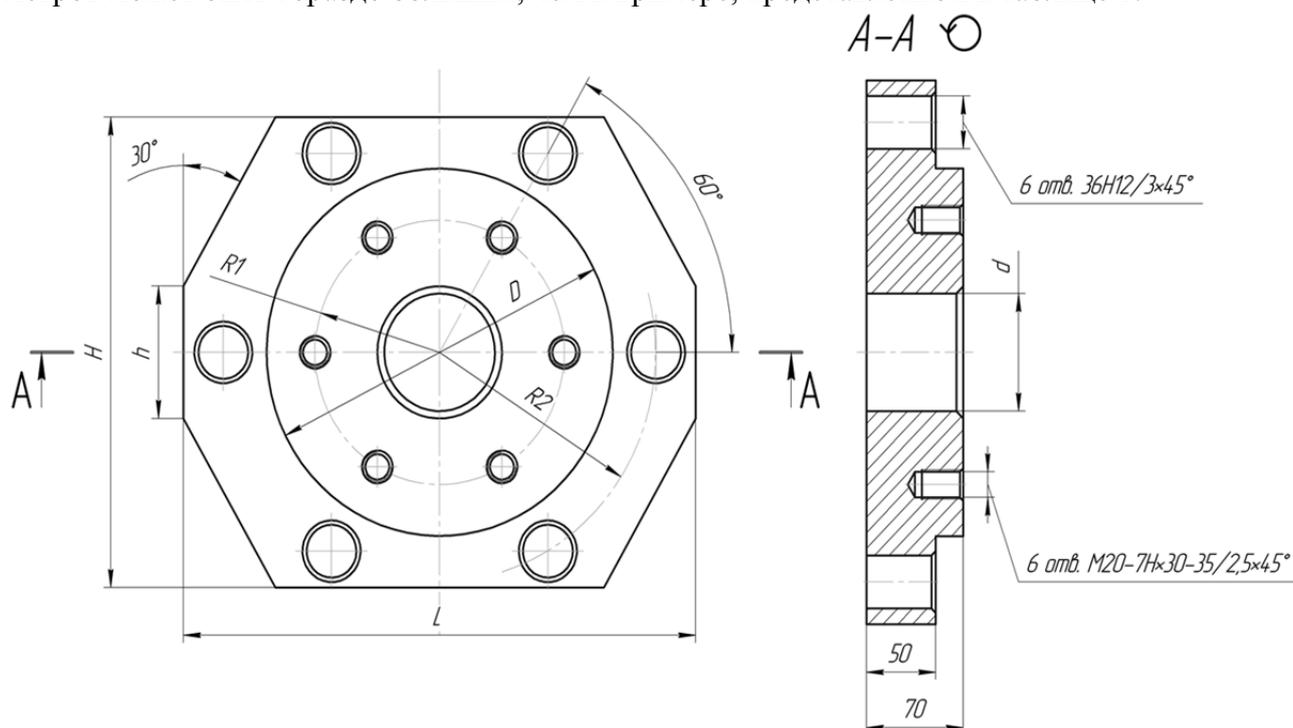
вания позволяет оператору создавать или редактировать управляющие программы (УП) в диалоговом режиме непосредственно у станка.

Технологическая функция реализует управление процессом обработки, рабочий процесс является объектом управления. В рамках этой функции метод параметрического макропрограммирования реализует автоматическую адаптацию процесса обработки к изменяющимся условиям обработки.

Геометрическая функция управляет приводами подачи станка с целью реализации процесса формообразования. Параметрическое макропрограммирование позволяет задать траекторию обработки или рассчитать координаты обработки с помощью математических функций.

Логическая функция реализует управление дискретной автоматикой станка. Метод параметрического программирования предоставляет программисту доступ к системным переменным и ячейкам программы электроавтоматики.

Чтобы оценить влияние функции параметрического макропрограммирования на повышение качества и эффективности реализации основных функций систем ЧПУ, в качестве примера можно рассмотреть процесс обработки типовой детали, эскиз которой представлен на рисунке 2. Эта деталь является параметризованной, и размеры её модификаций зависят от диаметра фланца  $D$ . Для обработки всех модификаций этой детали возможно использование лишь одной параметрической программы, причём число модификаций и зависимых параметров может быть гораздо большим, чем в примере, представленном в таблице 1.



**Рисунок 2 – Эскиз примера детали для обработки методом параметрического программирования**

**Таблица 1 – Размерный ряд модификаций детали**

Номер детали	D, мм	R1	R2	L	H	h	D
350.2.00.005.3-1	250	156	90	370	320	90	80H12/3°45°
350.2.00.005.3-2	260	161	95	385	330	97	85H12/3°45°
350.2.00.005.3-3	270	166	100	400	340	105	90H12/3°45°
350.2.00.005.3-4	280	170	105	415	350	112	95H12/3°45°

Укрупненный алгоритм работы макропрограммы для автоматической обработки детали представлен на рисунке 3.

Рассмотрим алгоритм работы параметрической программы более подробно.

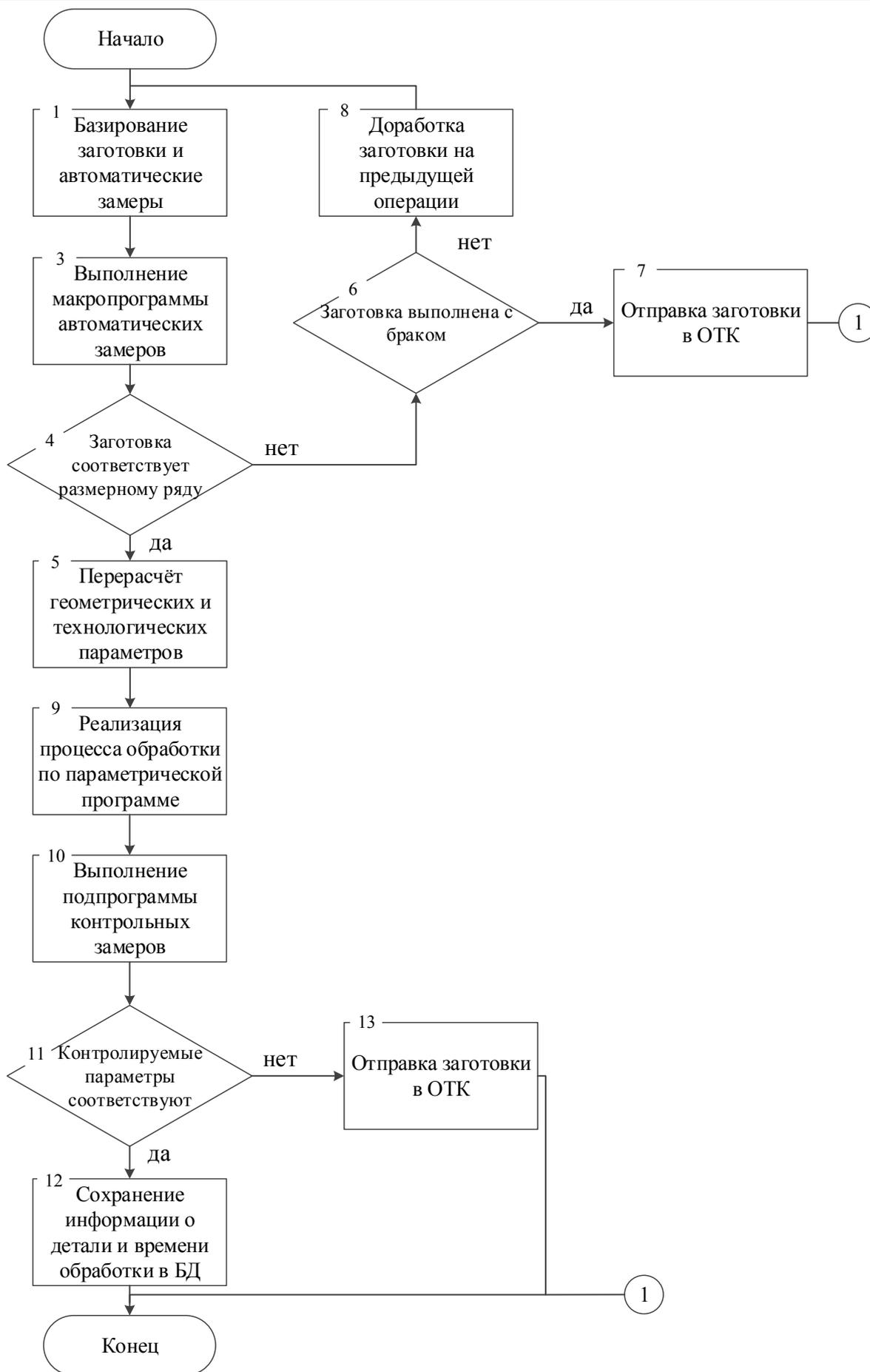


Рисунок 3 – Укрупненный алгоритм работы параметрической макропрограммы для обработки типовой детали

После установки заготовки в станке оператор запускает параметрическую управляющую программу, которая в свою очередь вызывает макропрограмму автоматических замеров, выполняемых с помощью контактных или бесконтактных измерительных систем (например, измерительная система Renishaw).

По окончании замеров макропрограмма сопоставляет полученные данные с табличными, при этом учитывая припуски на обработку. Если данные не удовлетворяют условию, то заготовка отправляется в отдел технического контроля или дорабатывается на предыдущей операции. В случае если программе удалось успешно сопоставить размеры заготовки с одной из деталей размерного ряда, макропрограмма автоматически осуществляет перерасчёт геометрических и технологических параметров обработки. Таким образом, потенциально-позитивная функция параметрического программирования оказывает положительное влияние на технологическую и геометрическую функции системы ЧПУ.

На этом этапе, благодаря параметрическому макропрограммированию, у оператора появляется возможность в диалоговом режиме контролировать и редактировать изменённые параметры обработки. Такой подход позволяет сделать управляющую программу более гибкой, тем самым сократить время её редактирования.

На следующем этапе осуществляется непосредственно процесс обработки, при этом, благодаря макропрограммированию, становится возможным выполнение различных подпрограмм в фоновом режиме, которые могут осуществлять полный контроль над системой ЧПУ, используя доступ к системным переменным и ячейкам программы электроавтоматики. Такие подпрограммы реализуют сбор и обработку данных о процессе резания и позволяют адаптивно управлять процессом обработки.

Другим направлением использования параметрического макропрограммирования в качестве потенциально-позитивной избыточной функции является расширение технологических функций системы ЧПУ в направлении повышения виброустойчивости процесса резания непосредственно в процессе обработки [3]. Способ основан на периодическом изменении скорости резания, которое будет способствовать гашению автоколебаний за счет недопущения равенства или кратности частоты вращения заготовки и собственной частоты упругой системы и исключения резонансных явлений. Такие незначительные изменения частоты вращения получили название «девиация скорости резания» [3]. Этот способ повышения виброустойчивости обеспечивался работой специальной макропрограммы, изменяющей частоту вращения привода главного движения в функции выбранного параметра обработки, например, одной из координат, что позволило реализовать различные законы девиации.

Таким образом, метод параметрического макропрограммирования может быть использован не только для повышения эффективности процесса разработки и отладки управляющих программ, но и для повышения качества обрабатываемых деталей.

После выполнения основной программы обработки запускается макропрограмма, выполняющая автоматические контрольные замеры детали, которые позволяют получить предварительные данные о качестве и точности выполненной обработки. В том случае, если обработка выполнена успешно, статистические данные, полученные в ходе работы параметрической программы, могут быть сохранены в базе данных предприятия для дальнейшей работы с ними.

Чтобы объективно оценить достоинства и недостатки использования метода параметрического программирования, целесообразно сравнить его с каким-либо другими методами подготовки управляющих программ. Благодаря интенсивной компьютеризации производства наиболее распространённым методом подготовки управляющих программ в настоящее время является метод с использованием САМ-систем, которые позволяют автоматизировать процесс создания таких программ.

В стандартном программировании, с помощью G-кода, должны быть рассчитаны координаты центров для каждого отверстия, и ввод координат повторяется для каждого инструмента, используя соответствующий цикл обработки. В параметрическом макропрограммировании может быть рассчитано положение отверстий только один раз, затем значения координат сохраняются в переменных и могут многократно использоваться для различных операций с использованием различных циклов обработки.

Например, при обработке типовой детали (рисунок 2) необходимо выполнить операции сверления, зенкования фасок и нарезания резьбы в двенадцати отверстиях. При создании управляющей программы, например, используя САМ-системы, координаты для выполнения круговой и винтовой интерполяции будут прописаны для каждого отверстия, что значительно увеличит код управляющей программы и усложнит её дальнейшую отладку на станке. Используя метод параметрического программирования и относительную систему координат, становится возможным вызывать макропрограммы для сверления, зенкования и нарезания резьбы для каждого отверстия, тем самым сокращая объем кода программы практически на порядок.

Если размер файла управляющей программы не имеет значения, тем не менее, необходимо стремиться сократить количество повторяющихся данных в коде программы. Основной предпосылкой для этого является необходимость снижения вероятности возникновения ошибки при редактировании программы и в процессе её отладки. Например, при изменении чертежа, инженеру-программисту не нужно строить новую модель детали и генерировать код управляющей программы, достаточно лишь внести изменения в соответствующую макропрограмму. Такое редактирование возможно произвести непосредственно на пульте системы ЧПУ, что значительно сократит время редактирования управляющей программы и повысит её эффективность.

Преимущества и недостатки различных методов подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ обобщены на схеме, представленной на рисунке 4.



*Рисунок 4 – Сравнительный анализ метода параметрического макропрограммирования и программирования с использованием САМ-систем*

Однако наряду с достоинствами у метода параметрического макропрограммирования существуют и недостатки, такие как необходимость “ручного” программирования и отсутствие возможности предварительной верификации. Поэтому дальнейшая работа по изучению

метода параметрического макропрограммирования должна быть направлена на устранение этих недостатков.

Таким образом, использование метода параметрического макропрограммирования расширяет возможности всех основных функций системы ЧПУ, что делает использование такого метода при разработке и отладке управляющих программ для станков с ЧПУ весьма эффективным, а получаемую управляющую программу более гибкой. Метод позволяет управлять процессом резания непосредственно во время обработки, тем самым повышая качество обработанной поверхности. Параметрическая программа позволяет также осуществлять сбор сведений о процессе резания, давая возможность формировать дополнительные управляющие воздействия на различных уровнях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов, Е.П. Эволюционный синтез систем / Е.П. Балашов. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
2. Васин, С.А. Функциональный синтез и функциональная эволюция станочных систем / С.А. Васин, А.Б. Орлов // Проектирование технологических машин. Вып. 21. – М.: МосСТАНКИН. – 2000. – С. 34–43.
3. Афонин, А.А. Использование систем ЧПУ на основе персональных компьютеров для управления девиацией параметров режима резания / А.А. Афонин, Н.А. Афонина, А.Б. Орлов // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технологическая системотехника: сборник трудов первой международной электронной научно–технической конференции. – Тула: изд–во ТулГУ. – 2003. – С. 50–56.

**Трунов Сергей Николаевич**

Тульский государственный университет, г. Тула

Аспирант кафедры «Автоматизированные станочные системы»

E–mail: tsn.88@mail.ru

---

S.N. TRUNOV

### PARAMETRIC MACRO PROGRAMMING IN IMPLEMENTATION OF FUNCTIONS CNC

*Article is devoted to processing of products on machine tools with numerical control (CNC). The analysis of the method of parametric macro programming CNC using elements of the theory of evolution and functional synthesis. An example of close–processing algorithm on the machine parts on the control program using the method of parametric macro programming and compares the characteristics of the method of parametric macro with other methods of creating control programs.*

**Keywords:** CNC, parametric macro programming, functional synthesis, functional evolution, adaptive control.

### BIBLIOGRAPHY

1. Balashov, Ye.P. Evolyutsionnyy sintez sistem / Ye.P. Balashov. – M.:Radio i svyaz, 1985. – 328 s.
2. Vasin, S.A. Funktsionalnyy sintez i funktsionalnaya evolyutsiya stanochnykh sistem / S.A. Vasin, A.B. Orlov // Proyektirovaniye tekhnologicheskikh mashin. Vyp. 21. – M.: MosSTANKIN. – 2000. – S. 34–43.
3. Afonin, A.A. Ispolzovaniye sistem CHPU na osnove personalnykh kompyuterov dlya upravleniya deviatseyey parametrov rezhima rezaniya / A.A. Afonin, N.A. Afonina, A.B. Orlov // Izvestiya Tulslogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnologicheskaya sistemotekhnika: sbornik trudov pervoy mezhdunarodnoy elektronnoy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii. – Tula: izd–vo TulGU. – 2003. – S. 50–56

**Trunov Sergey Nikolayevich**

Tula State University, Tula

Post–graduate student of the department «Automated Machine Tools»

E–mail: tsn.88@mail.ru

Е.А. СЫЧЕВ, А.А. МУРАВЬЕВ, А.С. ТАРАПАНОВ

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ АДДИТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Рассматриваются вопросы повышения эффективности и качества методов аддитивной технологии посредством выбора исходного материала. Приведены основные параметры порошкового материала, на основе которого происходит формообразование детали сложной конфигурации.*

**Ключевые слова:** эффективность, аддитивная технология, порошковый материал, лазерное спекание.

Принцип работы установки для аддитивного производства с помощью лазерного излучения можно описать следующим образом. Устройство 2 для нанесения и выравнивания снимает микрослой порошка 4 с питателя и равномерным слоем распределяет его по поверхности подложки. После чего лазер 1 лучом сканирует поверхность нанесенного слоя порошка и путем спекания формирует получаемое изделие 3. По окончании сканирования полученного слоя платформа 6 опускается на толщину наносимого слоя, а платформа 5 с порошком поднимается, и цикл формирования детали повторяется. После завершения процесса платформа с изделием поднимается и очищается от неиспользованного порошка (рисунок 1).

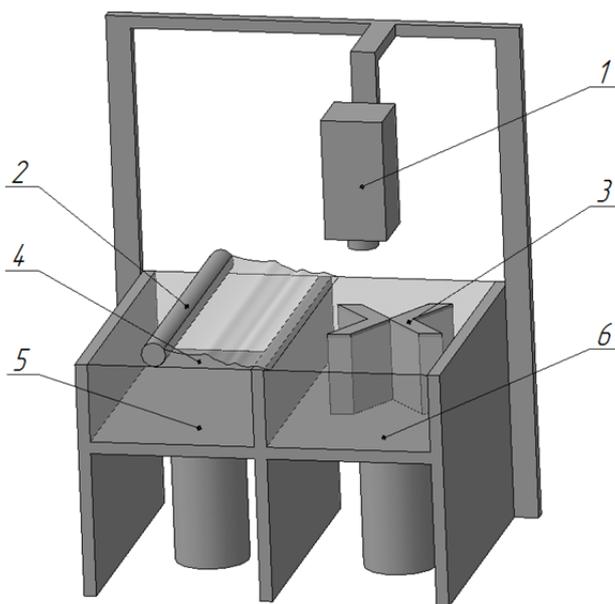


Рисунок 1 – Принципиальная схема лазерного аддитивного производства изделий

Одной из основных частей в установках аддитивного производства является лазерная система, в которой используются: защитная среда газа CO<sub>2</sub>, алюмоиттриевый гранат с неодимом Nd:YAG и дисковый лазер. Установлено, что использование лазеров с длиной волны 1–1,1 мкм для нагрева металлов и карбидов предпочтительнее, поскольку они на 25–65% лучше поглощают генерируемое лазером излучение. [1]. Лазеры, используемые в аддитивном производстве, работают в непрерывном режиме и в импульсном режиме. За счет их энергии импульса и короткой продолжительности импульса ( ) импульсный режим даёт возможность улучшить прочность связи между слоями и уменьшить зону термического воздействия, при этом характеристики используемых лазерных систем лежат в пределах: мощность лазера – до 500 Вт, скорость сканирования до 2 м/с, скорость позиционирования до 7 м/с, диаметр фокусированного пятна – 35–400 мкм.

Одним из важных условий при аддитивном производстве является создание защитной среды предотвращающей окисление порошка. Для выполнения этого условия используют аргон или азот. Однако применение азота как защитного газа ограничено, что связано с воз-

возможностью образования нитридов (например, AlN, TiN при изготовлении изделий из алюминиевых и титановых сплавов), которые приводят к снижению пластичности материала [2].

Методы лазерного аддитивного производства по особенностям процесса уплотнения материала можно разделить на селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering (SLS)), не прямое лазерное спекание металлов (Indirect Laser Metal Sintering (ILMS)), прямое лазерное спекание металлов (Direct Laser Metal Sintering (DLMS)) и селективное лазерное плавление (Selective Laser Melting (SLM)). В первом методе уплотнение слоя порошка происходит за счет спекания порошкового материала без образования жидкой фазы. Во втором – за счет пропитки связкой пористой структуры слоя ранее сформированного лазерным излучением. В основе прямого лазерного спекания металлов лежит уплотнение по механизму спекания с образованием жидкой фазы за счет плавления легкоплавкого компонента в порошковой смеси. В последнем методе уплотнение происходит за счет полного плавления и растекания расплава [3].

В процессе непрямого лазерного спекания металлов используют смесь порошка и полимера или порошок покрытый полимером, где полимер выступает в роли связки и обеспечивает необходимую прочность для проведения дальнейшей термической обработки. На стадии термической обработки проводится отгонка полимера, спекание каркаса и пропитка пористого каркаса металлом–связкой, в результате которой получается готовое изделие.

Для ILMS можно использовать порошки металлов, керамики или их смесей. Получение смеси порошка с полимером, содержание которого составляет около 2–3% (по массе), производят механическим смешиванием. При изготовлении порошка покрытым полимером, используют эпоксидные смолы, жидкое стекло, полиамиды и другие полимеры, толщина слоя которых на поверхности частицы составляет около 5 мкм. Температура отгонки полимеров определяется температурой его плавления и в среднем составляет 400–650 °С, при этом пористость изделия составляет около 40%. Для пропитки, пористое изделие в инертной или восстановительной среде, нагревают на 100–200 °С выше точки плавления пропитывающего материала, поскольку с повышением температуры уменьшается краевой угол смачивания и понижается вязкость расплава, что благоприятно влияет на процесс пропитки. В большинстве случаев пропитку будущих изделий проводят в засыпке из оксида алюминия, которая играет роль поддерживающего каркаса, поскольку в период от отгонки полимера до образования прочных межчастичных контактов существует опасность разрушения или деформации изделия. Материал для пропитки должен характеризоваться полным отсутствием или незначительным межфазным взаимодействием, малым краевым углом смачивания и иметь температуру плавления ниже, чем у основы. Обычно для пропитки металлического каркаса используют бронзу так как в этом случае не происходят нежелательные процессы, такие как образование более тугоплавких соединений или твердых растворов, при этом усадка изделия составляет 2–5% (таблица 1) [1].

Таблица 1 – Материалы и их свойства, используемые для ILMS

Марка порошка	Материал основы	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость	Модуль упругости, ГПа
DTM RapidSteel 1.0	У10А	475	255	15	75 HRB	210
DTM RapidSteel 2.0	03X16H1 5M3	580	413	0,9	22 HRB	263
DTM RapidSteel ST 100	20X13	510	305	10	79–87 HRB	137
DTM RapidSteel ST 200	20X13	435	250	6	79 HRB	137
LaserForm A6 Steel	ХМГ2	610	470	2–4	10–20 HRC.	138

Процесс прямого лазерного спекания металлов подобен ILMS, однако отличается тем, что вместо полимера используются сплавы или соединения с низкой температурой плавления, а также отсутствует пропитка. Получение различных изделий методом DLMS основано на затекании образовавшегося расплава–связки в пустоты между частицами под действием капиллярных сил, при этом для успешного выполнения процесса в порошковую смесь добавляют соединения с фосфором, которые снижают поверхностное натяжение, вязкость и степень окисления расплава, тем самым улучшая смачиваемость. Порошок, используемый в качестве связки, обычно имеет меньший размер, чем порошок основы, поскольку это позволяет увеличить насыпную плотность порошковой смеси и ускорить процесс образования расплава (таблица 2).

Таблица 2 – Материалы и их свойства, используемые для DLMS компанией EOS GmbH

Марка порошка	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Пористость, %	Твердость, Н V	Модуль упругости, ГПа	Относительное удлинение, %	Скорость прослойки, куб.см./ч
DirectMetal 20 (Cu–Sn–CuP–Ni)	400	200	8	15	80	2,5	7,2–28,8
DirectMetal 20 (Fe–Cu–Sn–CuP–Ni)	580	400	2	25	130	1,5	5,4–9

Появление возможности использования более мощного лазера для аддитивного производства, меньшего диаметра фокусирующего пятна и нанесения более тонкого слоя порошка, позволило использовать SLM для изготовления изделий с пористостью 0–3% из различных металлов и сплавов.

Стоит отметить, что формирование качественной полосы расплава связано с поиском оптимальной области параметров процесса (мощности лазерного излучения и скорости сканирования), которая обычно достаточно узкая (рисунок 2) [1].

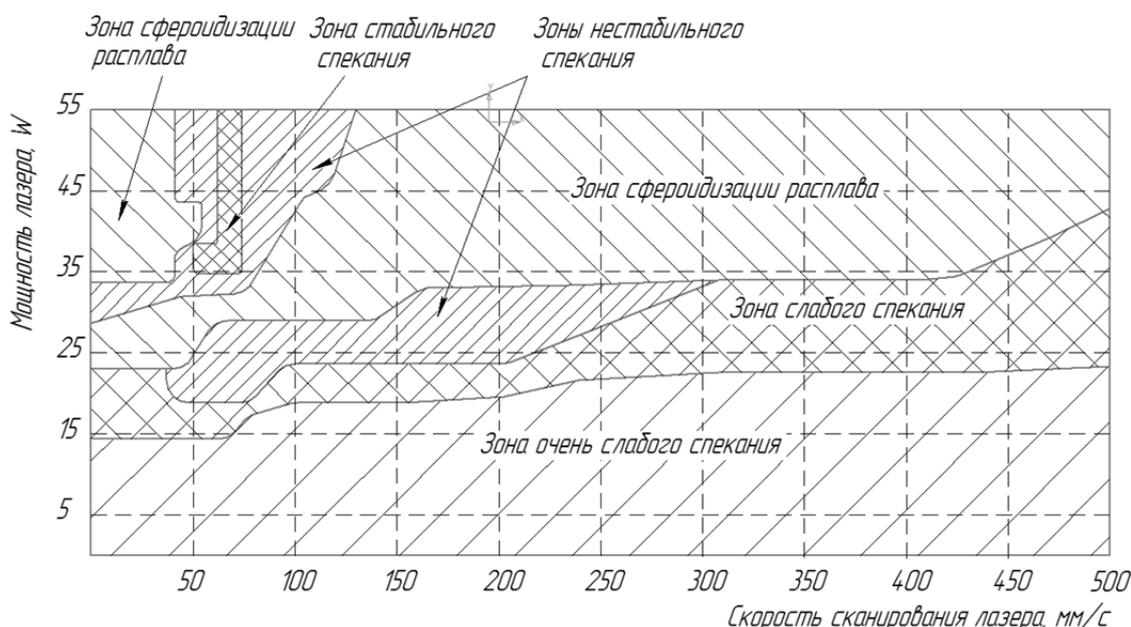


Рисунок 2 – Влияние параметров SLM золота на качество формируемых слоев

Еще одним фактором, влияющим на качество изделий, является появление внутренних напряжений, наличие и величина которых зависит от геометрии изделия, скорости нагрева и охлаждения, коэффициента термического расширения, фазовых и структурных из-

менений в металле. Значительные внутренние напряжения могут приводить к деформации изделий, образованию микро- и макротрещин.

Изделия, получаемые по аддитивной технологии могут иметь остаточную пористость и в случае необходимости применяют дополнительные технологические операции для повышения их плотности. Для этой цели используют методы порошковой металлургии – спекание или горячее изостатическое прессование (ГИП). Спекание позволяет устранить остаточную пористость и повысить физико-механические свойства материала.

При этом следует подчеркнуть, что формируемые свойства материала в процессе спекания определяются составом и природой материала, размером и количеством пор, наличием дефектов и другими многочисленными факторами. После аддитивного производства методом SLM материалы характеризуются анизотропией свойств, повышенной прочностью и пониженной пластичностью из-за наличия остаточных напряжений. Для снятия остаточных напряжений, получения более равновесной структуры, повышения вязкости и пластичности материала проводят отжиг.

При получении изделий традиционными способами одним из путей избежать трещин и искажения размеров при закалке изделий сложной формы является использование легированных сталей, в которых присутствующие легирующие элементы помимо повышения механических и физико-химических свойств, задерживают превращение аустенита при охлаждении, в результате чего уменьшается критическая скорость закалки и увеличивается прокаливаемость легированной стали. Благодаря малой критической скорости закалки, сталь можно калировать в масле или на воздухе, что снижает уровень внутренних напряжений. Однако по причине быстрого отвода тепла, невозможности регулирования скорости охлаждения и наличия углерода в легированной стали этот прием не позволяет избежать появления значительных внутренних напряжений при селективном лазерном плавлении.

В связи с выше отмеченными особенностями, для SLM используются мартенситно-старяющиеся стали, в которых упрочнение и повышение твердости достигается за счет выделения дисперсных интерметаллидных фаз при термообработке. Эти стали содержат малое количество углерода (сотые проценты), в результате чего образовавшаяся при быстром охлаждении решетка мартенсита характеризуется малой степенью искаженности и сравнительно низкой твердостью. Малая твердость и высокая пластичность мартенсита обеспечивает релаксацию внутренних напряжений при закалке, а высокое содержание легирующих элементов позволяет прокаливать сталь на большую глубину почти при любых скоростях охлаждения. Благодаря этому с помощью SLM можно изготавливать и подвергать термообработке сложные изделия без опасения образования трещин или коробления. Кроме мартенситно-старяющихся сталей могут использоваться некоторые аустенитные нержавеющие стали, например 20X13. [1].

Твердофазное селективное лазерное спекание не получило широкого распространения, поскольку для более полного протекания объемной и поверхностной диффузии, вязкого течения и других процессов, имеющих место при спекании порошка, требуется относительно длительная выдержка под лазерным излучением. Это приводит к длительной работе лазера и малой производительности процесса, что делает этот процесс экономически не целесообразным. Помимо этого, возникают сложности с поддержанием температуры процесса в интервале между точкой плавления и температурой твердофазного спекания. Преимуществом твердофазного селективного лазерного спекания является возможность использования более широкого круга материалов для изготовления изделий [4].

DMLS активно используется в промышленности ввиду возможности построения внутренних структур цельных деталей, недоступных по сложности традиционным методам производства. Детали с комплексной геометрией могут быть выполнены целиком, а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий. Так как DMLS не требует специальных инструментов (например, литейных форм) и не производит большого количества отходов (как в случае с субтрактивными методами), производство мелкосерийных партий с помощью этой технологии намного выгодней, чем за счет традиционных методов.

Одним из недостатков ILMS является отсутствие возможности регулировать в широких пределах содержание тугоплавкой фазы (материала основы). Поскольку её процентное содержание в готовом изделии определяется насыпной плотностью порошка, которая в зависимости от характеристик порошка может быть в три и более раза меньше теоретической плотности материала порошка.

Стоит отметить, что эта классификация не является универсальной, поскольку в одном типе процесса аддитивного производства могут проявляться механизмы уплотнения, которые характерны для других процессов. Например, при DLMS и SLM может наблюдаться твердофазное спекание, которое имеет место при SLS, тогда как при SLM может происходить жидкофазное спекание, которое более характерно для DLMS.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологии лазерного аддитивного производства металлических изделий [Электронный ресурс] URL: <http://habrahabr.ru/post/218271> (дата обращения: 16.04.2015).
2. Довбыш В.М. Аддитивные технологии и изделия из металла [Электронный ресурс] URL: [www.nami.ru/upload/AT\\_metall.pdf](http://www.nami.ru/upload/AT_metall.pdf).
3. Грабченко, А.И. Интегрированные генеративные технологии /А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок [и др.]; под ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.
4. Орыщенко, А.С. Применение технологий селективного лазерного спекания и объемной лазерной наплавки для создания и восстановления деталей, используемых в машиностроении / А.С. Орыщенко, П.А. Кузнецов, В.В. Бобырь, В.И. Савин, А.В. Терещенко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2013. – № 12 (46). – С. 238–244.

**Сычев Евгений Александрович**  
ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК» г. Орел  
Аспирант кафедры «Конструкторско–технологическое обеспечение машиностроительных производств»  
Тел: 8–920–812–57–15  
E–mail: lastsea@mail.ru

**Муравьев Андрей Александрович**  
ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК» г. Орел  
Студент кафедры «Бухгалтерский учет и налогообложение»  
Тел: 8–900–484–27–30  
E–mail: andrei–20101@yandex.ru

**Тарапанов Александр Сергеевич**  
ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК» г. Орел  
Доктор технических наук,  
Профессор кафедры «Конструкторско–технологическое обеспечение машиностроительных производств»  
Тел:(4862)48–18–84  
E–mail: tarapanov@yandex.ru

---

E.A. SYCHEV, A.A. MURAVEV, A.S. TARAPANOV

## THE EFFICIENCY OF THE METHODS OF ADDITIVE MANUFACTURING DETAILS IN MECHANICAL ENGINEERING

*Discusses issues that increase the efficiency and quality of additive manufacturing methods the selection of source material. Shows the main parameters of the powder material from which the forming parts of complex configuration.*

**Keywords:** efficiency, additive technology, powder material, laser sintering.

### BIBLIOGRAPHY

1. Tekhnologii lazernogo additivnogo proizvodstva metallicheskih izdeliy [Elektronnyy resurs] URL: <http://habrahabr.ru/post/218271> (data obrashcheniya: 16.04.2015).
2. Dovbysh V.M. Additivnyye tekhnologii i izdeliya iz metalla [Elektronnyy resurs] URL: [www.nami.ru/upload/AT\\_metall.pdf](http://www.nami.ru/upload/AT_metall.pdf).
3. Grabchenko, A.I. Integrirovannyye generativnyye tekhnologii /A.I. Grabchenko, Yu.N. Vnukov, V.L. Dobroskok [i dr.]; pod red. A.I. Grabchenko. – Kharkov: NTU «KHPI», 2011. – 416 s.
4. Oryshchenko, A.S. Primeneniye tekhnologiy selektivnogo lazernogo spekaniya i ob»yemnoy lazernoy naplavki dlya sozdaniya i vosstanovleniya detaley, ispolzuyemykh v mashinostroyenii / A.S. Oryshchenko, P.A. Kuznetsov, V.V. Bobyr, V.I. Savin, A.V. Tereshchenko // Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya. – 2013. – № 12 (46). – S. 238–244.

**Sychev Evgeniy Aleksandrovich**  
State University – ESPC  
post-graduate student, chair «Design and technological support for engineering industries», Orel  
Tel: 8–920–812–57–15  
E–mail: lastsea@mail.ru

**Muravev Andrei Aleksandrovich**  
State University – ESPC  
student, chair « accounting and taxation», Orel  
Тел: 8–900–484–27–30  
E–mail: andrei–20101@yandex.ru

**Tarapanov Aleksander Sergeevich**  
State University – ESPC  
Doctor of technical sciences, professor chair«Design and technological support for engineering industries», Orel  
Tel: (4862)48–18–84  
E–mail: tarapanov@yandex.ru

П.Ю. БОЧКАРЕВ, О.В. ЗАХАРОВ, И.А. СКЛЯРОВ

## ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ АБРАЗИВНО–СТРУЙНОЙ ОБРАБОТКЕ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Рассмотрена новая схема абразивно–струйной обработки внутренних поверхностей. Особенность технологической схемы заключается в том, что абразивно–воздушная смесь формируется непосредственно в закрытой зоне обработки. Экспериментально исследовано влияние давления сжатого воздуха, зернистости абразива и времени на производительность и качество обработки.*

*Ключевые слова:* абразивно–струйная обработка; внутренняя поверхность; качество; технологические параметры.

Окончательную обработку поверхностей заготовок преимущественно производят с применением абразивных инструментов или сред. К методам обработки свободным абразивом относят [1, 2]: вибрационную, центробежно–ротационную, струйно–абразивную, турбоабразивную обработку, обработку свободным абразивом, уплотненным инерционными силами, магнитно–абразивное полирование и галтовку.

Одним из наиболее перспективных является метод струйно–абразивной обработки, сущность которого заключается в использовании эффекта удара частиц обрабатываемого материала об обрабатываемую поверхность. Известные работы в этой области [3–11] рассматривают схему обработки, при которой абразивно–воздушная смесь формируется в специальной камере, а затем под давлением подается на обрабатываемую поверхность. Основным недостатком абразивно–струйной обработки связан со сложностью технологического процесса для достижения заданных параметров качества и равномерности. Кроме того в процессе обработки необходимо непосредственное участие оператора, что ограничивает возможности при обработке внутренних поверхностей.

Поэтому предложены новая схема и реализующее ее устройство, в которых абразивно–воздушную смесь формируют непосредственно в зоне обработки, тем самым обеспечивая высокую производительность и экономичность. В разработанной установке (рисунок 1) сопла Вентури располагают симметрично по центру рабочей зоны, которая конструктивно образуются двумя заслонками круглой формы.

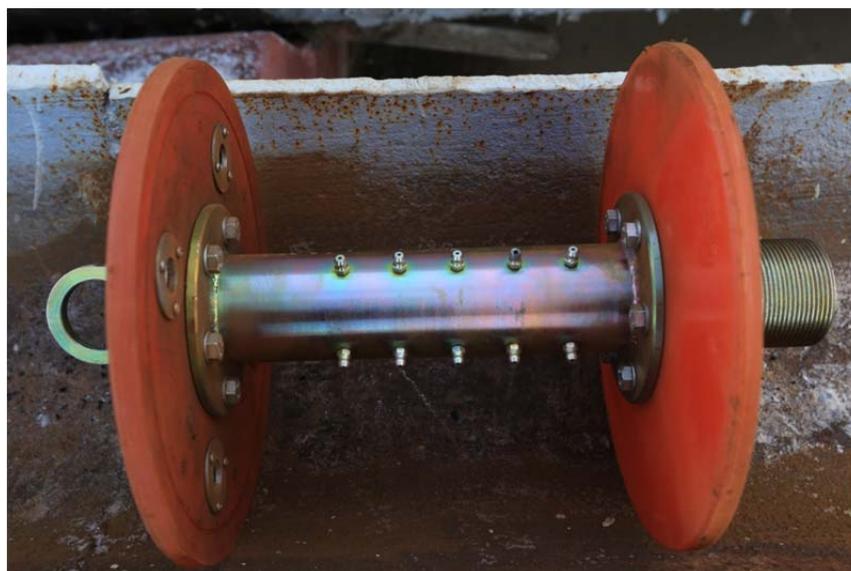


Рисунок 1 – Установка для абразивно–струйной обработки

Сжатый воздух подают через одну из заслонок под давлением через стержень и шланг от источника воздуха, например, компрессора. Для обеспечения герметичности заслонки выполнены из эластичного материала или снабжены уплотнениями по периферии. Очистные элементы установки изготовлены из износостойкого материала и сохраняют работоспособность изделий при проведении очистки внутренней полости в режиме «сухого» трения. Выходные отверстия с фильтрами выполнены таким образом, чтобы площади входного и выходного потоков воздуха были равны. С целью создания вихревых потоков, которые способствуют более эффективной обработке, предусмотрен наклон сопел относительно поверхности на небольшой угол.

С целью определения рациональных значений технологических параметров проведены экспериментальные исследования. Изучалось влияние времени  $t$  и давления  $p$  на производительность и качество. Производительность определялась как съём металла на диаметр  $h$  в мкм, а качество регламентировалось параметром шероховатости  $Ra$ .

Объектом исследований служила бесшовная труба из стали 40 в состоянии поставки (отжиг) диаметром 273 мм. Давление создавалось компрессором и изменялось от 1 до 8 атм. Измерение шероховатости выполнялось портативным измерителем шероховатости TR200 в четырех сечениях трубы по предварительной разметке. Измерение съема металла на диаметр производилось с помощью ультразвукового толщиномера модели УДТ-40 с разрешением 0,001 мм в двух диаметральных сечениях, а затем усреднялось. Все измерения повторялись троекратно, а затем результат усреднялся. Применялся абразив – электрокорунд белый марки 25А в виде шлифзерна 25/20 и 80/63. Результаты представлены на рисунках 2, 3.

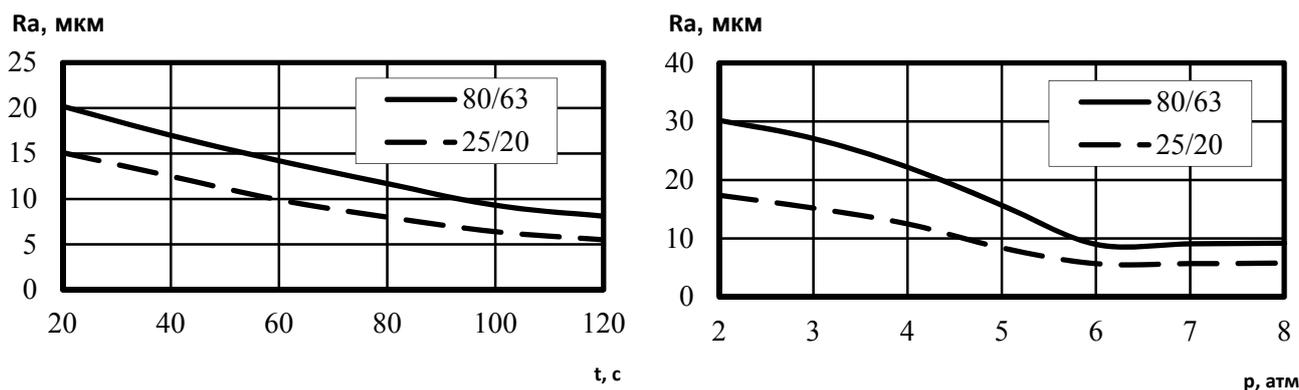


Рисунок 2 – Зависимость шероховатости  $Ra$  от давления воздуха  $p$  и времени обработки  $t$

Анализ графиков на рисунке 2 показал, что увеличение времени обработки способствует снижению шероховатости и увеличению съема металла. При этом интенсивность протекания обоих процессов с течением времени незначительно снижается. За время обработки 120 с достигается уменьшение шероховатости от исходной  $Ra = 25\text{--}20$  мкм до  $Ra = 5\text{--}10$  мкм. Абразив с меньшей зернистостью 25/20 обеспечивает примерно в 1,7 раза меньшую шероховатость поверхности.

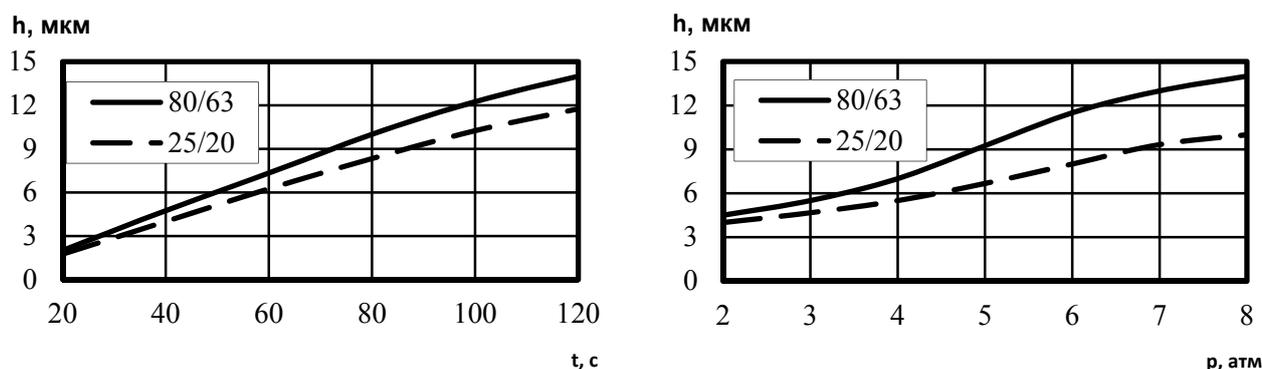


Рисунок 3 – Зависимость съема металла  $h$  от давления воздуха  $p$  и времени обработки  $t$

Из графиков на рисунке 3 видно, что увеличение давления воздуха способствует увеличению съема металла по нелинейной зависимости. Наибольший рост наблюдается в интервале от 4 до 7 атм, затем кривая становится более полой. График зависимости шероховатости поверхности имеет минимум, соответствующий давлению примерно 6 атм. Поэтому можно сделать вывод, что оптимальное давление составляет 5–7 атм.

Применение абразива разной зернистости принципиально не меняет характер полученных зависимостей. Уменьшение величины зернистости приводит к уменьшению съема металла и шероховатости обработанной поверхности. Влияние времени обработки по сравнению с давлением воздуха более значимо, поэтому первое следует считать наиболее актуальным параметром процесса.

При абразивно–струйной обработке съем металла составил 10–15 мкм. Сравнение величины съема металла с исходной шероховатостью поверхности показало, что формообразование происходит в пределах шероховатости. Поэтому имеет место не микрорезание, а преимущественно трение и пластическое оттеснение металла. Кроме того, отмечено увеличение микротвердости поверхности в среднем со 137 до 143 НВ.

Снижение интенсивности съема металла с течением времени можно объяснить двумя причинами. Во–первых, наиболее активный съем осуществляется в пределах исходной шероховатости, после ее снижения в несколько раз процесс затухает. Во–вторых, абразив постепенно теряет режущие свойства и засоряется продуктами микрорезания, что однако мало заметно для использованных условий эксперимента.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) абразивно–струйная обработка позволяет снизить шероховатость поверхности  $Ra$  от 30–25 мкм до 5–10 мкм с использованием электрокорунда марки 25А зернистостью 25/20, 80/63;

2) уменьшение зернистости абразива с 25/20 до 80/63 способствует уменьшению шероховатости поверхности примерно в 1,7 раза и съему металла в 1,4 раза;

3) съем металла происходит в пределах исходной шероховатости поверхности и составляет 10–15 мкм, преобладают процессы пластического деформирования;

4) давление сжатого воздуха целесообразно выбирать в пределах 5–7 атм, что обеспечивает минимальную шероховатость обработанной поверхности при достаточной производительности процесса;

5) время обработки назначают по соображениям экономической эффективности, достаточно ограничиться 100–120 с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын, П.И. Финишная обработка деталей потоком свободного абразива / П.И. Ящерицын, А.Н. Мартынов, А.Д. Гридин. – Минск: Наука и техника, 1978. – 224 с.
2. Проволоцкий, А.Е. Струйно–абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий. – К: Техника, 1989. – 177 с.
3. Севостьянов, А.С. Современное состояние исследований в области нанесения микрорельефа в отечественной науке / А.С. Севостьянов, А.А. Лукьянов, И.Н. Бобровский // Theoretical & Applied Science. – 2014. – № 10. – С. 82–84.
4. Зверовщиков, В.З. Повышение эффективности объемной центробежной отделочно–упрочняющей обработки деталей в контейнерах с планетарным вращением / В.З. Зверовщиков, А.Е. Зверовщиков, Е.А. Зверовщиков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 12. – С. 3–7.
5. Пичко, А.С. Струйно–абразивная обработка поверхности отверстий цилиндрических деталей / А.С. Пичко // Вестник машиностроения. – 1978. – № 10. – С. 65–67.
6. Кремень, З.И. Турбоабразивная обработка деталей новый способ финишной обработки / З.И. Кремень, М.Л. Масарский // Вестник машиностроения. – 1977. – № 8. – С. 68–70.
7. Бабаян, С.А. Оценка энергии обрабатывающих частиц в потоке абразивно–жидкостной суспензии / С.А. Бабаян, А.А. Аракелян, Р.Т. Дохилян // Вестник машиностроения. – 1981. – № 5. – С. 57–59.
8. Мартынов, А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом уплотненным инерционными силами / А.Н. Мартынов. – Саратов: Изд–во Саратов. ун–та, 1981. – 212 с.
9. Кремень, З.И. Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля / З.И. Кремень, М.Л. Масарский, В.З. Гузель. – М.: НИИмаш, 1987. – 53 с.
10. Повышение эффективности центробежно–ротационной обработки в среде абразива / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, Ю.В. Корольков, О.А. Рожненко // СТИН. – 2009. – № 2. – С. 26–30.

11. Кравченко, И.Н. Обоснование и выбор параметров, характеризующих степень развития поверхности после абразивоструйной обработки / И.Н. Кравченко // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 7. – С. 46–48.

**Бочкарев Петр Юрьевич**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов  
доктор технических наук, зав. кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов»  
E-mail: bpy@sstu.ru

**Захаров Олег Владимирович**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов  
доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»  
E-mail: zov17@mail.ru

**Скляр Игорь Анатольевич**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов  
аспирант кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»

P.Yu. BOCHKAREV, O.V. ZAKHAROV, I.A. SKLYAROV

**CHOICE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS WITH ABRASIVE BLASTING INNER SURFACE**

*A new scheme of abrasive blasting of interior surfaces is considered. The feature of flowsheet that is the abrasiveair mixture is formed directly in a sealed treatment zone. The influence of air pressure, abrasive granularity and time on productivity and quality of processing is experimentally performed.*

**Keywords:** abrasive blasting; the inner surface; quality; technological parameters.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Yashcheritsyn, P.I. Finishnaya obrabotka detaley potokom svobodnogo abraziva / P.I. Yashcheritsyn, A.N. Martynov, A.D. Gridin. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1978. – 224 s.
2. Provolotskiy, A.Ye. Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley mashin / A.Ye. Provolotskiy. – K: Tekhnika, 1989. – 177 s.
3. Sevostyanov, A.S. Sovremennoye sostoyaniye issledovaniy v oblasti naneseniya mikrorelyefa v otechestvennoy nauke / A.S. Sevostyanov, A.A. Lukyanov, I.N. Bobrovskiy // Theoretical & Applied Science. – 2014. – № 10. – S. 82–84.
4. Zverovshchikov, V.Z. Povysheniye effektivnosti ob»yemnoy tsentrobezhnoy otdelochno-uprochnyayushchey obrabotki detaley v konteynerakh s planetarnym vrashcheniyem / V.Z. Zverovshchikov, A.Ye. Zverovshchikov, Ye.A. Zverovshchikov // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. – 2007. – № 12. – S. 3–7.
5. Pichko, A.C. Struyno-abrazivnaya obrabotka poverkhnosti otverstiy tsilindricheskikh detaley / A.C. Pichko // Vestnik mashinostroyeniya. – 1978. – № 10. – S. 65–67.
6. Kremen, Z.I. Turboabrazivnaya obrabotka detaley novyy sposob finishnoy obrabotki / Z.I. Kremen, M.L. Masarskiy // Vestnik mashinostroyeniya. – 1977. – № 8. – S. 68–70.
7. Babayan, S.A. Otsenka energii obrabatyvayushchikh chastits v potoke abrazivno-zhidkostnoy suspensii / S.A. Babayan, A.A. Arakelyan, R.T. Dokhikyan // Vestnik mashinostroyeniya. – 1981. – № 5. – S. 57–59.
8. Martynov, A.N. Osnovy metoda obrabotki detaley svobodnym abrazivom uplotnennym inertsiionnymi silami / A.N. Martynov. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1981. – 212 s.
9. Kremen, Z.I. Turboabrazivnaya obrabotka detaley slozhnogo profilya / Z.I. Kremen, M.L. Massarskiy, V.Z. Guzel. – M.: NIImash, 1987. – 53 s.
10. Povysheniye effektivnosti tsentrobezhno-rotatsionnoy obrabotki v srede abraziva / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, YU.V. Korolkov, O.A. Rozhnenko // STIN. – 2009. – № 2. – S. 26–30.
11. Kravchenko, I.N. Obosnovaniye i vybor parametrov, kharakterizuyushchikh stepen razvitiya poverkhnosti posle abrazivostruynoy obrabotki / I.N. Kravchenko // Remont, vosstanovleniye, modernizatsiya. – 2014. – № 7. – S. 46–48.

**Bochkarev Petr Yuryevich**

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov  
Doctor of Technical Sciences, Head. Department «Design of technical and technological complexes»  
E-mail: bpy@sstu.ru

**Zakharov Oleg Vladimirovich**

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov  
doctor of technical sciences, professor of «Design of technical and technological complexes»  
E-mail: zov17@mail.ru

**Sklyarov Igor Anatolyevich**

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov  
graduate student of «Designing technical and technological complexes»

## РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ ЗЁРЕН ШЛИФОВАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ ЧЕРНОГО РАЗЛИЧНЫХ ЗЕРНИСТОСТЕЙ

*Рассмотрены закономерности распределения ширины зерен различных остатков на ситах и поддоне шлифовальных порошков карбида кремния черного, полученных рассевом на контрольных ситах по ГОСТ Р 52381. Зернистость шлифовальных порошков F36–F180. Ширину зерен измеряли фотометрическим методом. В результате статистического анализа установлено, что для большинства фракций ширина зерен подчиняется нормальному закону распределения. Полученные данные могут быть использованы при выборе зернистости абразивного инструмента и моделировании размеров зерен шлифовальных порошков.*

**Ключевые слова:** шлифовальный порошок, карбид кремния, ширина зерна, плотность распределения, нормальный закон, критерий Пирсона.

Зерна шлифовальных порошков, получаемые методом дробления, измельчения и отсева, могут иметь различную форму: округлую, плоскую, вытянутую, мечевидную и пр. [1, 2]. Каждое зерно обладает определенной формой и размерами, характеризуется значениями радиусов округления и углов заострения вершин, их количеством и прочими геометрическими параметрами. Размеры и форма зерна в совокупности с физическими, химическими и механическими свойствами определяют режущую способность, износостойкость абразивного инструмента, силу резания, температуру в зоне контакта и качество обработанной поверхности. Глубокое исследование механизма стружкообразования и всего процесса абразивной обработки невозможно без знания размеров и формы зёрен.

Рассматривая абразивное зерно как трехмерный объект, его геометрические размеры характеризуют тремя параметрами: длиной, шириной и высотой. Линейные размеры определяют в трех взаимно перпендикулярных направлениях. За длину  $l_3$  принимают наибольшее расстояние между крайними точками профиля зерна в горизонтальной плоскости. За ширину зерна  $b$  принимают ширину прямоугольника, условно описанного вокруг горизонтальной проекции зерна таким образом, чтобы большая сторона прямоугольника соответствовала наибольшей длине проекции зерна. Толщину зерна  $h_3$  определяют на фронтальной или профильной проекции зерна как расстояние от горизонтальной плоскости, на которой лежит зерно, до крайней точки профиля по нормали к горизонтальной плоскости [3–5].

Считается, что основным геометрическим параметром, контролируемым при расसेве на ситах, является ширина зерна, поэтому исследованию данного параметра уделяется наибольшее внимание [6–13]. В работах [6, 7] указано, что именно ширина определяет прохождение зерна в ячейку сита при разделении зерен на зернистости.

С учетом допуска на размер ячейки сита обоснованы наибольший и наименьший размеры ячеек контрольных сит, определяющие наибольший и наименьший размеры ширины зерен для зернистостей F36–F180 при расसेве на контрольных ситах по ГОСТ Р 52381 [8, 9].

Из первых работ по распределению размеров зерен шлифовальных материалов следует выделить статью Д.Б. Ваксера [3]. Методом зарисовки проекции зерен на рисовальном аппарате автор исследовал распределение ширины зерен электрокорунда белого и нормального, карбида кремния черного и зеленого зернистостью 46, 60 и 80 (ГОСТ 3648–47). От каждой зернистости соответствующего абразивного материала измерено около 1000 зерен. Представленные графические материалы свидетельствуют о возможности описания распределения ширины зерен нормальным законом.

В результате статистической обработки результатов измерения длины ширины и высоты 250 зерен электрокорунда белого марки 25А показано, что все рассмотренные параметры подчиняются закону нормального распределения [10].

Исследована морфология микрошлифпорошков карбида кремния зеленого зернистостью М14, М20 и М28 (ГОСТ 3647). В результате измерения фотометрическим методом около 5000 зерен показано, что ширина зерен в рассмотренных зернистостях подчиняется нормальному закону распределения [11, 12].

Распределение ширины зерен при рассеве шлифовального порошка на фракции рассмотрено в работах [13, 14]. Измерения геометрических параметров зерен выполнены фотометрическим методом, результаты измерений обработаны с использованием критериев математической статистики. На примере зернистости  $F60$  показано, что распределение ширины зерна, кроме остатка на поддоне, подчиняется нормальному закону.

Согласно ГОСТ Р 52381 контроль зернистости и зернового состава шлифовальных порошков осуществляется методом рассева на контрольных ситах. В связи с этим необходимо знать и распределение размеров зерен при рассеве на ситах. Большинство исследований рассматривают геометрические параметры зернистости в целом [3, 6, 7, 10, 14] или отдельных фракций [8, 9, 13–15].

Исходя из этого, цель работы заключалась в исследовании распределения ширины зерен шлифовальных порошков, полученных при рассеве на контрольных ситах по ГОСТ Р 52381, в широком интервале зернистостей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: измерить ширину зерен и исследовать её закон распределения; определить принадлежность рассмотренных выборок измерений ширины зерен к нормальному закону распределения.

Для исследований выбраны шлифовальные порошки карбида кремния черного марки 54С качества  $F$  (ГОСТ Р 52381) следующих зернистостей, серийно изготавливаемые на ОАО «Волжский абразивный завод»:  $F36$ ,  $F46$ ,  $F60$ ,  $F70$ ,  $F90$ ,  $F120$ ,  $F180$ . В результате рассева на контрольных ситах от каждой зернистости, кроме  $F46$ , получено по пять остатков на ситах и поддонах. При рассеве шлифовального порошка зернистостью  $F46$  масса остатка на поддоне была менее 0,1 г, поэтому данный остаток не рассматривали. Все исследуемые зернистости по зерновому составу соответствовали требованию ГОСТ Р 52381.

Всего исследовали 34 остатка шлифовального порошка. От каждого остатка методом квартования отобрано по одной пробе зерен для измерения их ширины. В каждой пробе объем выборки  $N$  составлял от 600 до 1500 зерен.

Принято следующее условное обозначение остатка  $Q$ :  $Q_i(FZ)$ , где  $i$  – порядковый номер контрольного сита при рассеве на котором получен данный остаток,  $Z$  – условное обозначение зернистости в мешах по ГОСТ Р 52381,  $\Delta Q$  – условное обозначение остатка на поддоне. Например,  $Q_2(F120)$  – остаток на контрольном сите 2 при рассеве шлифовального порошка зернистостью  $F120$ ,  $\Delta Q(F46)$  – остаток на поддоне при рассеве шлифовального порошка зернистостью  $F46$ .

Для оценки достоверности полученных результатов проведены повторные измерения следующих остатков шлифовальных порошков:  $Q_5(F36)$ ,  $Q_3(F46)$ ,  $Q_4(F60)$ ,  $Q_3(F70)$ ,  $Q_5(F70)$  и  $Q_3(F90)$ .

Всего с учетом основных и дополнительных проб измерено более 30000 зерен.

Ширину зерен измеряли фотометрическим методом [15] как сумму величин двух перпендикуляров, построенных от вектора длины зерна к максимально удаленным точкам с каждой стороны профиля. Погрешность определения ширины зерна составляет 3–5 %. Погрешность определения среднего значения ширины зерен в выборке не превышает 7 %.

При фотографировании партий зерен использовали камеру 5 Мпикс, в качестве эталона единицы длины – объект–микрометр (ГОСТ 7513). В результате визуального просмотра электронных фотографий из анализа исключали слипшиеся зерна. Обработка электронных

фотографий зерен и измерение их геометрических параметров осуществлялась специально разработанной программой «Зерно НМ» [16].

Для графической интерпретации результатов измерений определяли вариационный размах ширины зерен в каждой выборке и делили его на группы. Число групп  $n$  принимали равным 10...15. Вычисляли частоту  $m_i$  попадания измеренных значений ширины зерен в каждую размерную группу. Если в группе частота принимала значение меньше 9, её объединяли со следующей группой. Затем находили относительные частоты (частоты):

$$\omega_i = \frac{m_i}{N},$$

где  $N$  – объем выборки измерений.

Некоторые экспериментальные кривые плотности распределения приведены на рисунке 1.

Теоретические частоты вычисляли по уравнению плотности нормального распределения:

$$f_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{(b_i - \bar{b})^2}{2\sigma^2}\right)},$$

где  $i$  – номер размерной группы;

$b_i$  – среднее значение ширины зерен  $i$ -й размерной группы;

$\bar{b}$  – среднее значение ширины зерен выборки;

$\sigma^2$  – дисперсия ширины зерен выборки.

Приведенные теоретические частоты  $m_i^*$  и частоты  $\omega_i^*$  находили соответственно по формулам:

$$m_i^* = \frac{1}{\sum_{i=1}^n f_i} \cdot f_i \cdot N; \quad \omega_i^* = \frac{m_i^*}{N},$$

где  $n$  – число групп.

Графики плотности распределения основной (рисунок 1 а, б, в) и повторной (рисунок 1 е) серий приближаются по форме к симметричным колоколообразным кривым, что свидетельствует о возможности соответствия нормальному закону распределения. Кривые плотности распределения на рисунке 1, г, д имеют несимметричный вид: левая ветвь распределения более пологая. Об этом свидетельствуют и результаты расчетов коэффициентов асимметрии. Для данных, представленных на рисунке 1, г, д, коэффициенты асимметрии равны соответственно  $-0,199$  и  $-0,583$ , что свидетельствует об отрицательной асимметрии распределения.

Нулевую гипотезу о соответствии распределения параметра  $b$  нормальному закону оценивали по критерию Пирсона на уровне значимости 0,05. Расчетные значения критерия Пирсона вычисляли по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - m_i^*)^2}{m_i^*}.$$

Критическое значение критерия Пирсона  $\chi^2_{кр}$  находили для принятого уровня значимости и числа степеней свободы  $k=n-1-r$ , где  $r=2$  – число параметров нормального распределения [17].

В таблице 1 приведены результаты расчета критерия Пирсона по данным основной серии измерений. Жирным шрифтом выделены расчетные значения критерия Пирсона, превышающие табличное значение. Для данных выборок измерений нулевая гипотеза о соответствии распределения ширины зерна нормальному закону не подтверждается.

Таблица 1 – Расчетные  $\chi^2$  и табличные  $\chi^2_{кр}$  значения критерия Пирсона (основная серия измерений)

Зернистость	$\chi^2$					$\chi^2_{кр}$
	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	$\Delta Q$	
F36	7,9	9,6	F36	7,9	9,6	F36
F46	11,3	8,3	11,6	<b>47,6</b>	–	18,3
F60	5	8,7	9,5	12	<b>33,5</b>	19,7
F70	<b>30,5</b>	15,8	6	5,6	14,3	16,9
F90	8,3	4,3	12,6	<b>98,3</b>	11,8	15,5
F120	13,5	8,7	3,7	0,7	15,8	18,3
F180	16,4	14,9	13,6	18	15,6	18,3

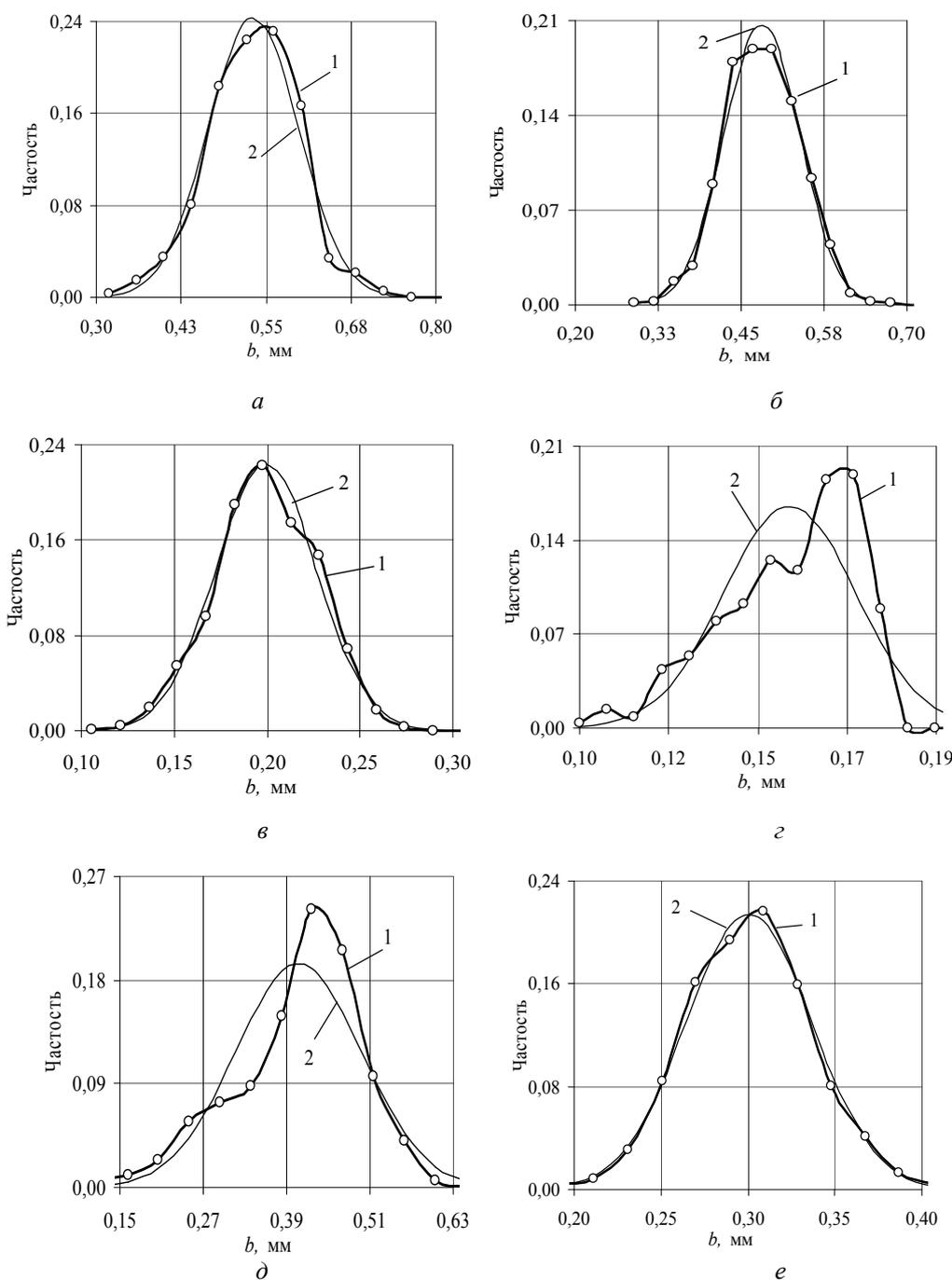


Рисунок 1 – Плотность распределения ширины зерна  $b$  зёрен илифосфальных порошков: а – Q<sub>5</sub>(F36), б – Q<sub>3</sub>(F46), в – Q<sub>3</sub>(F90); г – Q<sub>5</sub>(F90), д –  $\Delta Q$ (F36); е – Q<sub>3</sub>(F70), повторные измерения; 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретическая кривая распределения

Ширина зерен в большинстве случаев (85 % всех выборок) подчиняется нормальному закону распределения. Не подчиняются нормальному закону следующие выборки измерений:  $\Delta Q$  (F36);  $Q_5$  (F46);  $\Delta Q$  (F60);  $Q_2$  (F70);  $Q_5$  (F90). Из данных, представленных на рисунке 1, нормальному закону распределения соответствуют значения ширины зерен остатков  $Q_5$ (F36),  $Q_3$  (F46),  $Q_3$  (F90), показанные на рисунке 1, а–в.

В результате обработки данных повторных измерений установлено, что во всех случаях распределение ширины зерен соответствует нормальному закону (таблица 2), что полностью согласуется с результатами, представленными в таблице 1.

Таблица 2 – Расчетные  $\chi^2$  и табличные  $\chi^2_{кр}$  значения критерия Пирсона (повторные измерения)

Остаток	$\chi^2$	$\chi^2_{кр}$
$Q_5 F36$	4,5	16,9
$Q_3 F46$	15,0	16,9
$Q_4 F60$	5,9	21,0
$Q_3 F70$	2,7	16,9
$Q_5 F70$	0,8	19,7
$Q_3 F90$	13,7	19,7

Результаты измерения ширины зерен шлифовальных порошков из карбида кремния черного марки 54С семи зернистостей в диапазоне от F180 до F36, предварительно рассеянных на контрольных ситах по ГОСТ Р 52381, позволяют сделать следующие выводы:

- графики частостей ширины зерен 34 выборок объемом от 600 до 1500 зерен в каждой, отобранных методом квартования из остатков шлифовальных порошков на контрольных ситах и поддоне, представлены колоколообразными кривыми, что свидетельствует о приближении распределения ширины зерен в данных выборках к нормальному закону распределения;
- проверки гипотезы о нормальном законе распределения ширины зерен по критерию согласия Пирсона показали, что 85 % представленных выборок измерений на уровне значимости 0,05 соответствуют нормальному закону распределения; полное соответствие нормальному закону распределения установлено для ширины зерен шлифовальных порошков, оставшихся при рассеивании на 3 и 4 контрольных ситах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаршин, А.П. Абразивные материалы и инструменты. Технология производства: Учебное пособие / А.П. Гаршин, С.М. Федотова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 1010 с.
2. Искусственные абразивные материалы под микроскопом. Л.: Недра. – 1981. – 160 с.
3. Ваксер, Д.Б. Исследование геометрии и размеров абразивного зерна // «Абразивы». – 1956. – № 16. – С. 3–15.
4. Бакуль, В.Н. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / В.Н. Бакуль и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
5. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. – М.: «Машиностроение», 1977.
6. Лавров, И.В. Закономерности геометрии частиц измельченных материалов // Абразивы и алмазы. – 1965. – № 6. – С. 17–22.
7. Кошин, А.А. Исследование гранулометрического состава и микрогеометрических показателей абразивных зёрен шлифовальных кругов, применяемых в обдирочном шлифовании. / А.А. Кошин, А.В. Сопельцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2010. – № 10(186). – С. 77–82.
8. Носенко, В.А. Определение проходного и непроходного размера ширины зёрен в пробах при рассеивании шлифовального порошка 54CF60 на контрольных ситах / В.А. Носенко, А.А. Александров // Вісник СевНТУ. – 2014. – № 150. – С. 102–106.

9. Носенко, В.А. Определение проходного и непроходного размера ширины зёрен в пробах при расфасовке шлифовального порошка 54CF46 на контрольных ситах / Носенко В.А., Александров А.А. // Вестник Рыбинской гос. авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. – 2014. – № 1. – С. 44–48.

10. Михайлов, М.И. Влияние абразивосодержащего наполнителя на прочность композиционного материала на основе латуни / М.И. Михайлов, Д.В. Никитенко, В.А. Куземченко // Вестник Гомельского ГТУ им. П.О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 35–43.

11. Носенко, В.А. Статистические параметры геометрических размеров зерен микрошлифпорошков карбида кремния / В.А. Носенко, И.А. Макушкин, А.А. Шегай // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2011. – № 13. – С. 32–34.

12. Носенко, В.А. Технология шлифования: монография / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 424 с.

13. Носенко, В.А. Исследование распределения геометрических параметров фракций шлифовального порошка 54CF60 и их принадлежности к нормальному закону / В.А. Носенко, А.А. Александров // Наука и образование в современной конкурентной среде. Материалы Международной научно-практической конференции: в 3-х частях. – Уфа. – 2014. – С. 123–129.

14. Носенко, В.А. Геометрические параметры зёрен шлифовального порошка карбида кремния чёрного 54CF60 производства Волжского абразивного завода [Электронный ресурс] / Носенко В.А., Александров А.А., Ганшу Е.Ф. // Современные проблемы науки и образования: электрон. науч. журнал / РАЕ. – 2014. – № 3. – URL: <http://www.science-education.ru/117-12798>.

15. Носенко, В.А. Методика и некоторые результаты исследования геометрических параметров порошков из карбида кремния / В.А. Носенко, И.А. Макушкин, К.А. Букштанович // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4-2 (288). – С. 125–130.

16. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011610144, 11.01.11. Программа для автоматизированного определения геометрических параметров шлифовального зерна по фотографии «Зерно НМ ВПИ» / В.А. Носенко, А.А. Рыбанов, И.А. Макушкин, А.А. Шегай, К.А. Букштанович. ВолгГТУ, 2011.

17. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.

### Носенко Владимир Андреевич

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ), г. Волжский

Доктор технических наук, профессор, зам. директора по учебной работе, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» ВПИ 404121, ул. Энгельса, 42а, г. Волжский Волгоградской обл., Россия

Тел.: 8 (8443) 38-68-34; 8-904-403-31-74

E-mail: [nosenko@volpi.ru](mailto:nosenko@volpi.ru)

### Александров Алексей Александрович

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Волжский

Аспирант ВолгГТУ

404111, ул. Молодежная д.2, кв.20, г. Волжский Волгоградской обл., Россия

Тел.: 8-961-065-86-30

E-mail: [alexalexal2011@yandex.ru](mailto:alexalexal2011@yandex.ru)

V.A. NOSENKO, A.A. ALEKSANDROV

## WIDTH DISTRIBUTION OF GRAIN GRINDING POWDERS SILICON CARBIDE BLACK DIFFERENT GRITS

*The characteristics of the distribution of different width grain residues on the sieves and pan of black silicon carbide grinding powders F36–F180, obtained by sieving on control sieves according to GOST R 52381 are considered. The width of the grain was measured by photometric method. As a result of the statistical analysis found that for most fractions of the width of the grain is subject to the normal distribution law. The data obtained can be used in selecting the abrasive grain of the tool and simulating the grain size of grinding powders.*

**Keywords:** grinding powder, abrasive grain width, distribution law, Pearson criterion.

### BIBLIOGRAPHY

1. Garshin, A.P. Abrazivnyye materialy i instrumenty. Tekhnologiya proizvodstva: Uchebnoye posobiye / A.P. Garshin, S.M. Fedotova. – SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2008. – 1010 s.
2. Iksusstvennyye abrazivnyye materialy pod mikroskopom. L.: Nedra. – 1981. – 160 s.

3. Vakser, D.B. Issledovaniye geometrii i razmerov abrazivnogo zerna // «Abrazivy». – 1956. – № 16. – S. 3–15.
4. Bakul, V.N. Osnovy proyektirovaniya i tekhnologiya izgotovleniya abrazivnogo i almaznogo instrumenta / V.N. Bakul i dr. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 296 s.
5. Abrzivnaya i almaznaya obrabotka materialov. Spravochnik. Pod red. d-ra tekhn. nauk prof. A.N. Reznikova. – M.: «Mashinostroyeniye», 1977.
6. Lavrov, I.V. Zakonomernosti geometrii chastits izmelchennykh materialov // Abrzivy i almazy. – 1965. – № 6. – S. 17–22.
7. Koshin, A.A. Issledovaniye granulometricheskogo sostava i mikrogeometricheskikh pokazateley abrazi-vnykh zoren shlifovalnykh krugov, primenyayemykh v obdirochnom shlifovanii. / A.A. Koshin, A.V. Sopeltsev // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. – 2010. – № 10(186). – S. 77–82.
8. Nosenko, V.A. Opredeleniye prokhdnogo i neprokhodnogo razmera shiriny zoren v probakh pri rasseve shlifovalnogo poroshka 54CF60 na kontrolnykh sitakh / V.A. Nosenko, A.A. Aleksandrov // Visnik SevNTU. – 2014. – № 150. – S. 102–106.
9. Nosenko, V.A. Opredeleniye prokhdnogo i neprokhodnogo razmera shiriny zoren v probakh pri rasseve shlifovalnogo poroshka 54CF46 na kontrolnykh sitakh / Nosenko V.A., Aleksandrov A.A. // Vestnik Rybinskoy gos. aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solovyova. – 2014. – № 1. – C. 44–48.
10. Mikhaylov, M.I. Vliyaniye abrazivosoderzhashchego napolnitelya na prochnost kompozitsionnogo materi-ala na osnove latuni / M.I. Mikhaylov, D.V. Nikitenko, V.A. Kuzemchenko // Vestnik Gomelskogo GTU im. P.O. Su-khogo. – 2012. – № 3. – S. 35–43.
11. Nosenko, V.A. Statisticheskiye parametry geometricheskikh razmerov zoren mikroshlifporoshkov karbida kremniya / V.A. Nosenko, I.A. Makushkin, A.A. Shegay // Izv. VolgGTU. Seriya «Progressivnyye tekhnologii v mashinostroyenii». Vyp. 7: mezhvuz. sb. nauch. st. / VolgGTU. – Volgograd. – 2011. – № 13. – C. 32–34.
12. Nosenko, V.A. Tekhnologiya shlifovaniya: monografiya / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko. – VPI (filial) VolgGTU. – Volgograd, 2011. – 424 s.
13. Nosenko, V.A. Issledovaniye raspredeleniya geometricheskikh parametrov fraktsiy shlifovalnogo poroshka 54SF60 i ikh prinadlezhnosti k normalnomu zakonu / V.A. Nosenko, A.A. Aleksandrov // Nauka i obrazovaniye v sovremennoy konkurentnoy srede. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 3-kh chastyakh. – Ufa. – 2014. – S. 123–129.
14. Nosenko, V.A. Geometricheskiye parametry zoren shlifovalnogo poroshka karbida kremniya chornogo 54CF60 proizvodstva Volzhskogo abrazivnogo zavoda [Elektronnyy resurs] / Nosenko V.A., Aleksandrov A.A., Gan-shu Ye.F. // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya: elektron. nauch. zhurnal / RAYe. – 2014. – № 3. – URL: <http://www.science-education.ru/117-12798>.
15. Nosenko, V.A. Metodika i nekotoryye rezultaty issledovaniya geometricheskikh parametrov poroshkov iz karbida kremniya / V.A. Nosenko, I.A. Makushkin, K.A. Bukshtanovich // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 4–2 (288). – S. 125–130.
16. Svid. o gos. registratsii programmy dlya EVM № 2011610144, 11.01.11. Programma dlya avtomatizirovannogo opredeleniya geometricheskikh parametrov shlifovalnogo zerna po fotografii «Zerno NM VPI» / V.A. Nosenko, A.A. Rybanov, I.A. Makushkin, A.A. Shegay, K.A. Bukshtanovich. VolgGTU, 2011.
17. Gmurman, V.Ye. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. – M.: Vyssh. shk, 2003. – 479 s.

**Nosenko Vladimir Andreevich**

Volzhsky Politechnical Institute (branch) Volgograd State Technical University

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department «Technology and equipment in engineering industries» VPI

404121, st. Engels, 42a, Volzhsky Volgograd region., Russia

Tel: 8-904-403-31-74

E-mail: [nosenko@volpi.ru](mailto:nosenko@volpi.ru)

**Alexandrov Alexey Alexandrovich**

Volzhsky Politechnical Institute (branch) Volgograd State Technical University

Postgraduate student

404111, st. Molodezhnaya, 2, ap.20, Volzhsky Volgograd region., Russia

Tel: 8-961-065-86-30

E-mail: [alexalexal2011@yandex.ru](mailto:alexalexal2011@yandex.ru)

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 615.832.9

И.Н. НОВИКОВА, Е.В. ИСКОРОСТИНСКИЙ, Н.Е. ИСКОРОСТИНСКИЙ, А.В. ДУНАЕВ

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЩЕЙ ВОЗДУШНОЙ КРИОТЕРАПИИ НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНО–ТКАНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА**

*В данной работе с использованием неинвазивных оптических методов лазерной доплеровской флоуметрии, оптической тканевой оксиметрии и пульсоксиметрии исследовано влияние общей воздушной криотерапии (ОВКТ) на параметры микроциркуляторно–тканевых систем (МТС) организма человека. Описана методика проведения экспериментов, проведен детальный анализ колебаний кровотока, оценена динамика изменения измеренных и расчетных комплексных параметров тканевого дыхания. Выявлены статистически значимые изменения значений параметров МТС сразу после проведения процедуры криотерапии по отношению к значениям до ОВКТ, а также их полное восстановление через 15–20 мин у большинства исследуемых добровольцев.*

**Ключевые слова:** неинвазивная диагностика, лазерная доплеровская флоуметрия, оптическая тканевая оксиметрия, пульсоксиметрия, микроциркуляторно–тканевые системы, общая воздушная криотерапия.

В настоящее время для улучшения общего состояния организма человека и лечения многих заболеваний в физиотерапии применяют различные природные и искусственно создаваемые физические факторы [1]. Одной из областей физиотерапии является низкотемпературная терапия (криотерапия), получившая развитие благодаря исследованиям японских и немецких учёных, которые впервые предложили использовать сверхнизкие температуры при лечении заболеваний организма человека, а также провели сравнительную оценку эффективности применения различных хладогентов [2, 3].

Данный вид физиотерапии в зависимости от степени охлаждения, достигаемого при помощи различных хладоносителей, а также в зависимости от площади тела, подвергаемого воздействию, имеет свои разновидности [4]. Наибольший интерес в медицинской практике представляет общая криотерапия, которая относится к стрессогенным физиотерапевтическим процедурам и заключается в воздействии жидкими, чаще газообразными хладогентами для отведения тепла от всей поверхности тела человека. Холодовое воздействие, воспринимаемое организмом как кратковременно действующий стресс, по результатам исследований вызывает значительное изменение температуры тела [5, 6], биохимического состава крови и её реологических свойств [7], оказывает влияние на работу сердечно–сосудистой системы [8], центральной и вегетативной нервной системы, приводит к активации обменных процессов, улучшению состояния антиоксидантных систем и липидного профиля [9, 10], тем самым вызывая повышение неспецифической резистивности организма.

Таким образом, в процессе проведения процедуры под влиянием холодового фактора происходит быстрое снижение температуры (охлаждение) пойкилотермной «оболочки», в состав которой входят кожа, подкожная клетчатка и ткани конечностей, в пределах криоустойчивости (до 5–10 °С), при сохранной температуре гомеотермного «ядра», что обеспечивает отсутствие выраженных сдвигов терморегуляции организма. В результате охлаждения происходит активация рефлекторного и гуморально–гормонального звеньев организма, которые включают в себя афферентные и эфферентные сигналы, воспринимающий центр, гуморальные агенты и нейрогормоны, продуцируемые эндокринными железами и нейронами, а также усиление биохимических, биофизических реакций и метаболических процессов, протекающих на тканевом, клеточном и молекулярном уровнях. Несмотря на интенсивное внедрение данных технологий в медицинскую практику в настоящее время продолжают исследовать

дования, направленные на более детальное изучение влияния общей воздушной криотерапии на функционирование отдельных систем организма человека и его состояние в целом, а также для оценки эффективной длительности проведения процедур.

Целью данной работы явилось исследование влияния общей воздушной криотерапии на изменение значений параметров микроциркуляторно–тканевых систем (МТС) организма человека для оценки эффективности и корректировки длительности процедуры.

В настоящее время для исследования МТС организма человека широко применяют неинвазивные оптические технологии, такие как лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ), оптическая тканевая оксиметрия (ОТО) и пульсоксиметрия (ПО), которые совместно с различными функциональными пробами, позволяют получить более полную информацию о состоянии организма, его резервных и адаптивных возможностях [11, 12].

Для выявления изменений параметров МТС организма человека после проведения процедуры ОВКТ были проведены тестовые экспериментальные исследования с использованием методов ЛДФ, ОТО и ПО. В исследованиях приняли участие 6 условно–здоровых добровольцев – 5 мужчин и 1 женщина (в возрасте от 14 до 67 лет). Измерения проводились на коже с артерио–венными анастомозами (АВА) на ладонной поверхности дистальной фаланги 3–го пальца кисти правой руки, в условиях физического и психического покоя через 2 часа после приема пищи с предварительной адаптацией испытуемых к температуре помещения 20–23 °С (только для случая регистрации начальных данных до ОВКТ) в положении сидя, правое предплечье на столе на уровне сердца. Исследования выполнялись с использованием лазерного анализатора микроциркуляции крови для врача общей практики «ЛАКК–ОП» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва), представленного на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Внешний вид лазерного анализатора микроциркуляции крови для врача общей практики «ЛАКК–ОП» (а) и расположение оптических датчиков на пальцах рук добровольца во время проведения исследований (б)**

Лазерный анализатор предназначен для исследования МТС организма человека путём одновременного использования методов ЛДФ с длиной волны лазерного зондирования 1064 нм, ОТО с длинами волн излучения 530 нм и 630 нм и пульсоксиметрии. Для частотного анализа различных ритмов периферического кровотока (эндотелиальных, нейрогенных, миогенных, дыхательных и сердечных колебаний [13]) зарегистрированных ЛДФ– и ОТО–грамм применялась программа LDF 2.3.514.602, которая реализует непрерывное вейвлет–преобразование с использованием в качестве анализирующего вейвлета комплекснозначный вейвлет Морле [14].

В один день на одном добровольце проводилась только одна процедура ОВКТ, длительность которой составляла от 2 до 2,5 мин. Процедура ОВКТ осуществлялась в охлаждении организма человека до температуры –(150–170) °С с помощью азотно–воздушной смеси криосауны «КАЭКТ–01» (ООО НПП «КРИОН», г. Санкт–Петербург), представленной на рисунке 2. На сегодняшний день существует большой спектр криотерапевтических установок и систем, реализующих различные принципы действия [15]. Данная модель рассчитана на од-

ного пациента и состоит из кабины открытого типа, сосуда Дьюара на 40 л жидкого азота и системы подачи парожидкостной струи азота в кабину.



Рисунок 2 – Внешний вид криосауны «КАЭКТ-01»

Регистрацию параметров МТС в виде записи базового теста (БТ) осуществляли до начала проведения процедуры криотерапии (БТ1), сразу после (БТ2) и через 15–20 мин после её окончания (БТ3). Длительность БТ составляла 3 мин. Всего было проведено 34 эксперимента и зарегистрировано 102 БТ. В процессе проведения экспериментальных исследований производилась регистрация основных параметров МТС организма человека, а именно: показателя микроциркуляции крови ( $I_m$ ), тканевой сатурации ( $S_tO_2$ ), уровня объёмного кровенаполнения ткани ( $V_b$ ) и сатурации артериальной крови ( $S_aO_2$ ).

На рисунке 3 представлены примеры регистрации ЛДФ– и ОТО–грамм и их амплитудно–частотные спектры до и после проведения процедуры криотерапии. Как видно, данное физиотерапевтическое воздействие вызывает значительное изменение основных регистрируемых параметров МТС.

По методике [16, 17], основанной на анализе амплитуд колебаний кровотока и тканевой сатурации, определяли показатель экстракции кислорода ( $OE$ ):

$$OE = (S_aO_2 - S_vO_2) / S_aO_2, \quad (1)$$

где  $S_vO_2$  – сатурация венозной крови.

Для определения значений сатурации венозной крови были проанализированы амплитуды колебаний, связанные с пассивными механизмами регуляции тканевой сатурации ( $S_tO_2$ ), а именно: амплитуды сердечных  $A(S_tO_2)_c$  и дыхательных  $A(S_tO_2)_d$  осцилляций. Если  $A(S_tO_2)_c / A(S_tO_2)_d > 1$ , то сатурация венозной крови рассчитывалась следующим образом:

$$S_vO_2 = \frac{S_tO_2}{A(S_tO_2)_c / A(S_tO_2)_d}, \quad (2)$$

где  $A(S_tO_2)_c$ ,  $A(S_tO_2)_d$  – максимальные амплитуды колебаний тканевой сатурации кардиального (0,8–1,6 Гц) и дыхательного (0,2–0,4 Гц) генеза.

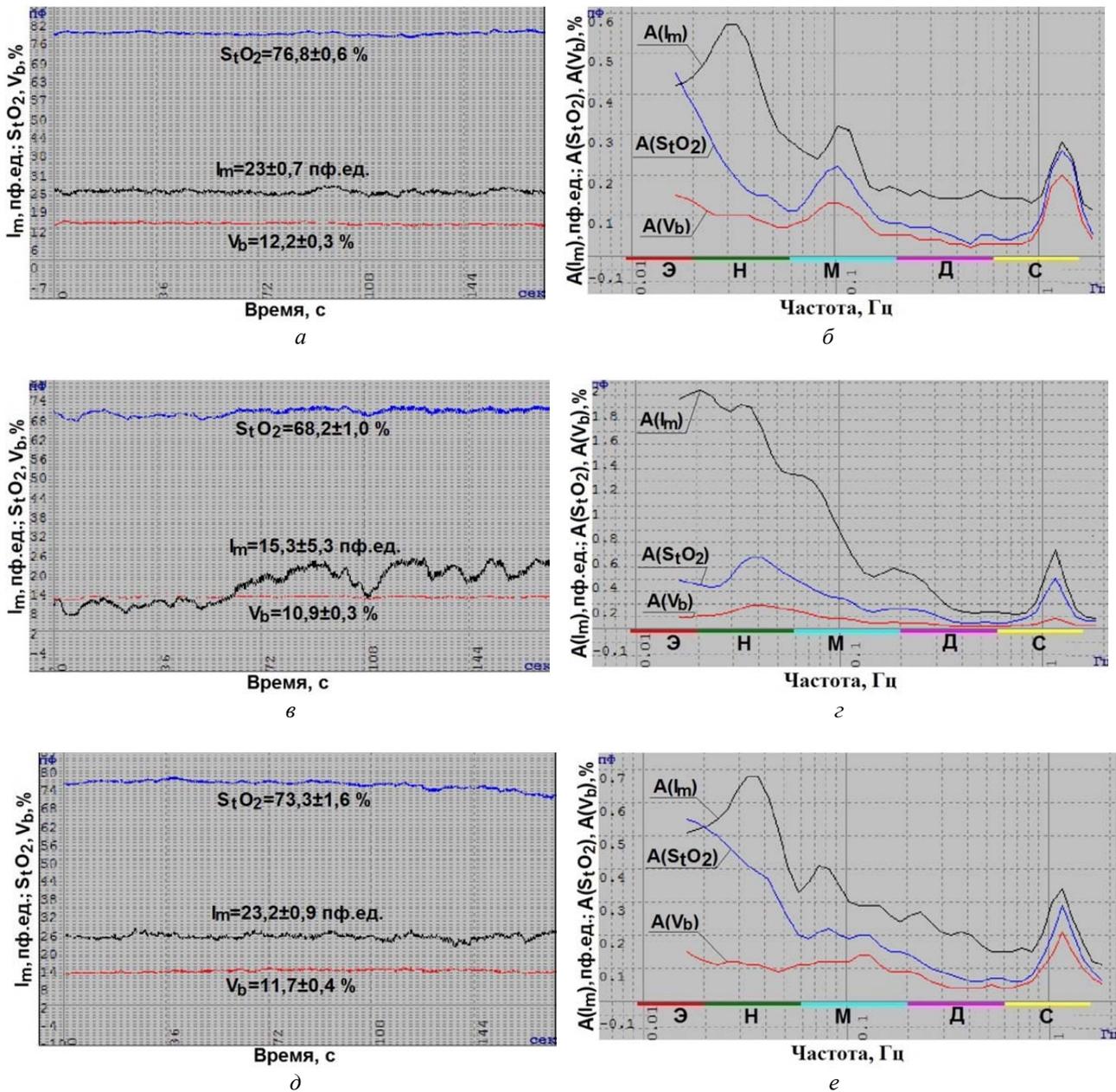


Рисунок 3 – Примеры регистрации ЛДФ– и ОТО–грамм и их амплитудно–частотные спектры до (а, б), сразу после (в, г) и через 15–20 мин после (д, е) проведения процедуры:

Э – эндотелиальные, Н – нейрогенные, М – миогенные, Д – дыхательные, С – сердечные ритмы

В случае резонанса колебаний тканевой сатурации, связанных с активными механизмами регуляции, когда высокоамплитудные осцилляции наблюдаются только в одном из них на фоне резкого угнетения колебаний в других диапазонах и снижения их амплитуд, расчет  $S_vO_2$  имеет ряд особенностей. В случае резонанса осцилляций в общем миогенном (0,047–0,145 Гц) или дыхательном диапазонах, сатурация венозной крови рассчитывалась следующим образом:

$$S_vO_2 = \frac{S_tO_2}{BI(S_tO_2)}, \quad (3)$$

где  $BI(S_tO_2)$  – показатель шунтирования (ПШ), рассчитываемый по  $S_tO_2$ –грамме:

$$BI(S_tO_2) = 1 + \frac{A(S_tO_2)_н}{A(S_tO_2)_м}, \quad (4)$$

где  $A(S_tO_2)_н$ ,  $A(S_tO_2)_м$  – амплитуды колебаний тканевой сатурации в нейрогенном (0,021–0,046 Гц) и миогенном диапазонах.

Скорость потребления кислорода ( $OC$ ) рассчитывалась на основании анализа колебаний ЛДФ–грамм и рассчитанного ранее значения венозной сатурации:

$$OC = I_{mnutr} \cdot (S_a O_2 - S_v O_2), \quad (5)$$

где  $I_{mnutr}$  – доля нутритивного кровотока в общем микрокровотоке:

$$I_{mnutr} = I_m / BI(I_m), \quad (6)$$

где  $I_m$  – среднее значение перфузии;

$BI(I_m)$  – показатель шунтирования, рассчитываемый по ЛДФ–грамме в свою очередь по формуле:

$$BI(I_m) = BI(I_m)_1 + BI(I_m)_2. \quad (7)$$

Составляющая  $BI(I_m)_1$  рассчитывалась по формуле (4) с использованием данных перфузии ( $I_m$ ). В случае доминирования осцилляций кровотока, связанных с эндотелиальными механизмами регуляции, при расчете показателя шунтирования амплитуда колебаний нейрогенного генеза ( $A_n$ ) заменялась на амплитуду колебаний, связанных с эндотелиальными механизмами ( $A_s$ ).

$BI(I_m)_2$  рассчитывалась по следующей формуле:

$$BI(I_m)_2 = A(I_m)_{nacc} / A(I_m)_m, \quad (8)$$

где  $A(I_m)_{nacc}$  – максимальная амплитуда колебаний кровотока, связанная с пассивными механизмами регуляции (осцилляции сердечного или дыхательного генеза).

$BI(I_m)_2$  учитывалась при расчете показателя шунтирования, если  $BI(I_m)_2 \geq 1$  [16].

Для оценки колебательного компонента микрососудистого тонуса определялись величины эндотелиального ( $ET$ ), нейрогенного ( $NT$ ) и миогенного ( $MT$ ) тонусов по следующим формулам [18]:

$$ET = \sigma / A(I_m)_s, \quad (9)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) показателя микроциркуляции крови ( $I_m$ );  $A(I_m)_s$  – наибольшее значение амплитуды колебаний перфузии в эндотелиальном диапазоне;

$$NT = \sigma / A(I_m)_n, \quad (10)$$

где  $A(I_m)_n$  – наибольшее значение амплитуды колебаний перфузии в нейрогенном диапазоне;

$$MT = \sigma / A(I_m)_m, \quad (11)$$

где  $A(I_m)_m$  – наибольшее значение амплитуды колебаний перфузии в миогенном диапазоне.

На основании зарегистрированных данных производился расчет комплексных параметров МТС организма человека, а именно индексов удельного потребления кислорода в ткани согласно двум различным подходам [16]:

$$U_1 = S_a O_2 / S_t O_2, \quad (12)$$

$$U_2 = (S_a O_2 - S_t O_2) / V_b. \quad (13)$$

Индекс удельного потребления кислорода в ткани (с учётом нутритивного кровотока) определялся следующим образом [19]:

$$I = (S_a O_2 / S_t O_2) \cdot I_{mnutr}. \quad (14)$$

Индекс относительной перфузионной сатурации кислорода в микрокровотоке характеризует связь между потоком крови (перфузией) в микроциркуляторном русле и непотребленным тканями кислородом, т.е. находится в обратной зависимости от потребления кислорода тканью. Данный параметр рассчитывался следующим образом:

$$S_m = S_t O_2 / I_m. \quad (15)$$

Как известно, параметры МТС организма человека обладают пространственной и временной вариабельностью [19], оценка изменения которой является важной характеристикой уровня жизнедеятельности тканей и должна учитываться при интерпретации результатов исследований системы микроциркуляции крови. Был проведен анализ изменений значений зарегистрированных и расчетных параметров МТС организма человека, полученные данные статистически обработаны с применением критерия Манна–Уитни [20]. Оценены различия

значений анализируемых параметров до проведения процедуры криотерапии (БТ1), сразу после окончания процедуры (БТ2) и к завершению (через 15 мин) исследования (БТ3). Результаты экспериментальных исследований изменений параметров МТС организма человека при проведении процедуры ОВКТ по всем условно-здоровым добровольцам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований по всем добровольцам

№ п/п	Параметр	Базовые тесты		
		БТ №1 (n=34)	БТ №2 (n=34)	БТ №3 (n=34)
1	$I_m$ , пф.ед.	21,6±1,6	15,0±4,9*	20,3±4,0
2	$S_tO_2$ , %	70,4±8,0	61,7±7,9*	68,2±5,8
3	$V_b$ , %	10,6±2,4	9,6±2,4	10,2±2,2
4	$S_aO_2$ , %	98,8±0,4	98,7±0,5	98,8±0,3
5	$BI(S_tO_2)$ , отн.ед.	2,9±1,1	3,2±1,1	3,7±2,0
6	$BI(I_m)$ , отн.ед.	2,9±1,3	3,4±1,6	2,9±1,2
7	$S_vO_2$ , %	22,6±11,7	27,2±11,2	23,8±12,4
8	$ET$ , отн.ед.	2,14±0,75	2,66±1,17*	1,98±0,90
9	$NT$ , отн.ед.	1,97±0,67	2,87±1,03*	2,10±1,01
10	$MT$ , отн.ед.	2,86±1,38	4,45±2,83*	2,81±1,02
11	$I_{mnutr}$ , пф.ед.	8,4±2,9	5,4±2,9*	8,5±4,6
12	$U_1$ , отн.ед.	1,4±0,2	1,6±0,2	1,5±0,1
13	$U_2$ , отн.ед.	2,8±0,9	4,3±2,4	3,3±1,2
14	$I$ , пф.ед.	11,9±4,4	9,0±5,4	12,6±7,2
15	$S_m$ , отн.ед.	3,3±0,5	4,6±1,9*	3,6±1,5
16	$OE$ , отн.ед.	0,77±0,12	0,73±0,11	0,76±0,13
17	$OC$ , отн.ед.	627,2±208,6	390,3±216,2*	643,5±357,4

\* – статистическая значимость различий значений показателей после проведения криотерапии по отношению к значениям до воздействия с  $p < 0,05$  по критерию Манна–Уитни.

Как видно из полученных данных, воздействие азотно-воздушной смесью, температура которой составляет  $-(150-170)^\circ\text{C}$ , приводит к значительным изменениям параметров МТС организма человека. Через 2–2,5 мин общего воздействия в результате охлаждения тела происходит снижение температуры кожи (до температуры в пределах криоустойчивости) и раздражение холодовых рецепторов. В результате происходит активация адренергических симпатических нервных волокон [18], что приводит к активации колебаний кровотока симпатического диапазона. Возрастание амплитуд низкочастотных осцилляций и увеличение миогенного тонуса ( $MT_1 = 2,86 \pm 1,38$  отн.ед.,  $MT_2 = 4,45 \pm 2,83$  отн.ед.) вызывает сужение просвета мелких периферических сосудов, прекапиллярных сфинктеров, уменьшение периферического кровообращения ( $I_{m1} = 21,6 \pm 1,6$  пф.ед.,  $I_{m2} = 15,0 \pm 4,9$  пф.ед.) и величины нутритивного кровотока ( $I_{mnutr1} = 8,4 \pm 2,9$  пф.ед.,  $I_{mnutr2} = 5,4 \pm 2,9$  пф.ед.), что может свидетельствовать о перемещении крови во внутренние органы, т.е. о централизации кровообращения. В результате данных процессов происходит снижение скорости потребления кислорода ( $OC_1 = 627,2 \pm 208,6$  отн.ед.,  $OC_2 = 390,3 \pm 216,2$  отн.ед.). Сужение просвета сосудов, вызванное действием хладагента, является одной из двух защитных фаз сосудистой реакции на охлаждение, обеспечивая предотвращение проникновения холодового фактора на кожные покровы и подкожную клетчатку к глубоко лежащим внутренним органам и системам организма. Данная фаза сосудистой реакции может длиться в течение 20 мин после окончания процедуры [21, 22].

Как показывают полученные результаты, через 15–20 мин после процедуры ОВКТ у большинства исследуемых происходит нормализация колебаний кровотока, миогенный тонус прекапилляров уменьшается ( $MT_3 = 2,81 \pm 1,02$  отн.ед.), приближаясь к значению до проведения криотерапии, происходит выраженное расширение периферических сосудов, увеличение кровообращения, в результате чего происходит увеличение показателя микроциркуляции ( $I_{m3} = 20,3 \pm 4,0$  пф.ед.), величины нутритивного кровотока ( $I_{mnutr3} = 8,5 \pm 4,6$  пф.ед.) и скорости потребления кислорода ( $OC_3 = 643,5 \pm 357,4$  отн.ед.). Данный процесс приводит к активации артериальной гиперемии и является второй защитной фазой сосудистой реакции. Дан-

ная фаза, являясь компенсаторной, способствует усиленному теплообразованию, тем самым препятствуя ишемии и нарушению питания тканей. Длительность второй фазы может составлять от 1 до 3 ч [22, 23]. Благодаря расширению кожных сосудов во вторую фазу сосудистой реакции происходит снижение общего периферического сопротивления, в результате чего происходит уменьшение нагрузки на сердце.

Однако также было выявлено, что индивидуальные реакции МТС организма человека на процедуру криотерапии могут различаться. Так, например, у одного из добровольцев (мужчина 64 лет) после проведения ОВКТ не происходило значимых изменений параметров МТС, а именно – показателя микроциркуляции ( $I_{m1} = 23,4$  пф.ед.,  $I_{m2} = 19,2$  пф.ед. и  $I_{m3} = 22,2$  пф.ед.), миогенного тонуса ( $MT_1 = 3,79$  отн.ед.,  $MT_2 = 3,56$  отн.ед. и  $MT_3 = 5,08$  отн.ед.), величины нутритивного кровотока ( $I_{mnutr1} = 4,2$  пф.ед.,  $I_{mnutr2} = 3,6$  пф.ед. и  $I_{mnutr3} = 4,3$  пф.ед.), скорости потребления кислорода ( $OC_1 = 373,9$  отн.ед.,  $OC_2 = 314,0$  отн.ед. и  $OC_3 = 374,7$  отн.ед.) и других параметров, что может быть связано со снижением резервных и адаптивных возможностей МТС вследствие их возрастных изменений.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных данных показал, что в процессе проведения общей воздушной криотерапии ввиду различных адаптационных резервов организма человека происходят разнообразные изменения параметров микроциркуляторно–тканевых систем вследствие активации рефлекторных и гуморально–гормонального звеньев организма, а также усиления биохимических, биофизических реакций и метаболических процессов. Очевидно, что данные изменения необходимо учитывать при оценке эффективности и для корректировки длительности процедуры, что позволяет индивидуализировать ОВКТ. В дальнейшем, на наш взгляд, будет более информативным продолжить экспериментальные исследования с применением диагностического метода флуоресцентной спектроскопии с целью оценки изменений метаболических процессов путём расчета показателя тканевого кислородного метаболизма (редокс–соотношения).

*Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ для ФГБОУ ВПО «Государственный университет–УНПК» (№310).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боголюбов, В.М. Общая физиотерапии. Учебное пособие для студ. мед. вузов. ед. вузов / В.М. Боголюбов, Г.Н. Пономаренко // СПб.: Правда, 1998. – 480 с.
2. Yamauchi, T. Whole body cryotherapy is method of extreme cold  $-175^{\circ}\text{C}$  Treatment initially used for rheumatoid arthritis / T. Yamauchi // Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim. – 1986. – № 15. – P. 311.
3. Fricke, R. Ganzkörperkältetherapie in einer Kältekammer mit Temperaturen um  $-110^{\circ}\text{C}$  / R. Fricke // Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim. – 1989. – V. 18. – № 1. – P. 1–10.
4. Баранов, А.Ю. Лечение холодом (Криомедицина): руководство для врачей / А.Ю. Баранов // СПб.: Атон, 1999. – 272 с.
5. Westerlund, T. Thermal responses during and after whole–body cryotherapy ( $-110^{\circ}\text{C}$ ) / T. Westerlund // Journal of Thermal Biology. – 2003. – V. 28. – № 8. – P. 601–608.
6. Smolander, J. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole–body cryotherapy and winter swimming in ice–cold water / J. Smolander // Physiology & Behavior. □ 2004. □ V. 82. □ № 4. □ P. 691–965.
7. Ходарева, Н.В. Влияние общей воздушной криотерапии на липидный спектр сыворотки крови / Н.В. Ходарева // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. □ 2012. □ № 3. □ P. 36–39.
8. Zalewski, P. Thermal and hemodynamic response to whole–body cryostimulation in healthy subjects / P. Zalewski // Cryobiology. □ 2013. □ V. 66. – №3. □ P. 295–302.
9. Lubkowska, A. Acute effect of a single whole–body cryostimulation on prooxidant–antioxidant balance in blood of healthy, young men / A. Lubkowska // Journal of Thermal Biology. □ 2008. □ V. 33. □ № 8. □ P. 464–467.
10. Lubkowska, A. Changes in lipid profile in response to three different protocols of whole–body cryostimulation treatments / A. Lubkowska // Cryobiology. □ 2010. □ V. 61. □ № 1. □ P. 22–26.
11. Дунаев, А.В. Исследование возможностей тепловидения и методов неинвазивной медицинской спектроскопии в функциональной диагностике / А.В. Дунаев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. □ 2010. – № 6–2 (284). – С. 95–100.
12. Новикова, И.Н. Оценка влияния холодовой прессионной функциональной пробы на изменение параметров микроциркуляторно–тканевых систем / И.Н. Новикова, А.В. Дунаев, А.И. Крупаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. □ 2014. □ № 3 (305). □ P. 132–141.
13. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in peripheral blood circulation measured by doppler technique / A. Stefanovska, M. Bracic, H.D. Kvernmo // Biomedical Engineering. □ 2010. □ V. 46. □ № 10. □ P. 1230–1239.

14. Tankanag, A. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin / A. Tankanag, N. Chemeris // Phys. Med. Biol. □ 2013. □ V. 53. □ № 21. □ P. 5967–5976.
15. Жердев, А.А. Способы реализации общей криотерапевтической процедуры / А.А. Жердев, А.В. Шакуров, А.А. Щелчков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – С. 189–201.
16. Крупаткин, А.И. Неинвазивная оценка тканевого дыхания у человека с использованием вейвлет-анализа колебаний сатурации крови кислородом и кровотока в микрососудах кожи / А.И. Крупаткин // Физиология человека. – 2012. – Т. 38. – № 4. – С. 67–73.
17. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev // Physiological Measurement. – 2014. – V. 35(4). – № 607. – DOI. 10.1088/0967–3334/35/4/607
18. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно–тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 496 с.: ил.
19. Дунаев, А.В. Анализ физиологического разброса параметров микроциркуляторно–тканевых систем / А.В. Дунаев // Биотехносфера. – 2013. – № 5. – С. 44–53. – ISSN 2073–4824.
20. Юнкеров, В.И. Математико–статистическая обработка данных медицинских исследований / В.И. Юнкеров, С.Г. Григорьев // СПб.: ВМедА. – 2002. – 266 с.
21. Волотовская, А.В. Криотерапия: учеб.–метод. пособие / А.В. Волотовская // Минск: БелМАПО, 2010. – 26 с.
22. Баранов, А.Ю. О многостороннем изучении изменений в организме здорового человека в ответ на криотерапевтическое воздействие / А.Ю. Баранов // Вестник СПб ГМА им. И.И. Мечникова. – 2005. – № 6. – С. 147–150.
23. Галанова, С.К. Влияние общей криотерапии на психоэмоциональное состояние пациентов с начальным проявлением недостаточности кровоснабжения мозга / С.К. Галанова, Д.Ш. Альтман, С.Н. Теплова // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2008. – № 4. – С. 12–15.

**Новикова Ирина Николаевна**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», инженер–исследователь научно–образовательного центра «Биомедицинская инженерия»  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E–mail: i.n\_novikova@mail.ru

**Дунаев Андрей Валерьевич**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет–УНПК», г. Орёл  
Ведущий научный сотрудник научно–образовательного центра «Биомедицинская инженерия», кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E–mail: dunaev@bmccenter.ru

**Искоростинский Никита Евгеньевич**

Медицинский центр «АЛЬТАИР», г. Орёл  
Лаборант  
Тел.: +7–4862–54–11–01  
E–mail: info@mc–altair.ru

**Искоростинский Евгений Владимирович**

Медицинский центр «АЛЬТАИР», г. Орёл  
Директор, к.м.н.  
Тел.: +7–4862–54–11–01  
E–mail: info@mc–altair.ru

I.N. NOVIKOVA, E.V. ISKOROSTINSKIY, N.E. ISKOROSTINSKIY, A.V. DUNAEV

## THE STUDY OF THE INFLUENCE OF WHOLE BODY CRYOTHERAPY ON THE PARAMETERS OF MICROCIRCULATORY–TISSUE SYSTEMS OF THE HUMAN BODY

*In this article using non–invasive optical methods of laser Doppler flowmetry, tissue reflectance oximetry and pulse oximetry, we investigated the influence whole body cryotherapy (WBC) on the parameters of microcirculatory–tissue systems (MTS) of the human body. Described is the methodology for conducting experiments, detailed analysis of fluctuations of blood flow, estimated the dynamics of measured and calculated complex parameters of tissue respiration. Statistically significant changes of the parameters of the MTS were found immediately after the procedure cryotherapy in relation to the values before WBC and their full recovery after 15–20 min in most researched volunteers.*

**Keywords:** non–invasive diagnostics, laser Doppler flowmetry, tissue reflectance oximetry, pulse oximetry, microcirculatory–tissue system, whole body cryotherapy.

### BIBLIOGRAPHY

1. Bogolyubov, V.M. Obshchaya fizioterapii. Uchebnoye posobiye dlya stud. med. vuzov. yed. vuzov / V.M. Bogolyubov, G.N. Ponomarenko // SPb.: Pravda, 1998. – 480 s.
2. Yamauchi, T. Whole body cryotherapy is method of extreme cold –175°C Treatment initially used for rheumatoid arthritis / T. Yamauchi // Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim. – 1986. – № 15. – P. 311.

3. Fricke, R. Ganzkörperkältetherapie in einer Kältekammer mit Temperaturen um  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$  / R. Fricke // *Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim.* – 1989. – V. 18. – № 1. – P. 1–10.
4. Baranov, A.Yu. Lecheniye kholodom (Kriomeditsina): rukovodstvo dlya vrachey / A.Yu. Baranov // SPb.: Aton, 1999. – 272 s.
5. Westerlund, T. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy ( $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) / T. Westerlund // *Journal of Thermal Biology.* – 2003. – V. 28. – № 8. – P. 601–608.
6. Smolander, J. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water / J. Smolander // *Physiology & Behavior.* □ 2004. □ V. 82. □ № 4. □ P. 691–965.
7. Khodareva, N.V. Vliyaniye obshchey vozduшной krioterapii na lipidnyy spektr syvorotki krovi / N.V. Khodareva // *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kultury.* □ 2012. □ № 3. □ P. 36–39.
8. Zalewski, P. Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects / P. Zalewski // *Cryobiology.* □ 2013. □ V. 66. – №3. □ P. 295–302.
9. Lubkowska, A. Acute effect of a single whole-body cryostimulation on prooxidant–antioxidant balance in blood of healthy, young men / A. Lubkowska // *Journal of Thermal Biology.* □ 2008. □ V. 33. □ № 8. □ P. 464–467.
10. Lubkowska, A. Changes in lipid profile in response to three different protocols of whole-body cryostimulation treatments / A. Lubkowska // *Cryobiology.* □ 2010. □ V. 61. □ № 1. □ P. 22–26.
11. Dunayev, A.V. Issledovaniye vozmozhnostey teplovideniya i metodov neinvazivnoy meditsinskoy spektrofotometrii v funktsionalnoy diagnostike / A.V. Dunayev // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii.* □ 2010. – № 6–2 (284). – S. 95–100.
12. Novikova, I.N. Otsenka vliyaniya kholodovoy pressornoj funktsionalnoy proby na izmeneniye parametrov mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem / I.N. Novikova, A.V. Dunayev, A.I. Krupatkin // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii.* □ 2014. □ № 3 (305). □ P. 132–141.
13. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in peripheral blood circulation measured by doppler technique / A. Stefanovska, M. Bracic, H.D. Kvernmo // *Biomedical Engineering.* □ 2010. □ V. 46. □ № 10. □ P. 1230–1239.
14. Tankanag, A. Application of adaptive wavelet transform for analysis of blood flow oscillations in the human skin / A. Tankanag, N. Chemeris // *Phys. Med. Biol.* □ 2013. □ V. 53. □ № 21. □ P. 5967–5976.
15. Zherdev, A.A. Sposoby realizatsii obshchey krioterapevticheskoy protsedury / A.A. Zherdev, A.V. Shakurov, A.A. Shchelchikov // *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroyeniye».* – 2012. – C. 189–201.
16. Krupatkin, A.I. Neinvazivnaya otsenka tkanevogo dykhaniya u cheloveka s ispolzovaniyem veyvlet-analiza kolebaniy saturatsii krovi kislorodom i krovotoka v mikrososudakh kozhi / A.I. Krupatkin // *Fiziologiya cheloveka.* – 2012. – T. 38. – № 4. – C. 67–73.
17. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev // *Physiological Measurement.* – 2014. – V. 35(4). – № 607. – DOI. 10.1088/0967–3334/35/4/607
18. Krupatkin, A.I. Funktsionalnaya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineynost: rukovodstvo dlya vrachey / A.I. Krupatkin, V.V. Sidorov – M.: LIBROKOM, 2013. – 496 s.: il.
19. Dunayev, A.V. Analiz fiziologicheskogo razbrosa parametrov mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem / A.V. Dunayev // *Biotekhnosfera.* – 2013. – № 5. – S. 44–53. – ISSN 2073–4824.
20. Yunkerov, V.I. Matematiko–statisticheskaya obrabotka dannykh meditsinskikh issledovaniy / V.I. Yunkerov, S.G. Grigoryev // SPb.: VMedA. – 2002. – 266 s.
21. Volotovskaya, A.V. Krioterapiya: ucheb.–metod. posobiye / A.V. Volotovskaya // Minsk: BelMAPO, 2010. – 26 s.
22. Baranov, A.Yu. O mnogostoronnem izuchenii izmeneniy v organizme zdorovogo cheloveka v otvet na krioterapevticheskoye vozdeystviye / A.Yu. Baranov // *Vestnik SPb GMA im. I.I. Mechnikova.* – 2005. – № 6. – C. 147–150.
23. Galanova, S.K. Vliyaniye obshchey krioterapii na psikhooemotsionalnoye sostoyaniye patsiyentov s nachalnym proyavleniyem nedostatochnosti krovosnabzheniya mozga / S.K. Galanova, D.SH. Altman, S.N. Teplova // *Fizioterapiya, balneologiya i reabilitatsiya.* – 2008. – № 4. – C. 12–15.

**Novikova Irina Nikolaevna**

State University ESPC, Orel  
Post graduate student degree of the Department «Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology, engineer–researcher of scientific–educational center «Biomedical Engineering»  
Tel.: +7–4862–41–98–76  
E–mail: i.n\_novikova@mail.ru

**Iskorostinsky Nikita Evgenievich**

Medical center «ALTAIR», Orel  
Laboratory assistant  
Tel.: +7–4862–54–11–01  
E–mail: info@mc-altair.ru

**Dunaev Andrey Valerievich**

State University ESPC, Orel  
Leading Research Fellow of scientific–educational center «Biomedical Engineering», PhD, docent of the Department «Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology  
Tel.: +7–4862–41–98–76  
E–mail: dunaev@bmccenter.ru

**Iskorostinsky Evgeny Vladimirovich**

Medical center «ALTAIR», Orel  
Director, PhD  
Tel.: +7–4862–54–11–01  
E–mail: info@mc-altair.ru

**КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.314

И.Н. БАЖЕНОВ, Ю.Б. ИВАНОВ

**СПОСОБ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

*Для повышения чувствительности и точности контроля толщины немагнитных металлических покрытий необходимо совершенствовать известные способы и средства контроля. В статье представлен способ и реализующее его устройство, которые решают данную задачу путем компенсации основных инструментальных погрешностей измерений.*

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, вихретоковый метод контроля, измерение толщины электропроводящих покрытий.

В толщинометрии широко применяются методы неразрушающего контроля, основанные на использовании электрических и магнитных свойств материалов [1, 2]. При этом в случае измерений толщины немагнитных металлических покрытий на диэлектрической или немагнитной основе с другой удельной электрической проводимостью используется вихретоковый метод контроля. Согласно этому методу импульсный ток в вихретоковом преобразователе создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в объекте контроля, воздействующие на катушки измерительного преобразователя. При этом изменяется полное электрическое сопротивление, которое разделяется на активную и реактивную составляющие, изменения которых позволяют получать информацию о свойствах объекта контроля. Таким образом, толщина контролируемого покрытия определяется посредством совместного измерения двух параметров – амплитуды и фазы выходного сигнала вихретокового преобразователя [3].

Сравнительный анализ параметров известных устройств, основанных на вихретоковом методе контроля, показал, что все они обладают рядом недостатков, практически ограничивающих точность контроля толщины электропроводящих покрытий [2, 4]:

1) вихретоковому методу контроля свойственны изменения амплитуды и фазы на измерительной обмотке преобразователя из-за потерь на вихревые токи, возрастающие при повышении частоты сигнала и увеличении толщины электропроводящих покрытий. Даже при большой толщине покрытия относительное изменение индуктивности измерительной обмотки не превышает  $\pm 10\%$  относительно начального значения, а изменение разности фаз между сигналами компенсационной и измерительной обмоток составляет единицы градусов. В приборах контроля покрытий с толщиной в единицы–десятки микрометров нужно формировать возбуждающий сигнал высокой частоты  $f_B = (1,5 \dots 2,0)$  МГц, поэтому для измерения разности фаз  $\Delta\varphi$  с погрешностью в  $1^\circ$  в фазовом детекторе необходимо применять формирователи импульсов с максимальной задержкой срабатывания не более

$$\Delta t_{зд} \leq 1 / (2 \cdot 360 \cdot f_B) \leq 0,7 \text{ нс},$$

что трудно обеспечить даже при использовании современных цифровых микросхем;

2) сравнение фазы сигнала на измерительной обмотке с фазой сигнала на обмотке возбуждения приводит к появлению большой фазовой погрешности вследствие температурных изменений магнитных свойств вихретокового преобразователя;

3) фазовая чувствительность приборов вихретокового контроля реально ограничивается нестабильностью срабатывания формирователей импульсов в фазовом детекторе, особенно при сигналах низкого уровня. Например, изменение уровня срабатывания формирователя импульсов в одном из каналов фазового детектора на  $\pm 1\%$  относительно амплитуды измеряемого сигнала приводит к появлению фазовой погрешности, составляющей  $0,6^\circ$ ;

4) измеряемая разность фаз сигналов  $\Delta\varphi = \arctg(2\pi f_B \Delta L/R)$  при контроле толщины покрытия зависит от сопротивления  $R$  вихретокового преобразователя и изменения индуктивности  $\Delta L$  измерительной обмотки на частоте  $f_B$  возбуждающего сигнала, которая уменьшается при малой толщине покрытия из-за снижения потерь на вихревые токи. Поэтому минимальная толщина контролируемого покрытия ограничивается на уровне около 2 мкм. Кроме того, дискретная регулировка частоты возбуждающего сигнала, которую необходимо подстраивать в зависимости от предполагаемой толщины и материала покрытия, в значительной степени затрудняет практическое использование вихретоковых устройств.

Таким образом, для повышения чувствительности и точности измерения толщины немагнитных металлических (электропроводящих) покрытий необходимо совершенствовать известные способы и средства вихретокового контроля.

Для компенсации инструментальных погрешностей в аппаратуре контроля толщины немагнитных металлических покрытий целесообразно использовать двухпараметрический способ измерения, основанный на резонансном режиме работы вихретокового трансформаторного преобразователя [5]. Для получения резонансных колебаний параллельно компенсирующей и измерительной обмоткам преобразователя подключаются два конденсатора, а компенсация инструментальных погрешностей достигается переключением измерительных каналов с помощью двухканального аналогового переключателя и коммутатора напряжения с вычислением разности результатов измерений за два такта преобразования. Это позволяет повысить чувствительность и точность контроля толщины электропроводящих покрытий.

Структурная схема устройства, реализующего двухпараметрический способ контроля, представлена на рисунке 1.

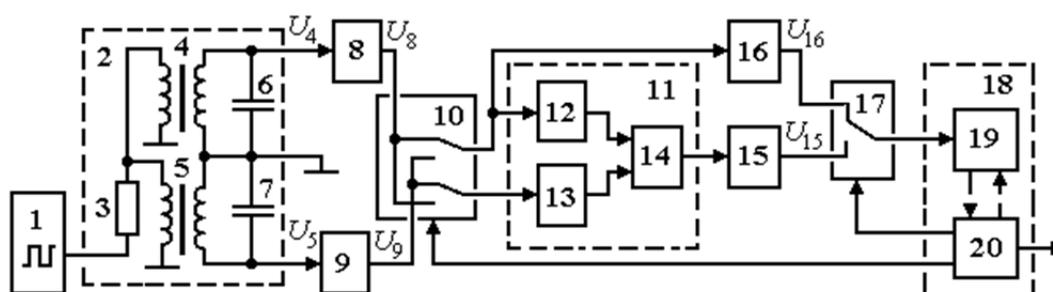


Рисунок 1 – Структурная схема устройства двухпараметрического контроля толщины немагнитных металлических покрытий:

- 1 – генератор возбуждающего сигнала; 2 – вихретоковый датчик; 3 – резистор;
- 4, 5 – компенсационный и измерительный трансформаторные преобразователи;
- 6, 7 – конденсаторы; 8, 9 – буферные усилители; 10 – двухканальный переключатель;
- 11 – фазовый детектор; 12, 13 – формирователи импульсов; 14 – логический элемент «Исключающее ИЛИ»;
- 15 – фильтр низких частот; 16 – амплитудный детектор; 17 – коммутатор напряжения;
- 18 – микроконтроллер; 19 – аналого-цифровой преобразователь; 20 – блок управления и обработки данных

В схеме устройства применен генератор прямоугольного возбуждающего сигнала 1, подключенный через токоограничивающий резистор 3 к датчику 2, содержащему компенсационный 4 и измерительный 5 трансформаторные преобразователи на ферритовых сердечниках. Вторичные обмотки этих преобразователей совместно с конденсаторами 6, 7 образуют два колебательных контура, резонансная частота которых соответствует частоте возбуждающего сигнала:  $f_p = f_B$ . При высокой добротности колебательных контуров на выходах компенсационного и измерительного преобразователей формируются сигналы гармонической формы, которые после усиления подаются на двухканальный аналоговый переключатель 10 для перекрестного подключения выходов усилителей 8 и 9 к разным входам фазового детектора 11. В составе фазового детектора применены формирователи импульсов 12, 13 и логический элемент 14 типа «Исключающее ИЛИ», формирующий импульсы, длительность которых пропорциональна фазовому сдвигу  $\Delta\varphi$  между сигналами, снимаемыми с компенсационного 4 и измерительного 5 преобразователей. Полученные импульсы усредняются фильтром низкой частоты 15 и преобразуются в напряжение, пропорциональное фазовому сдвигу  $\Delta\varphi$  между исследуемыми сигналами. Для преобразования амплитуды гармонического

сигнала в постоянное напряжение применен амплитудный детектор 16, причем выходы фильтра низкой частоты 15 и амплитудного детектора 16 через коммутатор напряжения 17 поочередно подключаются к микроконтроллеру 18, содержащему аналого–цифровой преобразователь 19 и блок управления и обработки данных 20. Аналого–цифровой преобразователь 19 формирует цифровые коды, пропорциональные выходным напряжениям фильтра низкой частоты 15 и амплитудного детектора 16, которые поступают на блок управления и обработки данных 20 для вычисления толщины исследуемого покрытия и вывода полученной информации на индикатор и внешние устройства. Микроконтроллер 18 также управляет двухканальным аналоговым переключателем 10 и коммутатором напряжения 17 по заданному алгоритму измерения толщины покрытия, записанному в память микроконтроллера [6].

Устройство двухпараметрического контроля работает следующим образом.

Генератор возбуждающего сигнала 1 совместно с резистором 3 формирует высокочастотные импульсы тока, которые протекают по первичным обмоткам трансформаторных преобразователей 4, 5. Это приводит к появлению переменных напряжений  $U_4$  и  $U_5$  на их вторичных обмотках, которые совместно с конденсаторами 5, 6 образуют два колебательных контура. При одинаковых емкостях  $C_6 = C_7$  и индуктивностях  $L_4 = L_5$  компенсационной 4 и измерительной 5 обмоток частота резонанса  $f_p$  этих контуров устанавливается равной частоте  $f_B$  генератора возбуждающего тока по условию [6]:

$$f_B = f_p = 1/2\pi\sqrt{L_4C_5} = 1/2\pi\sqrt{L_5C_7}.$$

При идентичных параметрах компенсационного и измерительного преобразователей на выходах вихретокового датчика 2 формируются гармонические колебания с одинаковыми амплитудами  $U_{4M} = U_{5M}$  и фазами  $\varphi_4 = \varphi_5$ . Усилители 8 и 9 с одинаковыми коэффициентами усиления  $K_8 = K_9$  служат для усиления этих сигналов до значений  $U_{8M} = K_8U_{4M}$ ,  $U_{9M} = K_9U_{5M}$ , которые затем через двухканальный переключатель 10 поступают на фазовый 11 и амплитудный 16 детекторы. К фазовому детектору 11 подключен фильтр низких частот 15 для получения напряжения  $U_{15}$ , пропорционального разности фаз  $\Delta\varphi = \varphi_4 - \varphi_5$  сигналов, снимаемых с компенсационной и измерительной обмоток. При этом на выходе амплитудного детектора 16 получается постоянное напряжение  $U_{16}$ , пропорциональное амплитудам  $U_{8M}$  или  $U_{9M}$  выходных сигналов усилителей 8 и 9 в двух тактах преобразования.

При измерении толщины покрытия конец ферритового сердечника с измерительной обмоткой устанавливается на поверхность исследуемого объекта. Это приводит к уменьшению индуктивности измерительной обмотки вследствие протекания вихревых токов в контролируемой поверхности и, как следствие, к уменьшению амплитуды и увеличению фазы сигнала на измерительном контуре  $L_5C_7$ . Изменение этих параметров пропорционально электрической проводимости и толщине, что позволяет реализовать операцию ее контроля.

Процесс измерения выполняется за два такта. В первом такте по команде микроконтроллера 18 двухканальный аналоговый переключатель 10 соединяет выход усилителя 8 с амплитудным детектором 16 и входом формирователя импульсов 12, а выход усилителя 9 – с входом формирователя импульсов 13 фазового детектора 11. Сигналы, поступающие от усилителей 8 и 9, преобразуются в прямоугольные импульсы формирователями 12 и 13, а элемент 14 «Исключающее ИЛИ» формирует короткие импульсы, длительность которых зависит от разности фаз  $\Delta\varphi_1 = \varphi_4 - \varphi_5 \neq 0$  сигналов на компенсационной 4 и измерительной 5 обмотках вихретокового датчика 2. При этом коммутатор напряжения 17 сначала переключается в верхнее положение, при котором аналого–цифровой преобразователь 19 кодирует амплитуду напряжения на выходе усилителя 8. Затем коммутатор 17 подключает аналого–цифровой преобразователь 19 к фильтру низких частот 15 для кодирования напряжения, пропорционального разности фаз  $\Delta\varphi_1$ . Во втором такте по команде микроконтроллера 18 двухканальный переключатель 10 соединяет выход усилителя 9 с амплитудным детектором 16 и формирователем импульсов 12, а выход усилителя 8 – с входом формирователя импульсов 13 фазового детектора 11. Затем аналого–цифровой преобразователь 19 снова поочередно кодирует

выходные напряжения амплитудного детектора 16 и фильтра низких частот 15, пропорциональные амплитуде сигнала на выходе усилителя 9 и разности фаз  $\Delta\varphi_2$  компенсационного и измерительного сигналов во втором такте измерения. Результаты измерения вычисляются микроконтроллером после окончания второго такта преобразования по формулам:

$$\Delta U = U_{8M} - U_{9M}; \quad \Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2.$$

Цифровые коды, пропорциональные изменениям амплитуды и фазы сигналов, вводятся в блок обработки данных микроконтроллера 18, который выполняет расчет толщины  $h$  электропроводящего покрытия с учетом разности амплитуд  $\Delta U$  и фаз  $\Delta\varphi$  по формуле [6]:

$$h = -K_1 (\Delta U / U_{8M}) + K_2 \cdot \Delta\varphi,$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты, определяемые экспериментально для конкретных значений электрической проводимости покрытия и основы изделия.

Практически выбор частоты возбуждающего сигнала зависит от максимальной толщины  $T_{п.макс}$  и удельной электрической проводимости  $\sigma_{п}$  материала покрытия, и с учетом магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0 = 4\pi$  Гн/м определяется выражением [7]:

$$f_{в} \approx (0,36 \dots 0,64) / (\pi \mu_0 \sigma_{п} T_{п.макс}^2).$$

При использовании рассматриваемого устройства для технологического контроля качества медного покрытия с максимальной толщиной  $T_{п.макс} = 35$  мкм и удельной электрической проводимостью  $\sigma_{п} = 59$  МСм/м частота возбуждающего сигнала должна составлять:

$$f_{в} \approx 0,5 / (4\pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot 59 \cdot 1225 \cdot 10^{-12}) \approx 1,8 \text{ МГц}.$$

Минимальная толщина контролируемого покрытия зависит от чувствительности и точности измерения амплитуды и фазы сигнала на выходах датчика, на которые существенно влияют резонансные параметры измерительного и компенсационного контуров.

Для оценки зависимостей амплитуды и фазы сигнала от относительного изменения индуктивности измерительного контура проведено моделирование схемы вихретокового датчика по программе *Multisim-12*, результаты которого представлены на рисунке 2.

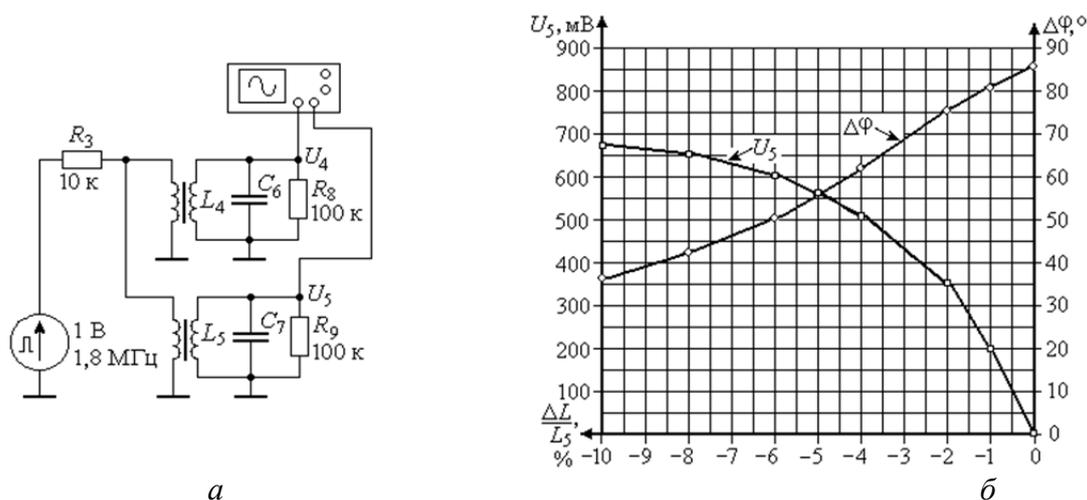


Рисунок 2 – Модель двухпараметрического вихретокового трансформаторного датчика: а – схема модели; б – зависимости амплитуды и фазы сигнала от изменения индуктивности

При моделировании в компенсационном и измерительном контурах датчика были установлены начальные значения индуктивностей трансформаторов  $L_4 = L_5 = 240$  мкГн и емкостей  $C_6 = C_7 = 30$  пФ для получения расчетной частоты резонанса  $f_p = 1,8$  МГц. В качестве источника возбуждающего сигнала применен генератор прямоугольных импульсов с амплитудой  $U_{в} = 1$  В, а для ограничения амплитуды тока на уровне  $I_{в} = 50$  мкА в первичных обмотках трансформаторных преобразователей подключен резистор  $R_3 = 10$  кОм. Влияние входных сопротивлений усилителей 8, 9 в схеме датчика учтено включением параллель-

но резонансным контурам двух резисторов  $R_8 = R_9 = 100$  кОм. Амплитуда и фаза выходных сигналов датчиков контролировалась двухканальным осциллографом с максимальной погрешностью моделирования в среде *Multisim-12* не превышающей 1 % (рисунок 2, а).

Согласно результатам моделирования, при уменьшении индуктивности измерительного контура на 10 % относительно компенсационной индуктивности амплитуда выходного сигнала уменьшается от 850 мВ до 310 мВ, т. е. в 2,4 раза от исходного значения. Разность фаз  $\Delta\varphi$  между компенсирующим и измерительным напряжениями в этом случае изменяется от нуля до  $68^\circ$  (рисунок 2, б). Если в датчике применять простые вихретоковые трансформаторные преобразователи [7], то аналогичное изменение индуктивности изменяет разность фаз между сигналами на угол  $\Delta\varphi \approx 2^\circ$ , т. е. резонансный режим работы позволяет повысить фазовую чувствительность к толщине контролируемого покрытия примерно в 35 раз.

Повышение точности устройства обеспечивается за счет компенсации погрешностей преобразования при обработке данных, полученных в двухтактном цикле измерения [6]:

1) высокие резонансные сопротивления компенсационного и измерительного контуров позволяют уменьшить рассеиваемую мощность и температурную погрешность датчика;

2) применение резонансных контуров позволяет получать выходные сигналы датчика с амплитудами  $U_{4M} \approx U_{5M} \geq 1$  В и применять усилители с небольшими коэффициентами усиления  $K_8 = K_9 \approx 2$  и малым фазовым сдвигом выходных сигналов  $U_8$  и  $U_9$  на высокой резонансной частоте  $f_p$ , что снижает их влияние на точность измерения разности фаз  $\Delta\varphi$ ;

3) точность измерения фазы сигналов не зависит от фазовой задержки срабатывания  $\Delta\varphi_{12}$ ,  $\Delta\varphi_{13}$  формирователей импульсов 12 и 13, так как при вычитании результатов измерения фазы в двух тактах преобразования исключается их влияние на уровень выходного напряжения фазового детектора, которое определяется выражением  $U_{15} = 2\Delta\varphi \cdot K_{15}$ ;

4) за два такта измерения компенсируется влияние напряжения смещения  $\Delta U_{16}$  пикового детектора 16 на точность измерения разности амплитуд напряжений  $\Delta U = U_{8M} - U_{9M}$ . Если в первом такте измерения выходное напряжение пикового детектора 16 составляет  $U_{16-1} = U_{8M} + \Delta U_{16}$ , а во втором такте  $U_{16-2} = U_{9M} + \Delta U_{16}$ , то после их вычитания в микроконтроллере 18 исключается влияние напряжения смещения детектора 16 на точность:

$$\Delta U = U_{16-1} - U_{16-2} = U_{8M} - U_{9M};$$

5) при изменении индуктивности измерительной обмотки на  $\Delta L_5/L_5 \leq -0,1$  амплитуды сигналов  $U_{8M}$  и  $U_{9M}$  на выходах усилителей 8 и 9 различаются не более чем в 3–4 раза, поэтому коэффициент преобразования амплитудного детектора 16 остается практически постоянным и мало влияет на точность измерения разности напряжений  $\Delta U = U_{8M} - U_{9M}$ ;

б) погрешность от смещения начального уровня аналого–цифрового преобразователя также компенсируется после вычитания результатов двух измерений в микроконтроллере.

Таким образом, применение резонансного режима работы вихретокового датчика с переключением измерительных каналов и вычислением разности результатов измерений за два такта преобразования позволяет скомпенсировать инструментальные погрешности и значительно повысить чувствительность устройства и точность контроля толщины покрытий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль / В.П. Вавилов, К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужижкий. Справочник в 8 томах / Под общей редакцией В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 5. – Кн. 1. Тепловой контроль. – Кн. 2. Электрический контроль (второе издание исправленное).
2. Неразрушающий контроль / А.И. Евлампиев, Е.Д. Попов, С.Г. Сажин, Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимом, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин. Справочник в 8 томах / Под общей редакцией В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2006. – Т.2. – Кн. 1. Контроль герметичности. – Кн. 2. Вихретоковый контроль (второе издание исправленное).
3. Пат. 2184930 Российская Федерация, МПК G01B 7/06 Вихретоковый способ двухпараметрического контроля изделий / Н.Г. Богданов, Ю.Н. Отрошенко, В. А. Приходько, А. И. Суздальцев; заявитель и патенто-

обладатель Орловский государственный технический университет. – № 2000102730/28; заявл. 03.02.2000; опубл. 10.07.2002, бюл. № 13 – 3 с.

4. Пат. 2384839 Российская Федерация, МПК G01V 7/06 Вихретоковый измеритель / В.А. Сясько, А.С. Булатов, М.Ю. Коротеев, П.В. Соломенчук; заявитель и патентообладатель ЗАО «КОНСТАНТА». – № 2008141320/28; заявл. 13.10.2008; опубл. 20.03.2010, бюл. № 11 – 3 с.

5. Богданов, Н.Г. Контроль толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе / Н.Г. Богданов, С.Н. Плотников, С.Н. Щекотихин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 12. – С. 30–33.

6. Пат. 2533756 Российская Федерация, МПК G01V 7/06 Устройство двухпараметрового контроля толщины электропроводных покрытий / И.Н. Баженов, Н.Г. Богданов, Ю.Б. Иванов; заявитель и патентообладатель Академия ФСО России. – № 2013123328/28; заявл. 21.05.2013; опубл. 20.11.2014, бюл. № 2 – 3 с.

7. Сясько, В.А. Измерение толщины покрытий из оловянных сплавов на изделиях из цветных металлов с использованием вихретокового амплитудно-фазового метода / В.А. Сясько, А.Е. Ивкин // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 5. – С. 12–16.

**Баженов Иван Николаевич**  
Академия ФСО России, г. Орёл  
Преподаватель  
E-mail: bazhen-orel77@mail.ru

**Иванов Юрий Борисович**  
Академия ФСО России, г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: zhmur@yahoo.com

---

I.N. BAZHENOV, Y.B. IVANOV

## **TWO-PARAMETER CONTROL THICKNESS OF THE NONMAGNETIC METAL COATING METHOD**

*To increase the sensitivity and precision thickness control nonmagnetic metallic coatings is necessary to improve the known methods and means of control. This article presents a method and an apparatus realizing it, that solve this problem by compensating the main tool of measurement errors.*

**Keywords:** *nondestructive control, eddy current control method, conductive coating thickness measurement.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Nerazrushayushchiy kontrol / V.P. Vavilov, K.V. Podmasteryev, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf, T.I. Noga-cheva, Ye.V. Pakholkin, L.A. Bondareva, V.F. Muzhitskiy. Spravochnik v 8 tomakh / Pod obshchey redaktsiyey V.V. Klyuyeva. – М.: Mashinostroyeniye, 2006. – Т. 5. – Kn. 1. Teplovoy kontrol. – Kn. 2. Elektricheskiy kontrol (vtoroye izdaniye ispravlennoye).

2. Nerazrushayushchiy kontrol / A.I. Yevlampiyev, Ye.D. Popov, S.G. Sazhin, Yu.K. Fedosenko, V.G. Gerasimom, A.D. Pokrovskiy, Yu.Ya. Ostanin. Spravochnik v 8 tomakh / Pod obshchey redaktsiyey V.V. Klyuyeva. – М.: Mashinostroyeniye, 2006. – Т.2. – Kn. 1. Kontrol germetichnosti. – Kn. 2. Vikhretokovyy kontrol (vtoroye izdaniye ispravlennoye).

3. Пат. 2184930 Rossiyskaya Federatsiya, МПК G01V 7/06 Vikhretokovyy sposob dvukhparametricheskogo kontrolya izdeliy / N.G. Bogdanov, Yu.N. Otroshenko, V. A. Prikhodko, A. I. Suzdaltsev; zayavitel i patentoobladatel Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. – № 2000102730/28; zayavl. 03.02.2000; opubl. 10.07.2002, byul. № 13 – 3 s.

4. Пат. 2384839 Rossiyskaya Federatsiya, МПК G01V 7/06 Vikhretokovyy izmeritel / V.A. Syasko, A.S. Bulatov, M.Yu. Koroteyev, P.V. Solomenchuk; zayavitel i patentoobladatel ЗАО «KONSTANTA». – № 2008141320/28; zayavl. 13.10.2008; opubl. 20.03.2010, byul. № 11 – 3 s.

5. Bogdanov, N.G. Kontrol tolshchiny nemagnitnykh pokrytiy na ferromagnitnoy osnove / N.G. Bogdanov, S.N. Plotnikov, S.N. Shchekotikhin // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2007. – № 12. – S. 30–33.

6. Пат. 2533756 Rossiyskaya Federatsiya, МПК G01V 7/06 Ustroystvo dvukhparametrovogo kontrolya tolshchiny elektroprovodnykh pokrytiy / I.N. Bazhenov, N.G. Bogdanov, Yu.B. Ivanov; zayavitel i patentoobladatel Akademiya FSO Rossii. – № 2013123328/28; zayavl. 21.05.2013; opubl. 20.11.2014, byul. № 2 – 3 s.

7. Syasko, V.A. Izmereniye tolshchiny pokrytiy iz olovyannykh splavov na izdeliyakh iz tsvetnykh metallov s ispolzovaniyem vikhretokovogo amplitudno-fazovogo metoda / V.A. Syasko, A.Ye. Ivkin // Kontrol. Diagnostika. – 2011. – № 5. – S. 12–16.

**Bazhenov Ivan Nikolaevich**  
The Academy of the Federal security service of Russia,  
Orel  
Teacher  
E-mail: bazhen-orel77@mail.ru

**Ivanov Yuriy Borisovich**  
The Academy of the Federal security service of Russia, Orel  
Candidate of technical Sciences, associate Professor of de-  
partment  
E-mail: zhmur@yahoo.com

И.Г. КАРПОВ, Ю.Т. ЗЫРЯНОВ, И.Г. РЯЗАНОВ

## ОДНОМЕРНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИНОМИАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НЕЗАВИСИМЫХ ИСПЫТАНИЙ

*Разработаны модели дискретных законов распределения для анализа последовательности независимых испытаний с тремя исходами, получены выражения для их основных числовых характеристик, а также для расчета вероятностей наступления соответствующих событий.*

**Ключевые слова:** модели дискретных законов распределения, одностороннее распределение триномиального типа, двустороннее распределение триномиального типа.

В настоящее время во всем мире идет стремительное развитие приборостроения, в частности в области радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры. Первостепенное значение для такой аппаратуры имеют показатели качества, определяющие возможность выполнения ее целевой задачи нормального функционирования в заданных условиях в течение требуемого времени наработки. Качество радиоэлектронной аппаратуры обеспечивается ее конструкцией, технологией изготовления и условиями производства. Этапы проектирования и производства аппаратуры предполагают получение информации о ее качестве на всех стадиях жизненного цикла – от начала проектирования до изготовления в серийном производстве и последующей ее эксплуатации. Существенная роль в этом процессе отводится испытаниям. Результаты испытаний являются основой решений по использованию аппаратуры, усовершенствованию ее конструкции и технологии изготовления. При решении целого ряда практических задач, например, при контроле уровня надежности прибора, приходится сталкиваться со схемой испытаний Бернулли [1–3]. Производится  $N$  независимых испытаний, в результате каждого из которых наступает либо событие  $A$  с вероятностью  $p$  либо противоположное ему событие  $C$  с вероятностью  $(1-p)$ . Двум случайным исходам каждого испытания обычно сопоставляют дискретную случайную величину, принимающую одно из двух значений: 1, если произошло событие  $A$  и 0, если произошло событие  $C$ . Эти исходы также называют «успехом» и «неудачей».

Вероятность  $P_A(k)$  того, что событие  $A$  при  $N$  испытаниях наступит ровно  $k$  раз ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) определяется по формуле Бернулли [1–3]:

$$P_A(k) = \frac{N!}{(N-k)!} p^k (1-p)^{N-k}, \quad (1)$$

представляющей собой биномиальное распределение. При  $N = 1$  оно преобразуется в распределение Бернулли. В работе [4] показано, что двумерное биномиальное распределение и его характеристическая функция определяются соответственно выражениями:

$$P(k, l) = \frac{N!}{(N-k-l)!k!l!} (1-p_1-p_2)^{N-k-l} p_1^k p_2^l, \quad (2)$$

$$\theta_N(j\theta_1, j\theta_2) = [(1-p_1-p_2) + p_1 \exp(j\theta_1) + p_2 \exp(j\theta_2)]^N. \quad (3)$$

Если событию  $C$  сопоставить случайную величину, принимающую вместо 0 значение  $-1$ , то распределение (1) после некоторых преобразований примет следующий вид:

$$P(k) = \frac{N!}{[(N+k)/2]![(N-k)/2]!} p^{(N+k)/2} (1-p)^{(N+k)/2}, \quad (4)$$

где  $k = -N, -N+2, -N+4, \dots, N$ .

Данное распределение можно назвать двухсторонним, так как в нем случайные дискретные величины принимают положительные и отрицательные значения.

Если  $k > 0$ , то по формуле (4) можно определить вероятность  $P_A(k)$  того, что событие  $A$  при  $N$  испытаниях наступит ровно  $k$  раз. При этом полагается, что  $P_A(k) = P(k)$ . Если  $k < 0$ ,

то по формуле (4) можно определить вероятность  $P_C(k)$  того, что событие  $C$  при  $N$  испытаниях наступит ровно  $|k|$  раз. При этом полагается, что  $P_C(k) = P(k)$ ,  $k < 0$ .

Если  $k = 0$  и количество испытаний является четным, то вероятность  $P(0) > 0$ . Ее можно также определить по формуле (4). С этой вероятностью могут произойти событие  $A$  либо событие  $C$  при  $N$  испытаниях. Например, при двух бросаниях симметричной монеты с вероятностью 0,5 могут выпасть орел либо решка.

Для последовательности независимых испытаний с тремя и более исходами обычно рекомендуют использовать полиномиальную модель [1–3]. Однако, в последние годы появился ряд публикаций, например [5, 6], в которых ставится под сомнение использование данной вероятностной модели по двум основным причинам: во-первых, каждая из составляющих (случайных величин) полиномиального распределения должна иметь биномиальное распределение, что уже при трех исходах выполняется только в частном случае; во-вторых, составляющие полиномиального распределения являются зависимыми случайными величинами, а рассматриваемые испытания являются независимыми. В работе [7] для последовательности независимых испытаний с тремя и более исходами были получены в общем виде выражения одномерных законов распределения, практическое применение которых является затруднительным.

Основная цель данной работы – разработать модели одномерных дискретных законов распределения для последовательности независимых испытаний с тремя исходами, аналогичные одностороннему распределению (1) и двухстороннему распределению (4) для последовательности независимых испытаний с двумя исходами.

**1. Модель одностороннего распределения триномиального типа.**

Пусть производится  $N$  независимых испытаний. Каждое испытание может завершиться одним из трех исходов: наступлением события  $A$  с вероятностью  $p_1$  либо наступлением события  $B$  с вероятностью  $p_2$  либо наступлением события  $C$  с вероятностью  $q = 1 - p_1 - p_2$ . Случайным исходам каждого испытания сопоставим дискретную случайную величину, принимающую одно из трех значений: 0, если произошло событие  $C$ ; 1, если произошло событие  $A$  и 2, если произошло событие  $B$ . Появление одного из положительных исходов в каждом испытании будем считать «успехом», а появление нулевого исхода – «неудачей». При этом вероятность  $P(x)$  появления событий  $C$ ,  $A$  и  $B$  в каждом испытании будет определяться выражением:

$$P(x) = \begin{cases} q, & x = 0; \\ p_1, & x = 1; \\ p_2, & x = 2, \end{cases} \quad (5)$$

где  $0 < p_1 < 1, 0 < p_2 < 1, p_1 + p_2 < 1$ .

Найдем характеристическую функцию для распределения (5), используя соотношение [1–3]:

$$\theta(j\vartheta) = \sum_{x=0}^2 \exp(j\vartheta x) P(x). \quad (6)$$

Подставив в него (5), получим:

$$\theta(j\vartheta) = q + p_1 \exp(j\vartheta) + p_2 \exp(2j\vartheta). \quad (7)$$

Так как проводимые испытания являются независимыми, то характеристическая функция  $\theta_N(j\vartheta)$  распределения вероятностей  $P(x)$  при  $N$  испытаниях будет равна:

$$\theta_N(j\vartheta) = \theta(j\vartheta)^N = [q + p_1 \exp(j\vartheta) + p_2 \exp(2j\vartheta)]^N. \quad (8)$$

При этом распределение вероятностей  $P(x)$  при  $N$  испытаниях можно определить по формуле [1–3]:

$$P(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \theta_N(j\vartheta) \exp(-j\vartheta x) d\vartheta, \quad x = 0, 1, \dots, 2N. \quad (9)$$

Однако значительно проще  $P(x)$  определяется с использованием выражения (2) для двумерного биномиального распределения, характеристическая функция (3) которого при  $\mathcal{G}_1 = \mathcal{G}$ ,  $\mathcal{G}_2 = 2\mathcal{G}$  полностью совпадает с характеристической функцией (8), то есть, искомое распределение вероятностей  $P(x)$  представляет собой распределение суммы двух зависимых биномиальных случайных величин. Положим в (2)  $k = x - 2l$  при  $x \leq N$  либо  $k = 2N - x - 2l$  при  $N < x \leq 2N$  и произведем суммирование по переменной  $l$ . В результате после некоторых преобразований получим:

$$P(x) = \sum_{l=\max(0, N-x)}^{\lfloor (N-x)/2 \rfloor} \frac{N! p_2^{x+l-N}}{(x+l-N)!} \cdot \frac{q^l p_1^{2N-x-2l}}{l!(2N-x-2l)!}, \quad (10)$$

$$x = 0, 1, \dots, 2N.$$

Полученное распределение (10) можно отнести к классу одномерных распределений триномиального типа, исходя из внешнего вида характеристической функции (8), представляющей собой трином в степени  $N$ .

Выражение (10) можно упростить для двух частных случаев:

1. Если  $p_1 = 2p(1-p)$ ,  $p_2 = p^2$ , то:

$$P(x) = \frac{(2N)!}{(2N-x)!x!} p^x (1-p)^{2N-x}, \quad x = 0, 1, \dots, 2N. \quad (11)$$

Распределение вероятностей (11), также как и распределение (1), является биномиальным распределением.

2. Рассмотрим предельный случай для распределения (10), когда вероятность наступления события  $B$  стремится к нулю, то есть  $p_2 \rightarrow 0$ . В этом случае каждое испытание будет завершаться одним из двух исходов: наступлением события  $C$  с вероятностью  $(1-p)$  либо события  $A$  с вероятностью  $p$ . При этом распределение вероятностей (10) в результате предельного перехода преобразуется в биномиальное распределение (1).

Можно показать, что начальный момент 1-го порядка и центральные моменты 2-го, 3-го и 4-го порядков для распределения (10) будут определяться выражениями:

$$M_1 = N(p_1 + 2p_2); M_2 = N[p_1 + 4p_2 - (p_1 + 2p_2)^2] \quad (12)$$

$$M_3 = N[p_1 + 8p_2 - (p_1 + 2p_2)^3] - 3M_2(p_1 + 2p_2), \quad (13)$$

$$M_4 = N[p_1 + 16p_2 - 3(p_1 + 4p_2)^2 + 2(p_1 + 2p_2)^4] - 4M_3(p_1 + 2p_2) + 3M_2^2. \quad (14)$$

Вместо центральных моментов 3-го и 4-го порядков обычно используют коэффициент асимметрии  $K_a$  и коэффициент эксцесса  $K_e$ , определяемые с помощью соотношений:

$$K_a = \frac{M_3}{M_2^{1,5}}; \quad K_e = \frac{M_4}{M_2^2} - 3. \quad (15)$$

Таким образом, число успехов  $x$  в  $N$  испытаниях имеет распределение (10), причем:

$$x = r_1 + 2r_2; r_0 + r_1 + r_2 = N, \quad (16)$$

где  $r_0, r_1, r_2$  – соответственно количество появлений несовместных событий  $C, A$  и  $B$  в  $N$  испытаниях;

$$k = 0, 1, \dots, 2N; r_0 = 0, 1, \dots, N; r_1 = 0, 1, \dots, N; r_2 = 0, 1, \dots, N.$$

Вероятность  $P(x)$  того, что событие  $A$  при  $N$  испытаниях наступит ровно  $r_1$  раз, а событие  $B$  при  $N$  испытаниях наступит ровно  $r_2$  раз определяется по формуле (10) с учетом формулы (16). Так вероятность  $P(1)$  означает, что событие  $A$  при  $N$  испытаниях наступит ровно 1 раз; вероятность  $P(2)$  означает, что событие  $A$  при  $N$  испытаниях наступит ровно 2 раза либо событие  $B$  ровно 1 раз. Вероятность  $P(3)$  означает, что событие  $A$  при  $N$  испытаниях наступит ровно 3 раза либо события  $A$  и  $B$  по одному разу. Вероятность  $P(2N)$  означает, что событие  $B$  при  $N$  испытаниях наступит ровно  $N$  раз. Вероятность  $P(2N-1)$  означает, что

событие  $A$  при  $N$  испытаниях наступит ровно 1 раз, а событие  $B$  ровно  $(N - 1)$  раз. Таким образом, с помощью полученного распределения (10) можно определять вероятность суммы двух несовместных случайных событий  $A$  и  $B$  при  $N$  испытаниях.

Вероятность  $P_C$  наступления события  $C$  при  $N$  испытаниях определяется также по формуле (10). При этом полагается, что  $P_C = P(0)$ . Вероятность  $P_C$  соответствует вероятности того, что при  $N$  испытаниях события  $A$  и  $B$  ни разу не наступят.

## 2. Модель двухстороннего распределения триномиального типа.

Пусть производится  $N$  независимых испытаний. Каждое испытание может закончиться тремя исходами: наступлением события  $A$  с вероятностью  $p_1$  либо наступлением события  $B$  с вероятностью  $p_2$  либо наступлением события  $C$  с вероятностью  $q = 1 - p_1 - p_2$ . Случайным исходам каждого испытания сопоставим дискретную случайную величину, принимающую три значения:  $-1$ , если произошло событие  $B$ ;  $0$ , если произошло событие  $C$  и  $1$ , если произошло событие  $A$ . Исходы каждого испытания будем обозначать соответственно символами  $1, -1$  и  $0$ . При этом вероятность  $P(k)$  появления событий  $A, B$ , и  $C$  в каждом испытании будет определяться выражением:

$$P(k) = \begin{cases} q, & k = 0; \\ p_1, & k = 1; \\ p_2, & k = -1, \end{cases} \quad (17)$$

где  $0 < p_1 < 1, 0 < p_2 < 1, p_1 + p_2 < 1$ .

Данное распределение вероятностей, по аналогии с распределением Бернулли (2), можно назвать двухсторонним распределением Бернулли. С помощью соотношения [3]:

$$\theta(j\mathcal{G}) = \sum_{k=-1}^1 \exp(j\mathcal{G}k)P(k).$$

Находим характеристическую функцию для распределения (17):

$$\theta(j\mathcal{G}) = q + p_1 \exp(j\mathcal{G}) + p_2 \exp(-j\mathcal{G}). \quad (18)$$

Так как проводимые испытания являются независимыми, то характеристическая функция  $\theta_N(j\mathcal{G})$  распределения вероятностей  $P(k)$  при  $N$  испытаниях будет равна:

$$\theta_N(j\mathcal{G}) = \theta(j\mathcal{G})^N = [q + p_1 \exp(j\mathcal{G}) + p_2 \exp(-j\mathcal{G})]^N. \quad (19)$$

При этом распределение вероятностей  $P(k)$  при  $N$  испытаниях можно определить по формуле (9). Однако значительно проще  $P(x)$  определить с использованием выражения (2) для двумерного биномиального распределения, характеристическая функция (3) которого при  $\mathcal{G}_1 = -\mathcal{G}, \mathcal{G}_2 = \mathcal{G}$  полностью совпадает с характеристической функцией (19), то есть, искомого распределение вероятностей  $P(x)$  представляет собой распределение разности двух зависимых биномиальных случайных величин. Положим в (2)  $k = x + l$  и произведем суммирование по переменной  $l$ . В результате после некоторых преобразований получим:

$$P(x) = \sum_{l=\max(0,-x)}^{[(N-x)/2]} \frac{N! p_2^{x+l}}{(x+l)!} \cdot \frac{q^{N-x-2l} p_1^l}{l!(N-x-2l)!}; \quad (20)$$

$$x = -N, -N+1, \dots, N.$$

Полученное распределение вероятностей (20) можно назвать обобщенной формулой Бернулли либо одномерным триномиальным распределением, исходя из внешнего вида характеристической функции (19) для этого распределения. Выражение (20) можно упростить для трех частных случаев:

1. Если  $p_2 = (1 - p)^2, p_1 = p^2$ , то:

$$P(x) = \frac{(2N)!}{(N-x)!(N+x)!} p^{N+x} (1-p)^{N-x}; \quad (21)$$

$$x = -N, -N+1, \dots, N.$$

Распределение вероятностей (21), также как и распределение (1), является биномиальным распределением с ненулевым параметром сдвига.

2. Рассмотрим предельный случай для распределения (20), когда вероятность наступления события  $C$  стремится к нулю, то есть  $(p_1 + p_2) \rightarrow 1$ . В этом случае каждое испытание будет заканчиваться двумя исходами: наступлением события  $B$  с вероятностью  $(1-p)$  либо события  $A$  с вероятностью  $p$ . Первому исходу соответствует символ  $-1$ , а второму исходу – символ  $1$ . При этом распределение вероятностей (20) в результате предельного перехода преобразуется в распределение (4), а характеристическая функция (19) принимает вид:

$$\theta_N(j\vartheta) = [(1-p)\exp(-j\vartheta) + p\exp(j\vartheta)]^N. \quad (22)$$

3. Рассмотрим второй предельный случай для распределения (20), когда вероятность наступления события  $B$  стремится к нулю, то есть  $p_2 \rightarrow 0$ . В этом случае каждое испытание будет заканчиваться двумя исходами: наступлением события  $C$  с вероятностью  $(1-p)$  либо события  $A$  с вероятностью  $p$ . При этом распределение вероятностей (20) в результате предельного перехода преобразуется в биномиальное распределение (1).

Начальный момент 1-го порядка и центральные моменты 2-го, 3-го и 4-го порядков для распределения (20) определяются выражениями:

$$M_1 = N(p_1 - p_2); M_2 = N[p_1 + p_2 - (p_2 - p_1)^2] \quad (23)$$

$$M_3 = (p_1 - p_2)[N - N(p_2 - p_1)^2 - 3M_2] \quad (24)$$

$$M_4 = M_2 [1 + 6(p_1 - p_2)^2] + 3(1 - 1/N)M_2^2 + 3N(p_1 - p_2)^2 \cdot [(p_1 - p_2)^2 - 1] \quad (25)$$

Вместо центральные моментов 3-го и 4-го порядков обычно используют коэффициент асимметрии  $K_a$  и коэффициент эксцесса  $K_e$ , определяемые с помощью соотношений (15).

Поясним физический смысл полученного распределения (20). Как было показано выше, оно представляет собой распределение разности двух зависимых биномиальных случайных величин  $k$  и  $l$ , то есть  $x = k - l$ . Если  $k > l$ , то с вероятностью  $P(x)$  случайная величина  $k$  превышает на  $x$  единиц случайную величину  $l$ . Положительной разности соответствует наступление события  $A$  ровно  $x$  раз с вероятностью  $P_A(x)$ . При этом полагается, что  $P_A(x) = P(x)$ ,  $x = 1, 2, \dots, N$ .

Если  $k < l$ , то с вероятностью  $P(x)$  случайная величина  $k$  меньше на  $|x|$  единиц случайной величины  $l$ . Отрицательной разнице соответствует наступление события  $B$  ровно  $|x|$  раз с вероятностью  $P_B(x)$ . При этом полагается, что  $P_B(x) = P(x)$ ,  $x = -1, -2, \dots, -N$ .

Если  $k = l$ , то с вероятностью  $P(0)$  случайная величина  $k$  равна случайной величине  $l$ . Нулевой разнице соответствует наступление события  $C$  с вероятностью  $P_C = P(0)$ . Вероятность  $P_C$  соответствует вероятности того, что при  $N$  испытаниях события  $A$  и  $B$  ни разу не наступят.

Таким образом, разработаны модели дискретных законов распределения для последовательности независимых испытаний с тремя исходами, получены выражения для их основных числовых характеристик, а также для расчета вероятностей наступления соответствующих событий ровно  $x$  раз. Показано, что распределение вероятностей (10) представляет собой распределение суммы двух зависимых биномиальных случайных величин, а распределение вероятностей (20) – распределение разности двух зависимых биномиальных случайных величин.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей. / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1988. – 448 с.
2. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 910 с.
3. Федоткин, М.А. Модели в теории вероятностей / М.А. Федоткин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 608 с.

4. Карпов, И.Г. Законы распределения дискретных случайных величин и их идентификация / И.Г. Карпов // IV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь». Том 1. – Воронеж: ВГУ. – 1998. – С. 115–125.

5. Голоборщенко, В.С. Парадоксы в современной теории вероятностей. Часть 1: Ложность принятых постулатов и парадигм. / В.С. Голоборщенко // Проблемы создания информационных технологий. Сборник научных трудов МАИТ. – М: ООО Техполиграфцентр. – 2006. – выпуск 14. – С. 9–15.

6. Голоборщенко, В.С. Производящие и характеристические функции полиномиального и биномиального распределений как парадоксы в современной теории вероятностей / В.С. Голоборщенко // Проблемы создания информационных технологий. Сборник научных трудов МАИТ. – М: ООО Техполиграфцентр. – 2008. – выпуск 17. – С. 5–11.

7. Джонсон, Н.Л. Одномерные дискретные распределения / Н.Л. Джонсон, С. Коц, А. Кемп. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 559 с.

**Карпов Иван Георгиевич**  
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации»  
392000, Тамбов, ул. Советская, 106  
Тел: (4752) 73–26–27, +9108595874  
E-mail: zeratul68@mail.ru

**Зырянов Юрий Трифонович**  
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»  
392000, Тамбов, ул. Советская, 106  
Тел: (4752) 72–69–64, +9156662190  
E-mail: zut-tmb@mail.ru

**Рязанов Илья Георгиевич**  
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов  
аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»  
392000, Тамбов, ул. Советская, 106  
Тел: (4752) 75–58–65, +9537076140  
E-mail: chief.ryazanoff2012@ya.ru

[I.G. KARPOV], Yu.T. ZYRYANOV, I.G. RYAZANOV

## **DIMENSIONAL DISTRIBUTION TRINOMIAL TYPE FOR SEQUENCE OF INDEPENDENT TRIALS**

*Has been developed the models of discrete distribution laws for analyzing sequence of independent trials with three outcomes, the expressions for their basic numerical characteristics, as well as to calculate the probabilities of the relevant events.*

**Keywords:** *models of discrete distribution laws, one-tailed trinomial distribution type, two-tailed trinomial distribution type.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Gnedenko, B.V. Kurs teorii veroyatnostey. / B.V. Gnedenko. – М.: Nauka, 1988. – 448 s.
2. Veroyatnost i matematicheskaya statistika: entsiklopediya / Gl. red. YU.V. Prokhorov.– М.: Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya, 1999. – 910 s.
3. Fedotkin, M.A. Modeli v teorii veroyatnostey / M.A. Fedotkin. – М.: FIZMATLIT, 2012. – 608 s.
4. Карпов, И.Г. Zakony raspredeleniya diskretnykh sluchaynykh velichin i ikh identifikatsiya / I.G. Karpov // IV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Radiolokatsiya, navigatsiya i svyaz». Tom 1. – Voronezh: VGU. – 1998. – S. 115–125.
5. Goloborshchenko, V.S. Paradokсы v sovremennoy teorii veroyatnostey. Chast 1: Lozhnost prinyatykh postulatov i paradigм. / V.S. Goloborshchenko // Problemy sozdaniya informatsionnykh tekhnologiy. Sbornik nauchnykh trudov MAIT. – М: ООО Tekhpolygontsentr. – 2006. – vypusk 14. – S. 9–15.
6. Goloborshchenko, V.S. Proizvodyashchiye i kharakteristicheskiye funktsii polinomialnogo i binomialnogo raspredeleniy kak paradokсы v sovremennoy teorii veroyatnostey / V.S. Goloborshchenko // Problemy sozdaniya informatsionnykh tekhnologiy. Sbornik nauchnykh trudov MAIT. – М: ООО Tekhpolygontsentr. – 2008. – vypusk 17. – S. 5–11.
7. Dzhonson, N.L. Odnomernyye diskretnyye raspredeleniya / N.L. Dzhonson, S. Kots, A. Kemp. – М.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010. – 559 s.

**Karpov Ivan Georgievich**  
«Tambov State Technical University», Tambov  
Doctor of Technical Sciences, professor of the Department Information System and Data Protection  
392000, Tambov, ul. Soviet, 106  
Tel: (4752) 73–26–27, 9108595874  
E-mail: zeratul68@mail.ru

**Zyryanov Yuri Trifonovich**  
«Tambov State Technical University», Tambov  
Doctor of Technical Sciences, Department of professor «Design electronic and Microprocessor Systems»  
392000, Tambov, ul. Soviet, 106  
Tel: (4752) 72–69–64, 9156662190  
E-mail: zut-tmb@mail.ru

**Ryazanov Ilya Georgievich**  
«Tambov State Technical University», Tambov  
graduate student «Design electronic and Microprocessor Systems»  
392000, Tambov, ul. Soviet, 106  
Tel: (4752) 75–58–65, 9537076140  
E-mail: chief.ryazanoff2012@ya.ru

С.В. РОЖКОВ, Г.В. ШАДСКИЙ, В.Г. ШАДСКИЙ

## ДИАГНОСТИКА ОПОР ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Шпиндельный узел современного станка является наиболее ответственной подсистемой в системе обеспечения качества обрабатываемых поверхностей. Процессы возникновения дефектов в опорах шпинделя существенно опережают начало изменения точностных характеристик оборудования, оказывающих большое влияние на качество деталей. Поэтому, сразу же, после ввода металлорежущих станков в эксплуатацию необходимо проводить оперативную диагностику опор шпиндельных узлов, желательную в режиме реального времени, что позволит контролировать состояние подшипников и прогнозировать оставшееся время до их ремонта или замены.*

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, подшипники качения, искусственные нейронные сети, вибрационная диагностика, металлорежущие станки, многослойный персептрон.

Для обеспечения на достаточно высоком уровне качества выпускаемых изделий в области металлообработки, и, как результат, их конкурентоспособности в рыночных условиях, необходимо обеспечить надежность основных узлов металлорежущих станков на весь срок их эксплуатации. Одним из таких узлов является шпиндельный узел, работа которого значительно влияет на качество выпускаемой продукции. Характеристики шпиндельного узла во многом зависят от типа применяемых опор шпинделя. К ним относятся подшипники качения, скольжения, магнитные и многие другие. В каждом из типов имеются свои достоинства и недостатки, в конечном итоге определяющие область их применения. Для многоцелевых металлорежущих станков требуется, чтобы опоры надежно работали во всем диапазоне регулирования. В этом отношении наиболее эффективны подшипники качения, чем и объясняется их широкое применение в шпиндельных узлах многоцелевых металлорежущих станков. К тому же положительными их сторонами являются – доступность, легкость в обслуживании, стоимость, по сравнению с другими видами опор и т. п.

В настоящее время контроль за состоянием подшипников качения может осуществляться на всех этапах их жизненного цикла: при производстве, сборке, перед выпуском с подшипникового завода, во время установки в шпиндельный узел, во время его эксплуатации в составе металлорежущего станка. Контролируют геометрию элементов подшипников, состав и свойство смазки, температуру, вибрацию и другие параметры. Для этого применяют различные методы, характеризующиеся различной сложностью, стоимостью и точностью. Когда же имеется возможность контроля вибрации при непосредственном контакте вибрационных датчиков с неподвижными элементами подшипников качения, применяемых в составе шпиндельного узла, то вибрационные методы диагностики наиболее предпочтительны, т. к. дают наибольшее количество информации по сравнению с другими методами.

По колебаниям шпиндельных опор можно определять как наличие и вид, так и степень развития дефектов используемых подшипников качения, благодаря тому, что большинство дефектов дифференцируются на спектрах вибрационных сигналов. Значения частот дефектов рассчитывают исходя из конструктивных размеров подшипников, частоты вращения внутренней или внешней обоймы [1].

Известны наиболее удобные формулы для расчета соответствующих частот [2]:

– частота обкатывания тел качения по внешней (наружной) обойме:

$$F_H \approx F_1 \left( \frac{N_{TK}}{2} - 1, 2 \right),$$

– частота обкатывания тел качения по внутренней обойме:

$$F_B \approx F_1 \left( \frac{N_{TK}}{2} + 1, 2 \right),$$

– частота работы сепаратора:

$$F_C \approx F_1 \left( \frac{1}{2} - \frac{1,2}{N_{TK}} \right),$$

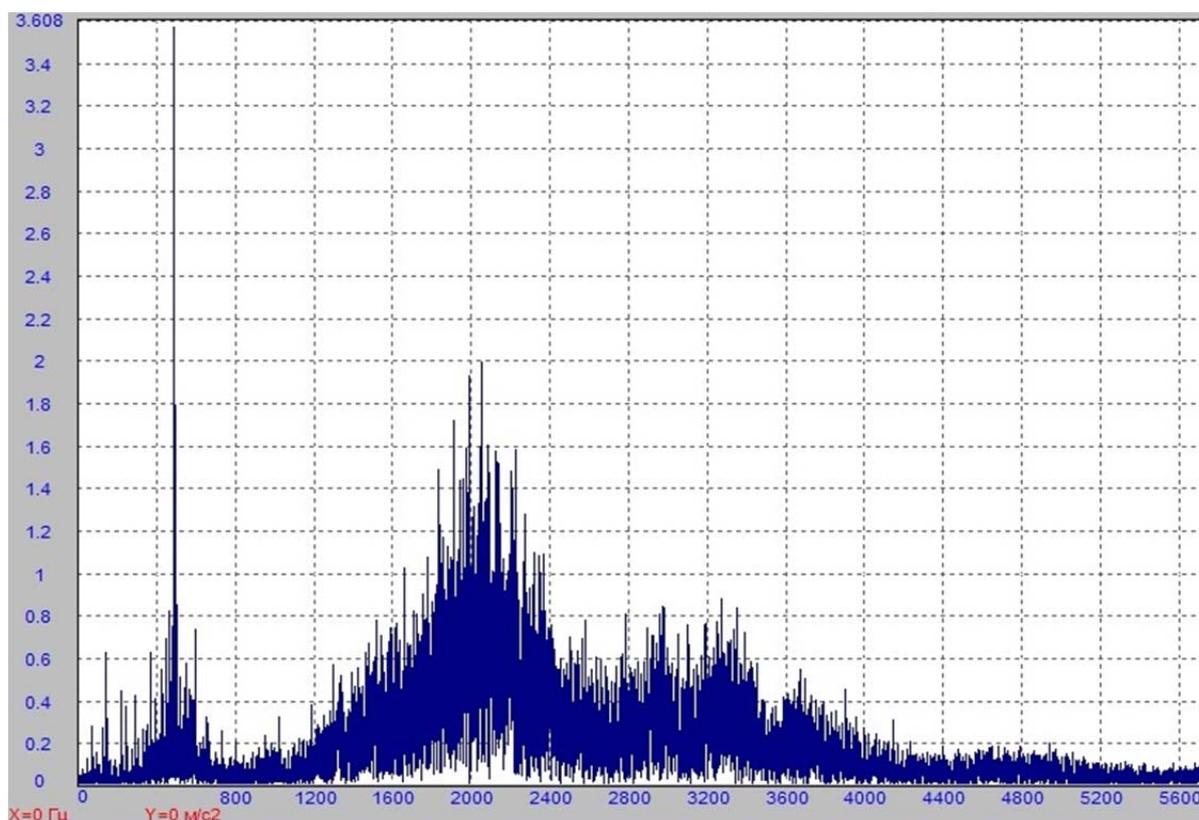
– частота вращения тел качения:

$$F_{TK} \approx F_1 \left( \frac{N_{TK}}{2} - \frac{1,2}{N_{TK}} \right),$$

где  $F_1$  – оборотная частота вращения ротора;

$N_{TK}$  – количество тел качения в одном ряду подшипника.

Метод применения описанных выше формул довольно прост – если в спектральной картине вибрационного сигнала обнаруживаются гармоники с рассчитанными частотами, то с уверенностью можно констатировать факт наличия тех или иных дефектов в подшипнике качения. Так это можно трактовать теоретически, на практике все выглядит сложнее (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Спектр вибрации, характеризующий дефект на внешней обойме подшипника марки 310 (снятый в лабораторных условия фирмой «Вибро-Центр» при помощи виброанализатора Vibro Vision-2)*

Таким образом, применять приведенные выше формулы, делая упор на исследование «прямых спектров» необходимо аккуратно, т. к. точность диагностики с их использованием может быть низкой. Довольно часто, даже если в подшипнике и присутствует несомненный дефект, то в вибросигнале свойственные частоты могут абсолютно отсутствовать, иметь сдвиг по частоте, либо иметь малую величину.

Актуальной проблемой при проведении вибрационной диагностики подшипниковых опор шпиндельного узла является разделение вибраций, создаваемых интересующими нас подшипниками и иными элементами металлорежущего станка. Вот здесь нам на помощь и придут искусственные нейронные сети, которые на основе обучения смогут распознавать те или иные дефекты подшипниковых опор шпиндельного узла, на фоне огромного количества составляющих гармоник.

Схему диагностики опор шпиндельных узлов можно представить следующим образом (рисунок 2).

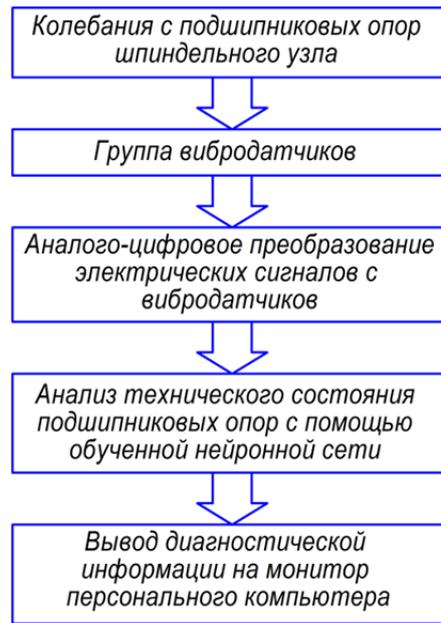


Рисунок 2 – Структурная схема вибродиагностики подшипниковых опор шпиндельного узла

Для вибрационного анализа подшипниковых опор с помощью искусственных нейронных сетей необходимо создать обучающую выборку, которая представляет из себя входные значения вида  $x_1, x_2, \dots, x_p$  (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица входных параметров

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	...	$X_p$
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	...	$f_p$
1.1	$x_{1-1.1}$	$x_{2-1.1}$	$x_{3-1.1}$	$x_{4-1.1}$	$x_{5-1.1}$	...	$x_{p-1.1}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
1.a	$x_{1-1.a}$	$x_{2-1.a}$	$x_{3-1.a}$	$x_{4-1.a}$	$x_{5-1.a}$	...	$x_{p-1.a}$
2.1	$x_{1-2.1}$	$x_{2-2.1}$	$x_{3-2.1}$	$x_{4-2.1}$	$x_{5-2.1}$	...	$x_{p-2.1}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
2.b	$x_{1-2.b}$	$x_{2-2.b}$	$x_{3-2.b}$	$x_{4-2.b}$	$x_{5-2.b}$	...	$x_{p-2.b}$
3.1	$x_{1-3.1}$	$x_{2-3.1}$	$x_{3-3.1}$	$x_{4-3.1}$	$x_{5-3.1}$	...	$x_{p-3.1}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
3.c	$x_{1-3.c}$	$x_{2-3.c}$	$x_{3-3.c}$	$x_{4-3.c}$	$x_{5-3.c}$	...	$x_{p-3.c}$
4.1	$x_{1-4.1}$	$x_{2-4.1}$	$x_{3-4.1}$	$x_{4-4.1}$	$x_{5-4.1}$	...	$x_{p-4.1}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
4.d	$x_{1-4.d}$	$x_{2-4.d}$	$x_{3-4.d}$	$x_{4-4.d}$	$x_{5-4.d}$	...	$x_{p-4.d}$

В соответствие этим значениям приведены выходные значения  $d_1, d_2, \dots, d_m, m=4$  (таблица 2), где  $p$  и  $m$  – соответственно, численность нейронов в первом и последнем слоях искусственной нейронной сети.

Входные значения  $x_1, x_2, \dots, x_p$  в порядке очереди поступают на вход сети, а выход её сравнивается с соответствующем входному выходным значением  $d_1, d_2, \dots, d_m$ , после чего веса сети  $w_1, w_2, \dots, w_k$  изменяются таким образом, чтобы уменьшить различие между получившимся и каким требуется выходом сети.

Таблица 2 – Матрица выходных величин

	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
1.1	1	0	0	0
$\vdots$	1	0	0	0
1.a	1	0	0	0
2.1	0	1	0	0
$\vdots$	0	1	0	0
2.b	0	1	0	0
3.1	0	0	1	0
$\vdots$	0	0	1	0
3.c	0	0	1	0
4.1	0	0	0	1
$\vdots$	0	0	0	1
4.d	0	0	0	1

Амплитуды гармоник с наиболее значимыми частотами  $f_1, f_2, \dots, f_p$  спектра вибрации возьмем в качестве входных значений. Выходными значениями будут диагностируемые неисправности подшипниковых опор, к примеру, их примем 4 ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ ). Отличным от нуля будет лишь тот элемент, номер которого соответствует номеру неисправности:  $d_1$  – износ поверхности наружного кольца,  $d_2$  – износ поверхности внутреннего кольца,  $d_3$  – износ тел качения,  $d_4$  – износ сепаратора.

В действительности возможных дефектов в подшипнике качения гораздо больше, это и перекосы, раковины, сколы наружного и внутреннего колец, дефекты смазки и т. д., но для того чтобы объяснить суть обучения нейронной сети хватит и 4 выходных значений.

Для решения поставленной нами задачи наиболее эффективна такая разновидность искусственных нейронных сетей, как многослойный персептрон – сеть прямого распространения, в которой каждый нейрон текущего слоя связан со всеми нейронами предыдущего [3]. Количество входных и выходных элементов нейронной сети определяется индивидуально для каждого объекта диагностики. В данном случае очевидно, что входной слой должен содержать  $X_p$  нейронов, по количеству входных значений, а выходной слой – 4 нейрона, по количеству возможных дефектов диагностируемого подшипника. Рекомендаций по составу и количеству промежуточных слоёв не существует, эти параметры определяются опытным путём (рисунок 3).

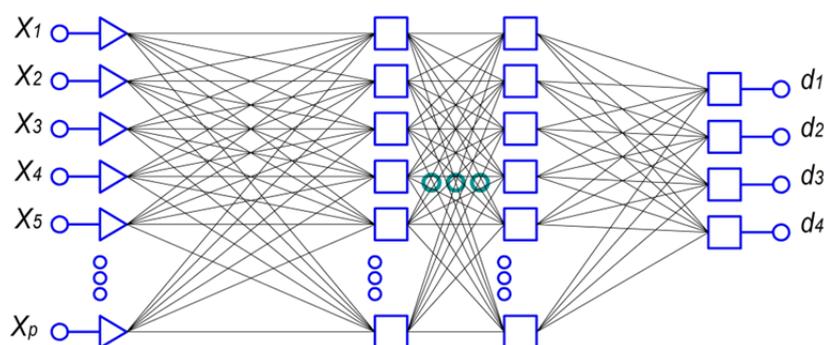


Рисунок 3 – Структура нейронной сети, обученная на диагностику опор шпиндельных узлов

Применение оперативной вибрационной диагностики опор шпиндельных узлов:

- а) предотвращает внезапные отказы оборудования и, как следствие, снижает процент брака;
- б) увеличивает межремонтный ресурс;
- в) сокращает объем ремонтных работ;
- г) сокращает стоимость технического обслуживания и ремонта;

д) с учетом применения нейросетевых технологий повышается точность распознавания тех или иных дефектов.

В связи с изложенным выше важно отметить, что диагностика шпиндельных узлов не может сводиться только к исследованию шпиндельных опор. Задача должна ставиться шире, как исследование динамического взаимодействия вынуждающих сил с динамической системой шпиндельного узла.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Баркова, Н.А. Вибрационная диагностика подшипников качения / Н.А. Баркова, Е.И. Крапивский, А.В. Шалыгин, В.В. Шорников. – Санкт–Петербург, 2010. – 38 с.
2. Русов, В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В.А. Русов. – Пермь, 2012. – 200 с.
3. Боровиков, В.П. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / В.П. Боровиков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 392 с.

**Рожков Сергей Викторович**

Тульский государственный университет, г. Тула  
Аспирант кафедры автоматизированные станочные системы  
E-mail: rozhkov-uzlv@mail.ru

**Шадский Геннадий Викторович**

Тульский государственный университет, г. Тула  
Доктор технических наук, профессор, декан факультета вечернего и заочного обучения  
E-mail: Shadskyvladimir@gmail.com

**Шадский Владимир Геннадиевич**

ОАО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, г. Тула  
Кандидат технических наук, начальник технологического отдела  
E-mail: Shadskyvladimir@gmail.com

---

S.V. ROZHKOV, G.V. SHADSKIY, V.G. SHADSKIY

### **DIAGNOSTICS SUPPORTS SPINDLES OF MACHINE TOOLS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

*Modern machine spindle is the most responsible subsystem in the system of quality of machined surfaces. Processes of defects in spindle bearings are significantly ahead of the beginning of the change of accuracy characteristics of the equipment that have a profound impact on the quality of parts. Therefore, immediately after putting into operation of machine tools necessary to carry out an immediate diagnosis bearing spindles, preferably in real time, allowing to control the condition of the bearings and to predict the remaining time of repair or replacement.*

**Keywords:** spindle, bearings, artificial neural networks, vibration diagnostics, machine tools, multilayer perceptron.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Barkova, N.A. Vibratsionnaya diagnostika podshipnikov kacheniya / N.A. Barkova, Ye.I. Krapivskiy, A.V. Shalygin, V.V. Shornikov. – Sankt–Peterburg, 2010. – 38 s.
2. Rusov, V.A. Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam / V.A. Rusov. – Perm, 2012. – 200 s.
3. Borovikov, V.P. Neyronnyye seti. STATISTICA Neural Networks: Metodologiya i tekhnologii sovremenogo analiza dannykh / V.P. Borovikov. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2008. – 392 s.

**Rozhkov Sergey Viktorovich**

Tula State University, Tula  
Post graduate of the department of automated machine tool systems  
E-mail: rozhkov-uzlv@mail.ru

**Shadskiy Gennady Viktorovich**

Tula State University, Tula  
Doctor of technical sciences, professor, dean of evening and distance learning  
E-mail: Shadskyvladimir@gmail.com

**Shadskiy Vladimir Gennadievich**

JSC Central design bureau of apparatus engineering, Tula  
Candidate of technical sciences, head of technological department  
E-mail: Shadskyvladimir@gmail.com

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

*В статье рассматривается одна из основных проблем при производстве специальных цилиндрических изделий – испытание специальных цилиндрических изделий опытного и серийного образца. Главной трудностью технологического процесса испытаний является определение скорости потока воды при выходе цилиндрического изделия из аппарата. В статье приводится обоснование использования метода испытаний аппарата водой.*

**Ключевые слова:** специальные цилиндрические изделия, метод испытания аппарата водой, скорость потока воды, выход цилиндрического изделия из аппарата.

Одной из актуальных проблем производства специальных цилиндрических изделий является совершенствование технологии их испытаний на разных стадиях производства, направленные на повышение качества и снижение трудоёмкости проведения испытаний.

С повышением степени важности и сложности выпускаемых цилиндрических изделий отмечается рост удельного веса и значения испытаний в общем цикле производства. Эта тенденция сопровождается появлением новых испытательных задач и ростом числа видов испытаний.

Решение проблемы испытаний специальных цилиндрических изделий в широком плане представляется сложной, и, в настоящее время, ещё не решённой задачей. Это объясняется, как сложностью самого процесса испытаний, который не поддаётся формализации, так и недостаточным уровнем развития самой теории испытаний сложных технических систем. В связи с этим, объективной закономерностью в развитии таких испытаний является возрастание роли и объёма стендовых испытаний, создание новых моделей испытательных стендов, а также усовершенствованных технологий испытаний на разных стадиях производства, особенно при использовании новых принципов испытаний. [1]

Существующие виды испытаний специальных цилиндрических изделий характеризуются значительным объёмом работ и измерений, большими материальными затратами и трудоёмкостью, что, естественно, ведёт к повышению себестоимости изделия. В настоящее время практически не существует различия в испытаниях как опытных, так и серийных образцов. Отсюда возникает проблема снижения стоимости испытаний, минимизации материальных и трудовых затрат, сокращение объёма испытаний без нанесения ущерба достоверности измеряемых параметров, качества работы изделия в целом. Особенно важным является обоснованный объём испытаний, измеряемые параметры для опытных и серийных образцов.

В данной работе проведён анализ существующих технологий испытаний опытных и серийных образцов специальных цилиндрических изделий и предложены новые принципы стендовых испытаний.

Объём испытаний на каждом этапе различается для опытных и серийных образцов. Наибольшему объёму испытаний подвергаются опытные образцы, для которых ещё нет проверенных норм и методов проетирования, применяются новые материалы и технологические процессы при их изготовлении. По составу испытываемых механизмов испытания делятся на:

- индивидуальные – для отдельных механизмов;
- комплексные.

Проведение индивидуальных испытаний позволяет сократить цикл комплексных, а также выявить и устранить дефекты на более ранней стадии изготовления изделия.

Испытания проводятся по специальным программам, в которых указываются цели испытаний, требования к испытаниям и условия их проведения, содержание и объём испытаний, методические указания и образцы таблиц. В методических указаниях приводятся схемы испытаний, перечень оснастки, схемы измерений и т.д. Испытания должны быть достаточно подробными и продолжительными для объективной оценки их результатов, а с другой стороны, продолжительность должна быть, по возможности, минимальной, так как сокращение продолжительности испытаний приводит к сокращению цикла изготовления, затрат и экономии ресурса механизмов.

Поэтому совершенствование испытаний должно быть направлено на разработку режимов испытаний, обеспечивающих возможность имитации реальных условий, совмещение этапов испытаний и внедрение более объективных методов оценки результатов испытаний.

В связи с постоянным совершенствованием конструкций аппаратов для специальных цилиндрических изделий наблюдается увеличение объёма и сложности испытаний при сдаче заказчику, чтобы обеспечить заданную скорость выхода цилиндрических изделий, избыточного давления в трубе аппарата и без выхода воздуха; обеспечение нормальных условий выхода цилиндрических изделий при заданном диапазоне скоростей. Поэтому, возможно, больший объём регулировок и испытаний необходимо производить в цеховых условиях. Основным условием, при этом, является необходимость создания внешних условий, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. В цеховых условиях имеется возможность искусственно имитировать требуемые параметры при помощи специальных испытательных стендов. Испытания на испытательных стендах сводят к сокращению объёма регулировок и испытаний при сдаче изделий заказчику. Преимущества стендовых испытаний особенно проявляются для опытных конструкций аппаратов и цилиндрических изделий.

Применяемые в настоящее время стенды схожи по принципу действия и несколько отличаются друг от друга по параметрам и конструкциям отдельных узлов, в состав которых входят: резервуар, труба, цилиндрическое изделие, передняя крышка, направляющая решётка, тормозная труба, выпускной клапан, цистерна. Резервуар заполняется водой до определённого уровня и предназначен для имитации внешнего давления, путём подачи воздуха с определённым давлением в воздушную подушку резервуара стенда. Заполнение резервуара водой позволяет также имитировать гидродинамическое сопротивление цилиндрического изделия из трубы и его вход в тормозную трубу. Тормозная труба предназначена для гашения кинетической энергии цилиндрического изделия после его выхода из трубы. Кроме того, стенд оснащён и другими необходимыми системами и приборами. Таким образом, принцип действия стенда заключается в имитации двух составляющих внешних сил, действующих на цилиндрическое изделие в натуральных условиях:

- внешнего давления;
- гидродинамического сопротивления.

Основным недостатком таких стендов является изменение давления в резервуаре в процессе испытания, что приводит к погрешности в имитации внешнего давления, а также дополнительное гидродинамическое сопротивление при движении цилиндрического изделия в направляющей решётке. Для компенсации этих погрешностей соответствующим образом подбирают начальное давление воздуха в резервуаре.

Основными назначениями стенда являются:

- регулировка требуемых величин давления в трубе и выходной скорости цилиндрического изделия во всём диапазоне внешнего давления;
- регулировка приборов отсечки;

– регулировка системы по времени открытия выпускного клапана, и по количеству принимаемой из аппарата воды;

– регулировка системы автоматического регулятора сечения при высоких внешних давлениях.

После предварительных испытаний, регулировок и отработки на стабильность параметров основных узлов системы проводят комплексные испытания всей системы. Целями комплексных испытаний являются:

- проверка работоспособности отдельных узлов и всей системы в собранном виде;
- получение требуемых данных по техническим условиям;
- проверка стабильности параметров выхода цилиндрического изделия.

Наиболее информативным параметром при испытании под водой является скорость выхода – движение воды в момент времени, соответствующий выходу цилиндрического изделия из трубы. При этом, выходные скорости воды и цилиндрического изделия должны сопоставляться при одинаковом значении пути

$$x = \frac{F}{F_{am}} \cdot l, \quad (1)$$

где  $l = L_{am}$  – путь цилиндрического изделия в момент выхода из аппарата. Это значение получено из условия неразрывности:

$$F_{am} \cdot U' = F \cdot U'_l \rightarrow U'_l = \frac{F_{am}}{F} \cdot U'. \quad (2)$$

Проблема измерения непосредственно скорости потока воды при выходе цилиндрического изделия из аппарата до настоящего времени не решена. Существует вариант измерения скорости воды с помощью датчика, построенного на основе трубки Пито [2]. Однако, практическая реализация этого варианта затруднена по следующим причинам:

– установка такого датчика внутри трубы приводит к искажению потока вследствие перекрытия сечения трубы и дополнительного сопротивления;

– предварительно необходимо определить точку замера по сечению трубы, в которой средняя скорость соответствует скорости воды, а для этого необходимы дополнительные исследования.

Поэтому наиболее реальными представляются следующие методики оценки скорости потока воды.

Первый метод состоит в установке вдоль трубы датчиков–отметчиков пути, проходимого границей раздела «вода–воздух». Для этого можно применить датчики наличия воды в трубе, но целесообразнее установить их в продольно–горизонтальной плоскости, проходящей через ось трубы. По отметкам этих датчиков строится зависимость пути от границы раздела «вода–воздух». Для этого можно применить датчики наличия воды в трубе, но их целесообразно установить в продольно–горизонтальной плоскости, проходящей через ось трубы. По отметкам этих датчиков строится зависимость пути границы раздела «вода–воздух» от времени, дифференцируя которую, находим скорость воды.

Второй метод, косвенный, основан на регистрации давления  $P_p$  и скорости изменения давления  $dP_p/dt$  в резервуаре стенда.

Принимая процесс в воздушной подушке резервуара стенда адиабатическим, получим:

$$P_p = P_{p0} \cdot \left(1 - \frac{F_{am} \cdot x}{U'_{p0}}\right)^k, \quad (3)$$

где  $P_{p0}$  – начальное давление в резервуаре;

$U'_{p0}$  – начальный объём воздуха в воздушной подушке;

$k = 1,41$  – показатель адиабаты для воздуха.

Дифференцируя это выражение, получим:

$$\frac{dP_p}{dt} = K \cdot \frac{F_{am}}{U'_{p0} \cdot \left(1 - \frac{F_{am} \cdot x}{U'_{p0}}\right)} P_p \cdot U', \quad (4)$$

отсюда:

$$U' = \frac{U'_{p0} \cdot \left(1 - \frac{F_{am} \cdot x}{U'_{p0}}\right)}{K \cdot F_{am} \cdot P_p} \cdot \frac{dP_p}{dt}, \quad (5)$$

По формуле (5) можно рассчитать скорость воды, если известны  $x$ ,  $P_p$ ,  $\frac{dP_p}{dt}$ .

Для реализации этого метода, помимо датчика–отметчика «х» необходима установка датчиков  $P_p$  и  $\frac{dP_p}{dt}$ . С помощью этого метода можно установить коэффициент соответствия скорости воды и скорости цилиндрического изделия в сходные моменты времени, при  $x = [x]$ , определим по формуле (1).

Поскольку в этот момент в резервуар вытеснено одно и то же количество воды  $F_{am} \cdot x = F \cdot L_{am}$ , независимо от того, что выходило из трубы, вода или цилиндрическое изделие, то давление в резервуаре будет одинаковым. Для каждого из этих вариантов (выход воды или цилиндрического изделия) можно записать:

$$\frac{dP_1}{dt} = U'_1; \quad \frac{dP_2}{dt} = AU'_2,$$

где

$$A = K \cdot \frac{F_{am}}{U'_{p0} \cdot \left(1 - \frac{F \cdot L_{am}}{U'_{p0}}\right)} [P_p], \quad (6)$$

Из этих выражений можно получить формулу для коэффициента соответствия скоростей:

$$K_{U'} = U'_2 / U'_1 = \frac{dP_2 / dt}{dP_1 / dt}, \quad (7)$$

Отношение скоростей при выходе воды или цилиндрического изделия равно отношению градиентов  $P$  в момент  $[x]$ . На основании этих соотношений рекомендуется следующий метод испытаний аппарата водой на стенде: для опытных образцов при испытании цилиндрическим изделием определяют скорость изделия и изменение давления  $\left(\frac{dP_p}{dt}\right)$  в момент  $x = [x]$ . Затем для этого же образца аппарата при испытании водой определяют скорость воды  $\left(\frac{dP_p}{dt}\right)_g$  в момент  $x = [x]$ , затем рассчитывают  $K_{U'}$  по формуле (7). Для последующих серийных аппаратов испытания на стенде проводят водой, при этом определяют скорость воды и рассчитывают скорость цилиндрического изделия  $U'_{и.и.} = K_{U'} \cdot U'_g$ . Сдачу аппарата производят из условия, чтобы расчётное значение  $U'_{и.и.}$  было в заданных по техническим условиям пределах.

Проведённые исследования позволяют решить задачу технологии испытания цилиндрических изделий на специальном стенде, используя метод испытаний аппарата водой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочанов, Ю.С. Алмазно-расточные станки. Источники погрешностей при тонком растачивании / Ю.С. Кочанов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2014. – № 6(308). – С. 82–85.
2. Тюхта, А.В. Технологическое обоснование и оценка эффективности комбинаторного способа подачи СОТС / А.В. Тюхта, К.В. Подмастерьев, Ю.В. Василенко // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2012. – № 5. – С. 15–22.

**Зубарев Юрий Михайлович**

Санкт–Петербургский государственный политехнический университет (СПбПУ), г. Санкт–Петербург  
кафедра «Технологические процессы и оборудование автоматизированных машиностроительных производств» (ТПиОАМП).

доктор технических наук, профессор  
195197, г. Санкт–Петербург, Полюстровский пр., д.14.  
Тел.: 8 (812) 540–58–37  
E–mail: tmioap@mail.ru

**Кочанов Юрий Сергеевич**

Санкт–Петербургский государственный политехнический университет (СПбПУ),  
кафедра «Технологические процессы и оборудование автоматизированных машиностроительных производств» (ТПиОАМП).

аспирант  
195197, г. Санкт–Петербург, Полюстровский пр., д.14.  
Тел.: +7 (963) 318–28–63  
E–mail: gkochanov@gmail.com

**Нечаев Кирилл Николаевич**

Санкт–Петербургский государственный политехнический университет (СПбПУ),  
кафедра «Технологические процессы и оборудование автоматизированных машиностроительных производств» (ТПиОАМП).

кандидат технических наук, доцент,  
195197, г. Санкт–Петербург, Полюстровский пр., д.14.  
Тел.: 8 (812) 540–58–37  
E–mail: tmioap@mail.ru

**Луks Александр Эдуардович**

Санкт–Петербургский государственный политехнический университет (СПбПУ),  
кафедра «Технологические процессы и оборудование автоматизированных машиностроительных производств» (ТПиОАМП).

195197, г. Санкт–Петербург, Полюстровский пр., д.14.  
студент 5–го курса  
Тел.: 8 (812) 540–58–37  
E–mail: tmioap@mail.ru

---

Yu.M. ZUBAREV, K.N. NECHAYEV, Yu.S. KOCHANOV, A.E. LUKS

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY TESTING CYLINDRICAL PRODUCTS**

*This article discusses one of the main problems in the production of special cylindrical products – special cylindrical test products and experienced production sample. The main difficulty process test is to determine the water flow rate at the outlet of the cylindrical articles from the apparatus. The article provides a rationale for the use of the test method apparatus with water.*

**Keywords:** *special cylindrical articles, the method tests the machine with water, the flow rate of water coming cylindrical article from the apparatus.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kochanov, Yu.S. Almazno-rastochnyye stanki. Istochniki pogreshnostey pri tonkom rastachivanii / Yu.S. Kochanov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 6(308). – S. 82–85.
2. Tyukhta, A.V. Tekhnologicheskoye obosnovaniye i otsenka effektivnosti kombinatornogo sposoba podachi SOTS / A.V. Tyukhta, K.V. Podmasteryev, Yu.V. Vasilenko // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2012. – № 5. – S. 15–22.

**Zubarev Yuriy Mikhaylovich**

St. Petersburg State Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg

Department «Processes and equipment of automated machine industry» (TPiOAMP). Professor, Doctor of Technical Sciences

195197, St. Petersburg, Polyustrovsky ave., 14.  
Tel.: 8 (812) 540–58–37  
E–mail: tmioap@mail.ru

**Nechayev Kirill Nikolayevich**

St. Petersburg State Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg

Department «Processes and equipment of automated machine industry» (TPiOAMP). Associate Professor, Ph.D.

195197, St. Petersburg, Polyustrovsky ave., 14.  
Tel.: 8 (812) 540–58–37  
E–mail: tmioap@mail.ru

**Kochanov Yuriy Sergeyevich**

St. Petersburg State Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg

Department «Processes and equipment of automated machine industry» (TPiOAMP). graduate

195197, St. Petersburg, Polyustrovsky ave., 14.  
Tel.: +7 (963) 318–28–63  
E–mail: gkochanov@gmail.com

**Luks Aleksandr Eduardovich**

St. Petersburg State Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg

Department «Processes and equipment of automated machine industry» (TPiOAMP). 195197, St. Petersburg, Polyustrovsky ave., 14.

student of 5th year  
Tel.: 8 (812) 540–58–37  
E–mail: tmioap@mail.ru

**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями**  
**к оформлению научных статей**

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 4 до 10 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.

- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).

- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.

- Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0. Отступы до колонтитулов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустрочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми («*«*»). Все символы «тире» должны быть среднего размера («*–*», а не «*-*»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

- Структура статьи:

УДК:

Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ **по центру без абзацного отступа**;

Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**;

Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;

Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;

Текст статьи:

Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**, литература оформляется **10 пт**.

Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:

Фамилия, имя, отчество;

учреждение или организация;

ученая степень, ученое звание, должность;

адрес;

телефон;

электронная почта.

- Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке за статьей**.

- Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «( )». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

- Рисунки – черно-белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 dpi. Подписанные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

- Рисунки с подрисовочной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте [www.gu-unpk.ru](http://www.gu-unpk.ru).

**Плата за опубликование статей не взимается.**

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

*Адрес учредителя:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 42–00–24  
Факс (4862) 41–66–84  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 54–15–19, 55–55–24, +7(906)6639898, 41–98–48, 41–98–03

www.gu-unpk.ru  
E-mail: tiostu@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.  
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 29.05.2015 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,4.  
Тираж 600 экз.  
Заказ №110/15П1

Отпечатано с готового оригинал–макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.