

**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)  
**Вяконов 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)  
**Малинин 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)  
**Расповов 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)

**Ответственный секретарь:**

**Тюхта А.В.** канд. техн. наук

**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

<i>Галактионова А.В., Емалетдинов А.К.</i> Динамика роста пор при воздействии температуры и механической нагрузки.....	3
<i>Шадрин И.Ф.</i> Жёсткие стержни и круги на двумерной поверхности. Аномальное энтропийное взаимодействие и агрегаты.....	7
<i>Мустафаев А.Б.</i> Торможение роста криволинейной трещины с концевыми пластическими зонами с помощью наведенного теплового поля напряжений.....	15

### Моделирование технологических процессов

<i>Олейникова Е.В.</i> Аналитическая модель процесса индивидуального подбора деталей при сборке.....	22
<i>Шутин Д.В.</i> Верификация математической модели активного радиального гидростатодинамического подшипника.....	27
<i>Малинин В.Г., Муссаев Ю.Ю.</i> Моделирование процессов создания термомеханических соединений с помощью муфт из материалов с памятью формы методами структурно-аналитической мезомеханики.....	36

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Гончаров Д.И., Кобищанов В.В., Антипин Д.Я.</i> Оценка несущей способности кузова автомоторисы расчетными и экспериментальными методами.....	48
<i>Миرونенко С.В., Бородин М.Б., Савин Л.А.</i> Демпфирование импульсных нагрузок гидромеханической муфтой с зубчатим дифференциальным исполнительным механизмом.....	53
<i>Сытин А.В., Тюрин В.О., Антонов С.Д.</i> Активное управление мехатронным многолепестковым подшипником роторно-опорных узлов высокоскоростных турбомашин.....	59
<i>Шагойка А.Г., Кравченко К.В., Тихоненко А.В., Чекан Н.М., Овчинников Е.В.</i> Модифицирование многослойных композиционных покрытий СВЧ-излучением.....	66

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Лебедев В.А., Соколов В.Д., Штынь С.Ю., Вяликов И.Л.</i> Энергетический метод оценки влияния ШПД на повышение эксплуатационных свойств деталей.....	73
<i>Лукин К.С., Михайлов В.Н., Москвитин С.А.</i> Технологический изгиб трубы с недеформируемым проходным сечением.....	78
<i>Овсянникова И.В., Тарапанов А.С., Муравьев А.А.</i> Анализ и прогнозирование процессов лезвийного формообразования с высокими скоростями.....	82
<i>Смоленцев Е.В., Бобров Е.С.</i> Технология ремонта зубчатых передач комбинированными методами.....	87
<i>Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядунов И.М.</i> Методика проектирования технологического процесса упрочнения деталей типа втулок пластическим деформированием в условиях комплексного локального нагружения по требуемым параметрам изделий.....	93
<i>Корнеева В.М., Корнеев С.С.</i> Теоретическая оценка силового нагружения режущего инструмента при сверхвысоких скоростях резания.....	100

### Приборостроение и биотехнические системы

<i>Жидков А.В., Жильцов М.П., Логвинов Р.В., Мишин В.В.</i> Устройство для диагностирования сферической пары трения в процессе трибоспытаний.....	106
<i>Незнанов А.И., Есипов В.Н.</i> Динамические характеристики гидроакустического датчика неровности железнодорожного пути с маятниковым чувствительным элементом.....	112

### Контроль, диагностика, испытания

<i>Карнов И.Г., Зырянов Ю.Т.</i> Методика идентификации параметров модифицированных распределений пирсона с использованием степенных, экспоненциальных и логарифмических моментов.....	117
<i>Крылов Д.Л., Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С.</i> Построение и оценка точности системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока.....	128
<i>Романов Р.В., Кузичкин О.Р., Греченева А.В.</i> Геоэкологический контроль водоносного горизонта в децентрализованной системе водоснабжения на локальном уровне.....	137
<i>Васильев А.М., Гарипов В.К., Костромин М.А., Слепцов В.В.</i> Оценка погрешностей результатов измерений температуры объектов методами бесконтактной термометрии.....	143



The journal is published since 1995  
The journal is published 6 times a year

**№ 3 (311) 2015**

May – june

# Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Educational Professional Institution  
«State University – Education–Scientific–Production Complex»  
(State University ESPC)

## 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., hon-  
ored 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 Chossee, 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 super-  
vision 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>Galaktionova A.V., Yemaletdinov A.K.</i> Dynamics of pore growth under temperature and mechanical load.....	3
<i>Shadrin I.F.</i> The rigid rods and circles on the two-dimensional surface. Abnormal entropic interacting and assemblies.....	7
<i>Mustafayev A.B.</i> Retardation of growth of curvilinear crack with end plastic zones using induced heat field of stresses.....	15

### Modelling of technological processes

<i>Oleinikova Ye.V.</i> Analytical model of process selection of individual items in the assembly.....	22
<i>Shutin D.V.</i> Verification of the mathematical model of the active radial hybrid bearing.....	27
<i>Malinin V.G., Mussaui Yu.Yu.</i> Simulation of creation thermomechanical connection using couplings shape memory materials method of structural-analytical mesomechanics.....	36

### Designing, calculations, materials

<i>Goncharov D.I., Kobishchanov V.V., Antipin D.Ya.</i> Evaluation of carrying capacity of body railcars calculated and experimental methods.....	48
<i>Mironenko S.V., Borodina M.B., Savin L.A.</i> Damping of pulse loadings the hydromechanical coupling with the gear differential executive mechanism.....	53
<i>Sytin A.V., Tyurin V.O., Antonov S.D.</i> Active control of the mechatronic multifoil bearing in high-speed turbomachinery.....	59
<i>Shagoyka A.G., Kravchenko K.V., Tikhonenko A.V., Chekan N.M., Ovchinnikov Ye.V.</i> Modification of multilayer composite coatings microwave.....	66

### Machine building technology and toolware

<i>Lebedev V.A., Sokolov V.D., Shtyn S.Yu., Vyalikov I.L.</i> Energy method of evaluation of surface plastic deformation to greater operational properties of details.....	73
<i>Lunin K.S., Mikhaylov V.N., Moskvitin S.A.</i> Technological pipe bending non-deformable flow section ..	78
<i>Ovsianikova I.V., Tarapanov A.S., Muravyov A.A.</i> Empowering comprehensive method of analysis and forecasting processes shaping with high speeds.....	82
<i>Smolentsev E.V., Bobrov E.S.</i> Technology of repair of gearings by the combined methods.....	87
<i>Golenkov V.A., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M.</i> The technological process design method of bush type parts hardening by plastic deformation in complex local loading conditions on required parts parameters.....	93
<i>Korneeva V.M., Korneev S.S.</i> Theoretical estimation of power of loading cutting tool at very high cutting speeds.....	100

### Instrument making and biotechnological system

<i>Zhidkov A.V., Zhiltsov M.P., Logvinov R.V., Mishin V.V.</i> Device for diagnosing a spherical friction pair during tribotesting.....	106
<i>Neznanov A.I., Esipov V.N.</i> Dynamic characteristics of the hydroacoustic sensor of a level of railways which has the pendular sensitive element.....	112

### Control, diagnostics, tests

<b>Karpov I.G.</b> , <i>Zyryanov Yu.T.</i> Methods of identification parameters modified pearson distribution by using power, exponential and logarithmic moments.....	117
<i>Krylov D.L., Soldatkin V.M., Soldatkina E.S.</i> Construction and evaluation of precision of air data signals system of airplane with the stationary included receiver of flow.....	128
<i>Romanov R.V., Kuzichkin O.R., Grecheneva A.V.</i> Geoecological control of the aquifer in decentralized water systems at the local level.....	137
<i>Vasilev A.M., Garipov V.K., Kostromin M.A., Sleptsov V.V.</i> Estimates for the error of temperature measurements objects by means of non-contact thermometer.....	143

УДК 538.913

А.В. ГАЛАКТИОНОВА, А.К. ЕМАЛЕТДИНОВ

## ДИНАМИКА РОСТА ПОР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

*Рассмотрена кинетика роста поры под действием постоянных и циклических растягивающих напряжений и температуры. Рост поры определяется потоком вакансий на поверхность поры и вероятностью их поглощения. Получено уравнение кинетики для поры под действием термомеханической нагрузки, решаемое численными методами.*

**Ключевые слова:** равновесная плотность вакансий; кластеры вакансий; избыточная плотность вакансий; равновесная концентрация вакансий; критический размер поры.

Длительная эксплуатация рабочих лопаток турбины из нанокристаллического жаропрочного сплава с  $\gamma'/\gamma$  – микроструктурой в условиях высоких температур и нагрузок сопровождается развитием пор и трещин, которые определяют ресурс [1–3]. Сплавы испытывают комплексное воздействие нескольких эксплуатационных факторов: высоких нагрузок, вибрации, неравномерного циклического нагрева. Под действием термомеханических нагрузок происходит зарождение вакансий, активация диффузионных процессов, в частности рост пор [1–5]. В работе впервые анализируется модель диффузионного зарождения и роста поры в никелевом жаропрочном сплаве при термомеханическом нагружении с учетом циклических напряжений растяжения, температурных напряжений и нестационарного нагрева до высоких температур.

Рассмотрим бесконечную изотропную пластину, находящуюся под действием постоянных и циклических растягивающих напряжений вдоль и температурного градиента поперек пластины как показано на рисунке 1 [3].

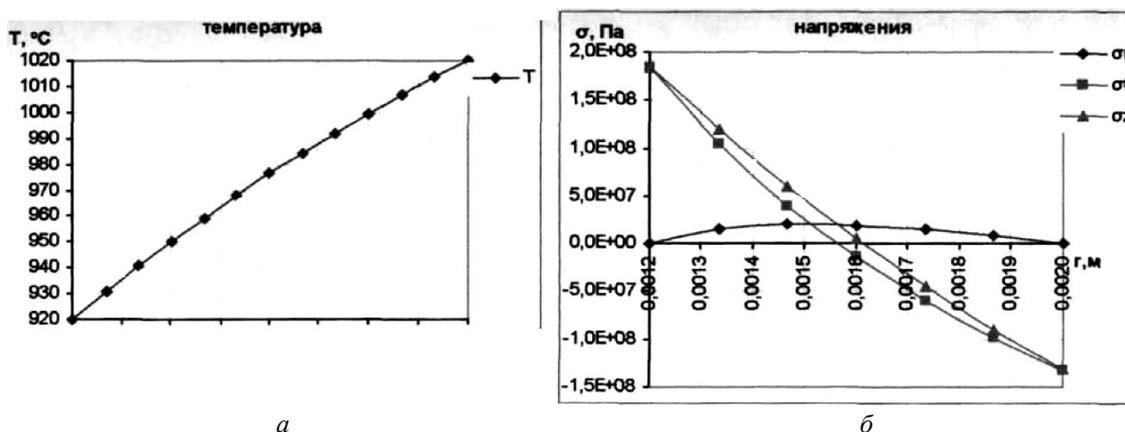


Рисунок 1 – Распределение температур и напряжений в сечении стенки входной кромки охлаждаемой рабочей лопатки ТВД ГТД АЛ-31Ф

Радиус охлаждаемого канала равен 1,2 мм, радиус наружной поверхности входной кромки – 2,0 мм. На рисунке 1 представлено распределение температур и напряжений, соответственно.

Рост пор в жаропрочном сплаве при эксплуатации включает ряд физических процессов:

- 1) возникновение избыточной концентрации вакансий;
- 2) неустойчивость и коагуляция вакансий в кластеры и зарождение поры критического размера;

3) рост пор.

За счет работы термомеханических нагрузок происходит зарождение избыточных вакансий, которые будут конденсироваться в кластеры и поры. Для определения избыточной плотности вакансий, роста пор используем уравнения кинетики [4]. Кинетика изменения плотности избыточных вакансий в первом приближении описывается уравнением:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \operatorname{div} J = \frac{c - c_0}{\tau_0}, \quad (1)$$

где  $c$  – избыточная плотность вакансий;  
 $c_0$  – равновесная плотность вакансий;  
 $\tau_0$  – среднее время жизни вакансий по поглощения стоками (поверхностью, порой и др.);  
 $J$  – поток вакансий.

Поток вакансий определяется градиентом химического потенциала  $\mu$ :

$$J = -\frac{cD}{kT} \nabla \mu, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии вакансий.

В упругом поле напряжений  $\sigma$  и температур  $T$  в изотропной среде вакансии будут обладать химическим потенциалом, который может быть представлен в виде:

$$\mu = kT \ln\left(\frac{c}{c_0}\right) - \frac{1}{3} \Omega \sigma + \frac{k_T}{cD} T. \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в формулу (2), получим плотность потока вакансий:

$$J = -D \left[ \left(1 - \frac{\sigma \Omega}{kT}\right) \nabla c + \frac{k_T}{kT} \nabla T \right], \quad (4)$$

где  $\Omega$  – мощность вакансии, характеризующая изменение объема кристалла при образовании в нем вакансии;

$k_T$  – термодиффузионное отношение.

Первое слагаемое описывает диффузию вакансий, второе и третье слагаемые характеризуют дрейфовое движение вакансий под действием неоднородных напряжений и температуры соответственно. Равновесная концентрация вакансий определяется соотношением:

$$c_0 = \exp\left(\frac{-E + \sigma \Omega}{kT}\right),$$

где  $E$  – энергия образования вакансии.

Систему уравнений (1) – (4), необходимо дополнить граничными условиями. В первом приближении в линейной теории упругости напряжения будут определяться выражением:

$$\sigma(r) = \sigma_0 + K_0 \Omega c + \sigma_1 - K_0 \alpha_T T(r), \quad (5)$$

где  $\sigma_0, \sigma_1$  – значения напряжений центробежных растяжения и вибрационных соответственно;

$K_0$  – модуль всестороннего сжатия;

$\alpha_T$  – коэффициент теплового расширения.

Первое слагаемое описывает растягивающие центробежные напряжения, второе и третье слагаемые характеризуют концентрационные и вибрационные напряжения, последнее термоупругие напряжения.

При взаимодействии одиночных избыточных вакансий в поле напряжений и температур возникают неустойчивости, приводящие к образованию кластеров вакансий. Избыточная плотность вакансий  $c$  определяется выражением:

$$\Delta c = c - c_0 = c_0 \frac{\Delta D}{D} + c_0 \exp\left(\frac{\sigma \Omega}{kT}\right). \quad (6)$$

Избыточные вакансии будут поглощаться кластерами и приводить к зарождению пор. Распределение вакансий вблизи поры определяется полем напряжений поры и зависит от радиуса поры [4,5]. Пересыщение вакансий  $\Delta c_R$  на поре радиусом  $R$  должно быть меньше пересыщения  $\Delta c$  вдали от поры. В обратном случае будет происходить растворение поры. Устойчивый рост поры реализуется, когда концентрация вакансий вблизи поверхности поры

становиться меньше средней избыточной концентрации вакансий вдали от поры. Условием этого является превышение значения размера поры критического значения ( $R > R_k$ ). Критический размер будет определяться условием  $\Delta c_R = \Delta c$ . Для пересыщения на поре можно записать [4,5]:

$$\Delta c_R = \frac{2\gamma\Omega c_0}{kTR}. \quad (7)$$

Тогда из условия  $\Delta c_R = \Delta c$  получим критический размер для роста пор:

$$R_k = \frac{2\gamma\Omega c_0}{kT\Delta c} = \frac{2\gamma\Omega}{kT(\Delta D/D + \exp(\sigma\Omega/kT))}, \quad (8)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

В отсутствие напряжений критический размер достигает  $10^{-7}$  м, поэтому зарождение пор маловероятно [4,5]. Как следует из выражения (8) термомеханическая нагрузка уменьшает критический размер до  $10^{-9}$  м, поэтому становится возможным зарождение и рост пор. Если рассматривать  $\gamma'/\gamma$  – микроструктуру то более вероятным будет зарождение пор в  $\gamma$  – пластинах.

Кинетика роста поры радиусом определяется потоком вакансий на поверхность поры и вероятностью их поглощения. Используя (4) – (6) можно получить уравнение кинетики для поры радиусом  $R$  в виде [4,5]:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{2\gamma\Omega D \bar{n}_0}{R} \left( \frac{1}{R_k} - \frac{1}{R} \right). \quad (9)$$

Система уравнений (1)–(9) описывает кинетику зарождения избыточных вакансий, кластеров вакансий и роста поры под действием термомеханической нагрузки. Решение возможно только численными методами. На рисунках 2–5 представлены результаты расчета роста и рассасывания поры в поле градиента температур и напряжений в  $\gamma$  – пластинах никеля.

Экспериментальные данные дают значение пересыщения вакансий при 900К приблизительно  $10^{-7}$ . А радиус поры больше 1нм при 900К. Таким образом, теоретические расчеты вполне соответствуют полученным экспериментальным значениям.

При циклическом воздействии температуры разница в значениях пересыщения вакансий достигает максимального значения приблизительно  $2,3 \cdot 10^{-5}$ . Образование, рост и рассасывание поры под действием термомеханической нагрузки зависят от ее критического размера: при размере поры больше критического пора растет, тогда как при размере поры меньше критического пора начинает рассасываться. Интенсивность скорости рассасывания и роста поры зависят от параметров самого материала (рисунок 2, 3).

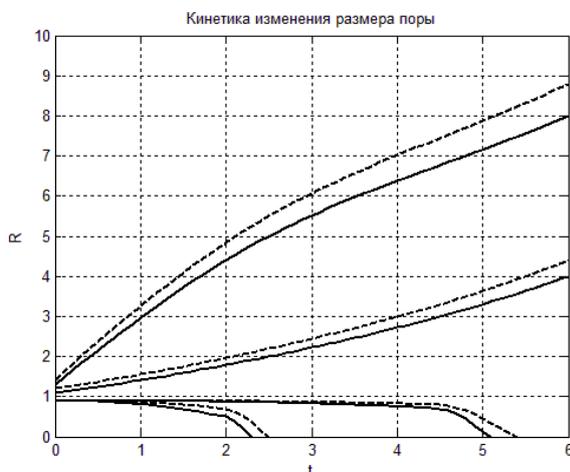


Рисунок 2 – Кинетика изменения размера поры в зависимости от времени при приращении  $D \approx 1,1D$

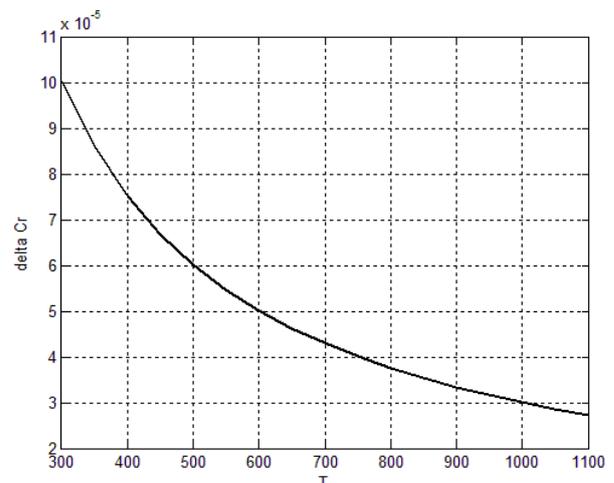


Рисунок 3 – Пересыщение вакансий в зависимости от температуры

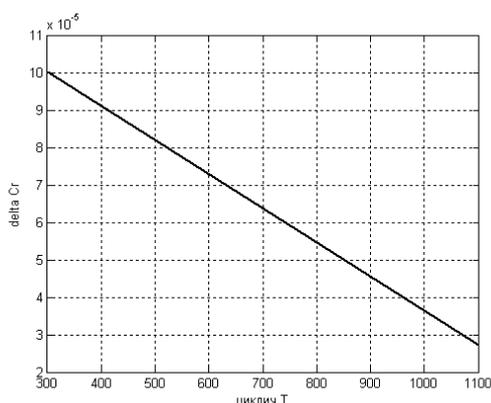


Рисунок 4 – Пересыщение вакансий в зависимости от циклического воздействия температуры

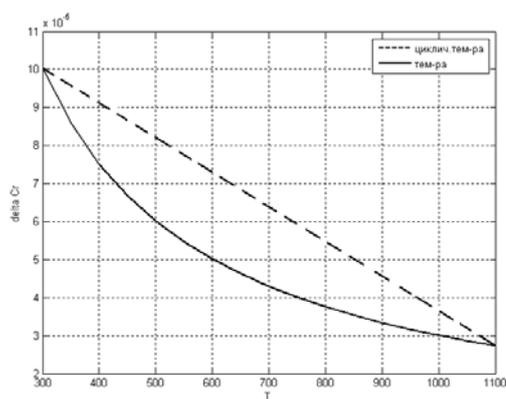


Рисунок 5 – Пересыщение вакансий в зависимости от температуры и циклической температуры

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалин, Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов. – М.: Машиностроение, 1977. – 336 с.
2. Каблов, Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технология, покрытия / Е.Н. Каблов. – М.: МИСиС, 2001. – 632 с.
3. Богуслаев, В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – Т.1, 2.
4. Гегузин, Я.Е. Движение макроскопических включений в твердых телах / Я.Е. Гегузин, М.А. Кривоглаз. – Metallurgiya, 1971. – 142 с.
5. Черемской, П.Г. Поры в твердом теле / П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.

#### Галактионова Арина Владимировна

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа  
Аспирант кафедры общей физики  
Тел. +79174687790  
E-mail: g-arina@yandex.ru

#### Емалетдинов Алик Камилевич

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа  
Доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики  
E-mail: emaletd@mail.ru

A.V. GALAKTIONOVA, A.K. YEMALETDINOV

### DYNAMICS OF PORE GROWTH UNDER TEMPERATURE AND MECHANICAL LOAD

*The paper deals with the kinetics of the pore growth under the influence of constant and cyclic tensile stress and temperature. The pore growth is determined by the flow of vacancies on the surface of the pore and by the probability of their absorption. An equation for the kinetics of pore under the influence of thermo-mechanical loading solved by numerical methods is obtained.*

**Keywords:** equilibrium density of vacancies; vacancy clusters; excess density of vacancies; equilibrium concentration of vacancies; critical size of the pore.

### BIBLIOGRAPHY

1. Shalin, P.E. Monokristally nikelovykh zharoprochnykh splyavov / P.E. Shalin, I.L. Svetlov, Ye.B. Kachanov. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 336 s.
2. Kablov, Ye.N. Lityye lopatki gazoturbinykh dvigateley. Splyavy, tekhnologiya, pokrytiya / Ye.N. Kablov. – M.: MISiS, 2001. – 632 s.
3. Boguslayev, V.A. Tekhnologicheskoye obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley GTD / V.A. Boguslayev, F.M. Muravchenko, P.D. Zhemanuk. – Zapozhzhve: OAO «Motor Sich», 2003. – T.1, 2.
4. Geguzin, YA.Ye. Dvizheniye makroskopicheskikh vklyucheniy v tverdyykh telakh / YA.Ye. Geguzin, M.A. Krivoglaz. – Metallurgiya. 1971. – 142 s.
5. Cheremskoy, P.G. Pory v tverdom tele / P.G. Cheremskoy, V.V. Slezov, V.I. Betekhtin. – M.: Energoatomizdat, 1990. – 376 s.

#### Galaktionova Arina Vladimirovna

Ufa State Aviation Technical University, Ufa  
Postgraduate Student of the Department of Physics  
Ph. +79174687790  
E-mail: g-arina@yandex.ru

#### Emaletdinov Alik Kamilovich

Ufa State Aviation Technical University, Ufa  
Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics  
E-mail: emaletd@mail.ru

И.Ф. ШАДРИН

## ЖЁСТКИЕ СТЕРЖНИ И КРУГИ НА ДВУМЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ. АНОМАЛЬНОЕ ЭНТРОПИЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И АГРЕГАТЫ

*Для изучения локальной структуры в системе твёрдых стержней и кругов, находящихся на двумерной (2D) поверхности, было использовано компьютерное моделирование методом Монте-Карло. При анализе статистики спонтанно возникающих структур из стержней (агрегаты, кластеры) обнаружены две области линеаризации по критериям кластерообразования. На малых расстояниях между стержнями (поперечное  $\sim 40\%$  диаметра и  $\sim 40\%$  соосной продольной длины по центрам стержней) преобладает энтропия близкодествующего объёмного взаимодействия (depletion interacting), а на больших расстояниях преобладает дальнедействующее конфигурационное энтропийное взаимодействие. Высокие концентрации кругов в системе практически «вымораживают» действие конфигурационной энтропии стержней.*

**Ключевые слова:** жёсткие стержни, жёсткие круги, агрегат, кластер, структурообразование, объёмное взаимодействие, энтропийное взаимодействие.

Компьютерное моделирование поведения двумерной смеси жёстких анизотропных молекул (коллоидных частиц) и дисков играет важную роль в понимании жидкокристаллического поведения бинарных смесей. В отсутствие сил притяжения поведение как однородных систем, так и смесей определяется балансом энтропии. Рассмотрение смесей анизотропных и изотропных молекул проводилось до настоящего времени в основном только для трёхмерных систем. Эффективное притяжение (depletion) в таких смесях было продемонстрировано Asakura и Oosawa [1] и Meijer и Frenkel [2] в компьютерном моделировании коллоидов и полимеров. Это поведение было ранее предсказано теоретически в работе Gast, Zal и Rassel [3] на основе теорий возмущений. Предложенный ими теоретический подход был впоследствии усовершенствован Lekkerkerker и др. [4]. Смеси анизотропных и изотропных молекул, содержащие молекулы полимеров, были изучены экспериментально и продемонстрировали богатое фазовое поведение [5–9].

Практическая потребность промышленных технологий и существенное расхождение между аналитическими и экспериментальными данными вызвало появление прямого макроскопического экспериментального моделирования систем жёстких стержней и сфер. К примеру, в настоящее время имеется направление экспериментальных работ, посвящённых изучению псевдо-жидких состояний систем жёстких стержней и сфер (вибро-оживлённые) [10–12] на плоской поверхности.

Наша работа направлена на изучение и описание локальной структуры в 2d-системах анизотропных частиц и уточнение морфологических структур, возникающих в этих системах, посредством введения структурообразующего элемента – агрегата (кластера) [13–17]. Агрегат (кластер) – это образование из рядом расположенных стержней, пространственное расположение которых согласуется с определёнными критериями. Агрегаты (кластеры) можно обнаруживать и при низких, и при высоких концентрациях стержней. Термины «агрегат» и «кластер» в данной статье используются как эквивалентные друг другу. Однако можно заметить, что между ними имеются определённые различия: термин «кластер» применяется, как правило, в отношении компактного и регулярного агрегата.

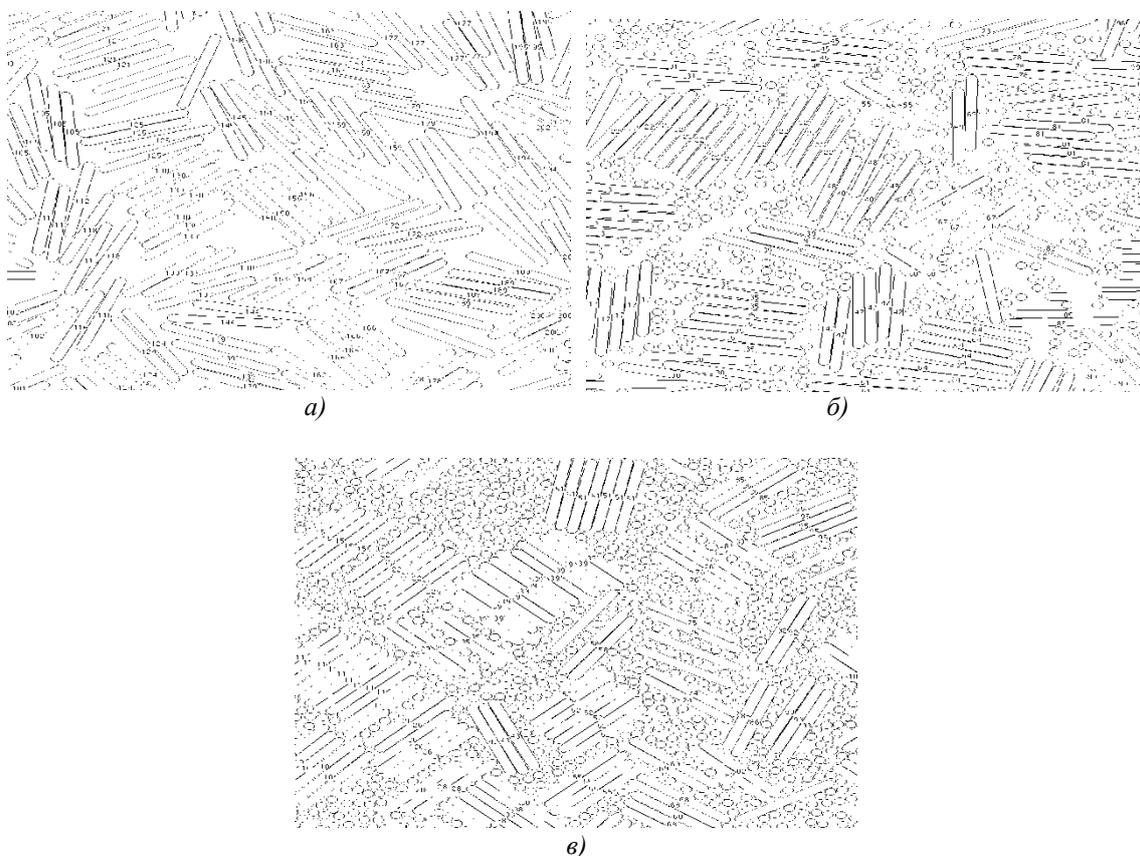
Нами исследовалась континуальная двумерная система твёрдых стержней (дископрямоугольников) с осевым отношением  $P = L/D = 10$  ( $L$ ,  $D$  – длина и диаметр стержня соответственно) и кругов с диаметром, равным диаметру стержня, между которыми имеется только объёмно-топологическое взаимодействие. Для уменьшения граничных эффектов использовались периодические граничные условия. В данной работе изучались три различных (характерных) области концентрации: низкая, средняя и плотная [16]. В настоящей работе мы используем адаптированные геометрические критерии агрегатообразования [16, 17] к физически интерпретируемым в терминах агрегации (кластерообразования) модифицированной

теории Асакуры–Осава [10] и работ, прямо использующих энтропийное взаимодействие [10–12] (depletion interacting).

Отдельного внимания заслуживает определение понятий концентрации стержней, кругов и их общая концентрация в системе. Самая плотная регулярная упаковка кругов на плоскости нами принята за  $C_{\text{круг}} = 1$ , аналогично и самая плотная регулярная упаковка стержней (дископрямоугольников) –  $C_{\text{стержни}} = 1$ . Выпишем равновзвешенную приведённую плотность для системы стержней и кругов на плоскости для случая равенства диаметров у стержней и кругов:

$$C_{\text{систем. привед.}} = \frac{D^2 \left[ N_{\text{стержни}} * (0.25 * \pi + P - 1) + N_{\text{круг}} * 0.25 * \pi \right] * (N_{\text{стержни}} + N_{\text{круг}})}{M_{\text{прост.}}^2 * \left( N_{\text{стержни}} * \frac{0.25 * \pi + P - 1}{\cos(30^\circ) + P - 1} + N_{\text{круг}} * \frac{0.25 * \pi}{\cos(30^\circ)} \right)}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{стержни}}$ ,  $N_{\text{круг}}$  – соответственно, число стержней и кругов в системе;  
 $M_{\text{прост.}}$  – размер моделируемой ячейки.



**Рисунок 1 – Мгновенный снимок части моделируемой системы стержней при концентрации стержней 50% с ПКК  $\gamma = 1$  и  $\beta = 1$ : Стержни, входящие в кластер, пронумерованы; в центре стержня указан номер кластера. Концентрация кругов: а) = 0%, б) = 12%, в) = 28%**

Для проведения расчётов нами была выбрана система из  $N = 1600$  стержней для концентраций стержней (30, 50)% и дополненных необходимым количеством кругов до соответствующей концентрации всей системы. Для концентрации стержней в 10% была выбрана система из  $N = 400$  стержней и дополненных необходимым количеством кругов до соответствующей концентрации системы. На рисунке 1 представлена мгновенная конфигурация части системы на равновесном участке при плотности стержней  $\rho = 0.50$  и осевом отношении  $L/D = 10$  с выявленными кластерами при значениях параметров критерия кластерообразования (ПКК)  $\gamma = 1.0$  и  $\beta = 1.0$ ; в центре стержня указан номер кластера. Как видно из данного рисунка, с повышением концентрации кругов в системе повышается плотность и ре-

гулярность кластеров. На рисунке 1, в с наибольшей плотностью кругов кластеры наиболее плотные и образуют практически столбчатую структуру или «линейную молекулу» по [10].

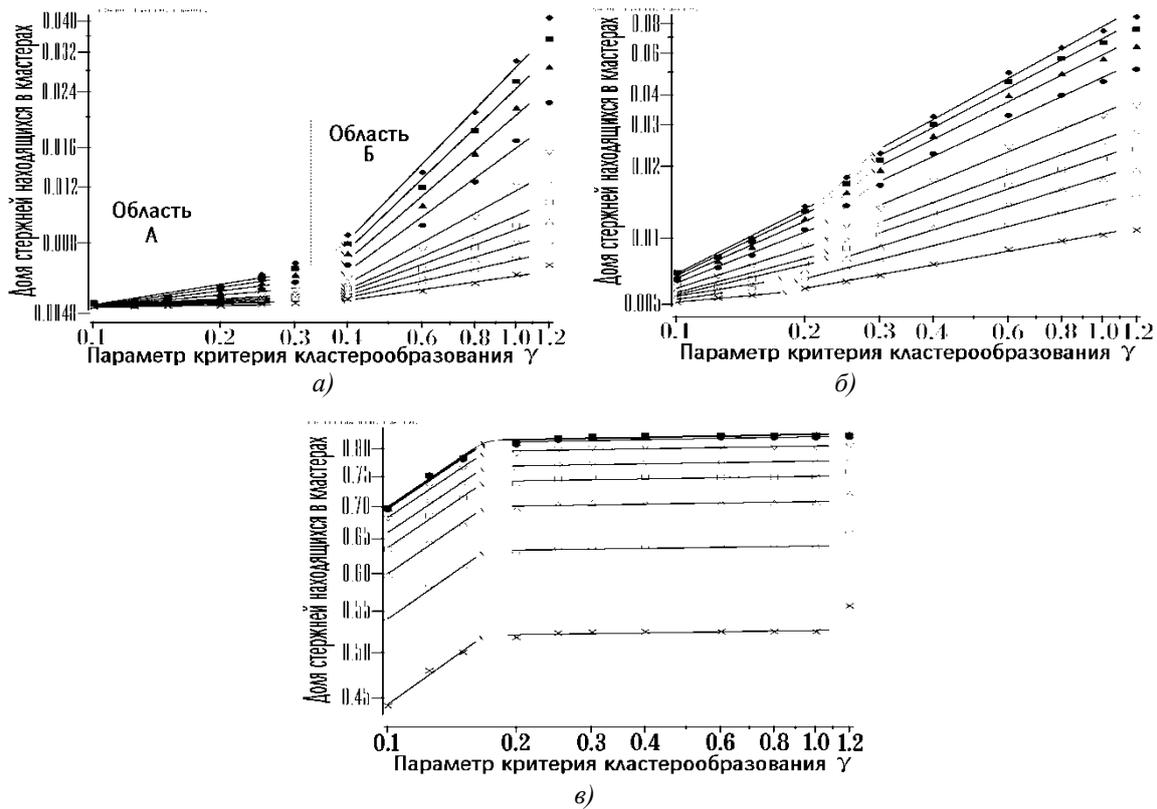


Рисунок 2 – Доля стержней, входящих в кластеры, при осевом отношении стержней  $L/D = 10$ , концентрации стержней 10% и различных концентрациях кругов в функции параметра ПКК  $\gamma$ : а) = 0%; б) = 18%; в) = 50%. Параметр  $\beta$  имеет значения: X – 0.1; O – 0.15;  $\Delta$  – 0.2;  $\square$  – 0.25;  $\diamond$  – 0.3;  $\nabla$  – 0.4;  $\bullet$  – 0.6;  $\blacktriangle$  – 0.8;  $\blacksquare$  – 1.0;  $\blacklozenge$  – 1.2

Модификация параметра ПКК  $\gamma$  [13, 16, 17]; параметра, отвечающего за близость поверхностей стержней друг к другу в агрегате, а значит, суммарно чувствительного к энтропийному взаимодействию между стержнями, позволило выявить интересные закономерности. Доля стержней, входящих в кластеры, в функции параметра ПКК  $\gamma$  линейризуется в двойных логарифмических координатах и имеет степенную зависимость для всех анализируемых концентраций стержней и кругов, что показано на рисунке 2 и 3. Переходной интервал между областями линейризации данных «сшит» непрерывно и гладко полиномом третьей степени. Подгонка параметров прямых, области линейризации и полинома «гладкой шивки» с условием монотонности в переходной области произведены по методу наименьших квадратов индивидуально для каждого набора данных (две прямые + полином), на рисунке 2, 3 они отображаются двумя толстыми прямыми. В работе [16] показано, что для чистой системы стержней подобная линейризация наблюдается для разных осевых отношений стержней  $L/D = 6; 15; 30$  и их различных концентрациях. На рисунке 2, а показана область линейризации «А» – для малых значений параметра ПКК  $\gamma$ , область «Б» – для больших значений. В этих областях мы имеем функциональную зависимость:

$$Y(\gamma) = a_0 * \gamma^{a_1}, \quad (2)$$

где  $Y(\gamma)$  – доля стержней в кластерах;

$a_0, a_1$  – константы, определяемые по расчётным данным численного эксперимента.

На графиках (рисунок 2, 3) переходной интервал отображается тонкой линией и в области наибольшей кривизны помечен пересечением коротким отрезком линии. Значение и ширина переходного интервала зависит от параметров ПКК, концентрации стержней и кругов в системе. При 10% концентрации стержней и отсутствии кругов графики вогнутые, что

соответствует нашей работе [16], приблизительные центры интервалов имеют значения  $\gamma \approx (0.25 \div 0.4)$ . При повышении концентрации кругов в области 18% (общая концентрация системы  $\sim 28\%$ ) в системе имеется примерное равенство наклонов линейризованных графиков в областях «А» и «Б», что, видимо, свидетельствует о том, что в системе имеется равновесное состояние по всему диапазону изменения параметра ПКК  $\gamma$  (поперечное равновесное взаимодействие). И если мы говорим в терминах теории Асакуры–Оосавы (depletion interacting), то в окрестностях общей концентрации системы  $\sim 30\%$  в системе наблюдается равновесное состояние энтропии близкодействующего объёмного взаимодействия и дальнедействующей конфигурационной энтропии (по теориям Онзагера, Флори). При дальнейшем повышении концентрации кругов система переходит в «насыщенное» состояние. В области «Б» (рисунок 2, в) степенной показатель  $a_1$  (2) практически обнуляется (становится константой) (рисунок 4, б) и система стержней и кругов переходит к «вымороженному поперечному взаимодействию» дальнедействующей конфигурационной энтропии. Дополнительно переходная область сдвигается к меньшим значениям ПКК  $\gamma$  и ширина переходной области существенно уменьшается.

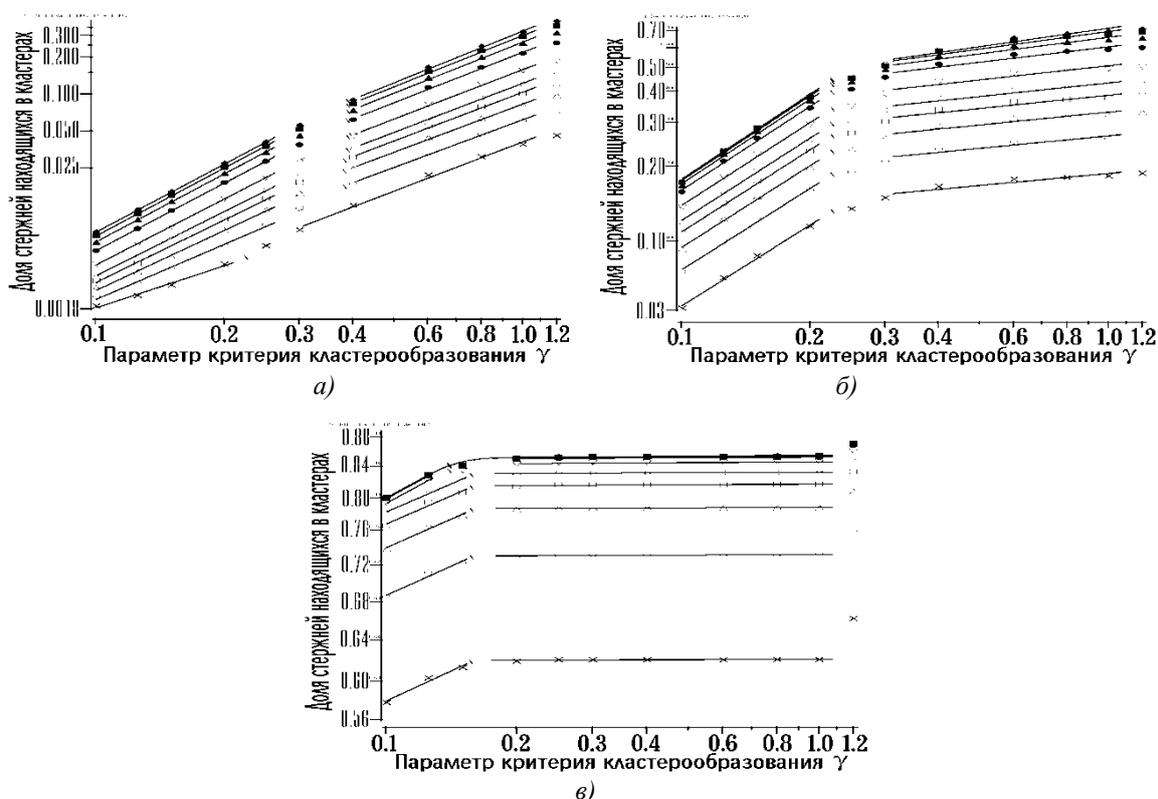
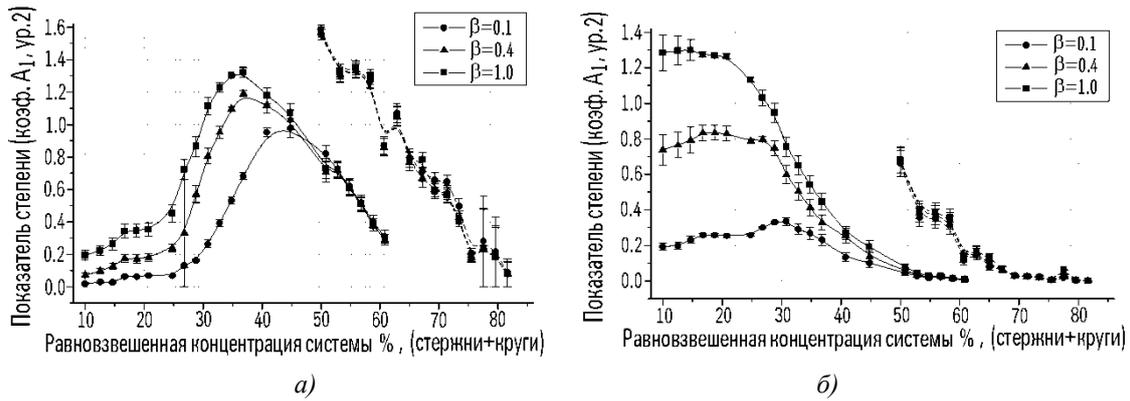


Рисунок 3 – Доля стержней, входящих в кластеры, при осевом отношении стержней  $L/D = 10$ , концентрации стержней 30% и различных концентрациях кругов в функции параметра ПКК  $\gamma$ : а) = 0%; б) = 20%; в) = 40%. Параметр  $\beta$  имеет значения:  $\times$ –0.1;  $\circ$ –0.15;  $\triangle$ –0.2;  $\square$ –0.25;  $\diamond$ –0.3;  $\nabla$ –0.4;  $\bullet$ –0.6;  $\blacktriangle$ –0.8;  $\blacksquare$ –1.0;  $\blacklozenge$ –1.2

При концентрации стержней 30% и в отсутствии кругов система изначально находится в «равновесном состоянии энтропий» по [16] (рисунок 3, а). При дальнейшем повышении концентрации кругов система переходит в «насыщенное» состояние. Графики в области «Б» (рисунок 3, в) показывают, что система стержней и кругов переходит к «вымороженному поперечному взаимодействию» дальнедействующей конфигурационной энтропии. Дополнительно переходная область сдвигается к меньшим значениям ПКК  $\gamma$  и ширина переходной области существенно уменьшается. Аналогичное функциональное поведение в зависимости от концентрации кругов наблюдается и для начальной концентрации стержней в 50%, на рисунке 4 показана функциональная зависимость степенного показателя (коэффициент  $a_1$ , (2) в функции параметра ПКК  $\gamma$ .



**Рисунок 4 – Зависимость степенного показателя (коэффициент  $a_1$ , (2)) в функции параметра ПКК  $\beta$ :**  
 а) область «А» – для малых значений ПКК  $\gamma$ ; б) область «Б» – для больших значений ПКК  $\gamma$ .  
 Концентрация стержней: 10% – сплошная линия; 50% – пунктирная линия. Длина вертикального отрезка, проходящего через символ, соответствует величине среднеквадратичной ошибки.

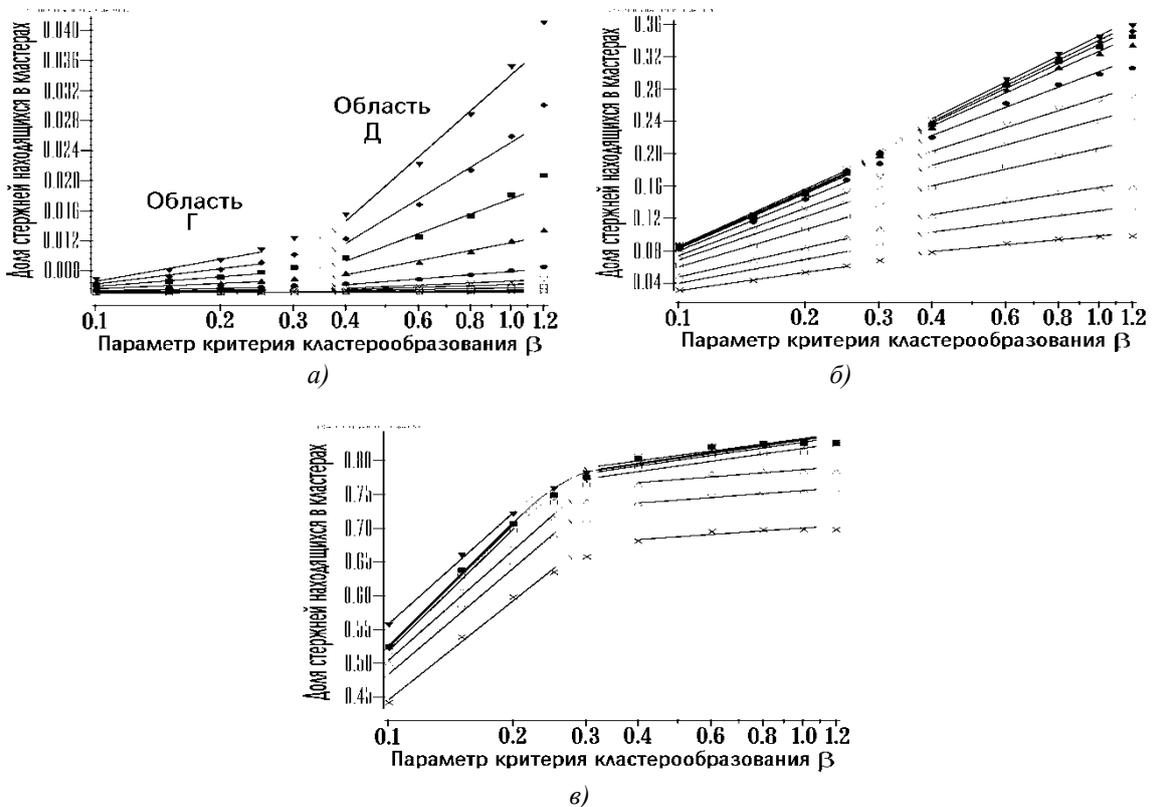
Доля стержней, входящая в кластеры в функции параметра ПКК  $\beta$ , отвечающего за соосную близость стержней, имеет свои особенности, на графиках (рисунок 5, б) выявлены две области, линеаризующиеся в полулогарифмических координатах по параметру ПКК  $\beta$ :

$$Y(\beta) = b_0 + b_1 * \ln(\beta), \quad (3)$$

где  $Y(\beta)$  – доля стержней в кластерах;

$b_0, b_1$  – константы, определяемые по расчётным данным численного эксперимента.

В работе [16] показано, что для чистой системы стержней подобная линеаризация наблюдается для разных осевых отношений стержней  $L/D = 6; 15; 30$  и их различных концентрациях.



**Рисунок 5 – Доля стержней, входящих в кластеры, в функции параметра ПКК  $\beta$  при различных значениях параметра  $\gamma$ , имеющего значения:**  
 $\times$  – 0.1;  $\circ$  – 0.125;  $\triangle$  – 0.15;  $\square$  – 0.2;  $\diamond$  – 0.25;  $\nabla$  – 0.3;  $\bullet$  – 0.4;  $\blacktriangle$  – 0.6;  $\blacksquare$  – 0.8;  $\blacklozenge$  – 1.0;  $\blacktriangledown$  – 1.2.  
 При концентрации стержней 10% и концентрации кругов: а) = 0%; б) = 34%; в) = 50%

Области линеаризации «Г» и «Д» на рисунке 5, 6 отображаются двумя толстыми прямыми. Переходной интервал между областями «Г» и «Д» линеаризации данных «сшит» непрерывно и гладко полиномом третьей степени. Подгонка параметров прямых, области линеаризации и полинома «гладкой сшивки» с условием монотонности в переходной области произведены по методу наименьших квадратов индивидуально для каждого набора данных (две прямые + полином). На графиках (рисунок 5, 6) переходной интервал отображается тонкой линией и в области наибольшей кривизны помечен пересечением коротким отрезком линии. С увеличением концентрации кругов (примерно 42% равновзвешенной концентрации стержней и кругов) система попадает во второе «равновесное взаимодействие – продольное» по параметру ПКК  $\beta$ . При дальнейшем увеличении концентрации кругов система стержней и кругов начинает переходить к «насыщенному» состоянию (рисунок 5, в). На рисунке 7 показана зависимость коэффициента  $b_1$  (3) для начальной концентрации стержней 10% в функции параметра ПКК  $\gamma$ .

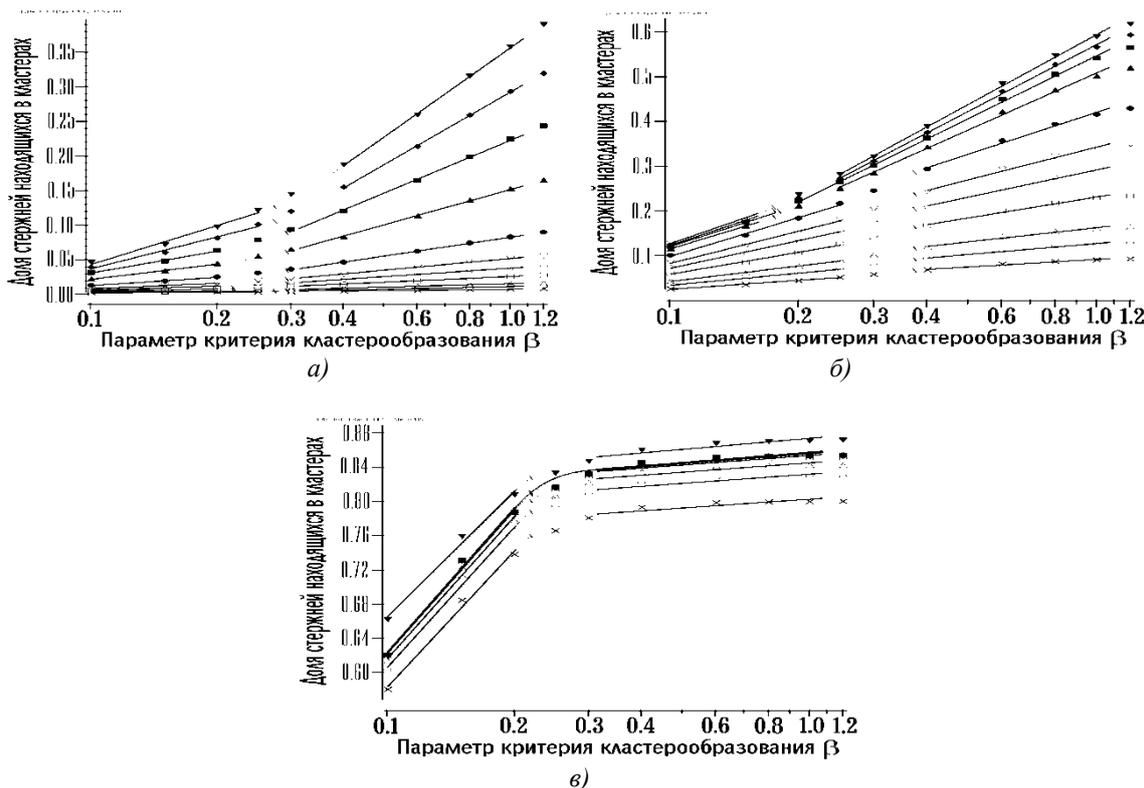


Рисунок 6 – Доля стержней, входящих в кластеры, в функции параметра ПКК  $\beta$  при различных значениях параметра  $\gamma$ , имеющего значения:

× – 0.1; ○ – 0.125; △ – 0.15; □ – 0.2; ◇ – 0.25; ∇ – 0.3; ● – 0.4; ▲ – 0.6; ■ – 0.8; ◆ – 1.0; ▼ – 1.2.

При концентрации стержней 30% и концентрации кругов: а = 0%; б = 16%; в = 40%

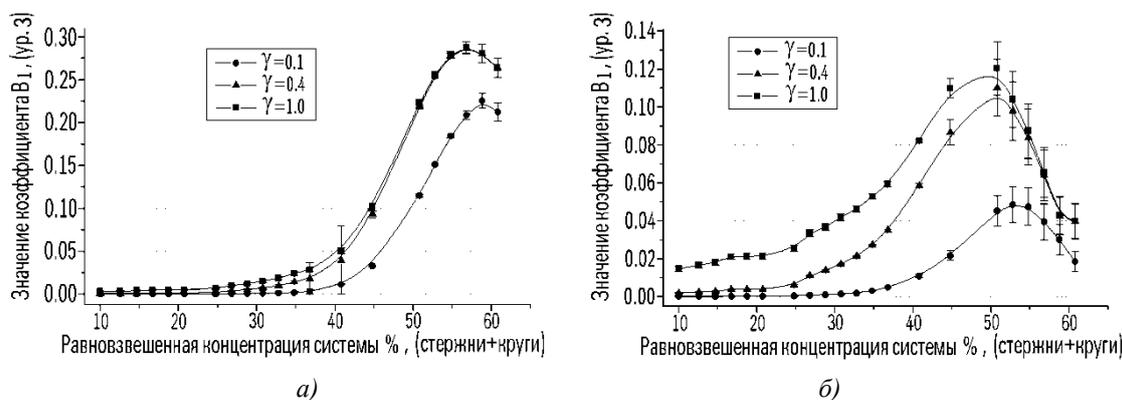


Рисунок 7. Зависимость наклона линеаризованных прямых в функции параметра ПКК  $\gamma$ : а – область «Г» – для малых значений ПКК  $\beta$ ; б – область «Д» – для больших значений ПКК  $\beta$ . Концентрация стержней 10%. Длина вертикального отрезка, проходящего через символ, соответствует величине среднеквадратичной ошибки.

При начальной концентрации стержней 30% поведение системы аналогично, но концентрация «продольного равновесного взаимодействия» повышается примерно до 46%. А вот система стержней при начальной концентрации 50% находится в «равновесном продольном взаимодействии», а при добавлении (4–6)% кругов покидает её. Таким образом, область «равновесного продольного взаимодействия» зависит от начальной концентрации стержней и концентрации кругов, т. е. мы имеем три пары данных ( $C_{\text{стерж.}} = 10\%$ ,  $C_{\text{круг}} = 32\%$ ); (30, 16); (50, 0). Получаем функциональную связь между концентрацией кругов и начальной концентрацией стержней:  $C_{\text{круг}} = 40 - 0.8 * C_{\text{стерж.}}$ ; для условия «равновесного продольного взаимодействия» в исследованном диапазоне начальных концентраций стержней: от 10% до 50%.

Проведённые численные эксперименты показали, что в системе 2d–стержней и кругов некоторые характеристики средних величин, спонтанно возникающих структур из стержней (агрегаты, кластеры), описываются универсальными зависимостями от параметров кластерообразования (2, 3),  $\gamma$  и  $\beta$ ) в широком диапазоне концентраций стержней и кругов в системе. Обнаружена специфическая равновзвешенная концентрация системы стержней и кругов ~30% (рисунок 2, б), при которой наблюдается примерно одинаковый наклон графиков по параметру ПКК  $\gamma$  для ближней и дальней области взаимодействия (поперечное равновесное взаимодействие). А вот для продольного равновесного взаимодействия (по параметру ПКК  $\beta$ ) имеем функциональную связь между концентрацией кругов и концентрацией стержней ( $C_{\text{круг}} = 40 - 0.8 * C_{\text{стерж.}}$ ) в исследованном диапазоне концентраций стержней: от 10% до 50%..

Отметим, что функциональная зависимость доли стержней, входящих в кластеры, от параметров ПКК  $\gamma$  и  $\beta$  указывает на дуалистичность поведения системы стержней, то есть на органическое сочетание близкодействующих и далекодействующих потенциалов взаимодействия. На малых поперечных расстояниях между поверхностями стержней (до 40% диаметра стержня; рисунок 2, 3) и малых соосных продольных расстояниях между центрами стержней (до 40% длины стержня; рисунок 5, 6) преобладает энтропия близкодействующего объёмного взаимодействия (depletion interacting), а на больших расстояниях преобладает далекодействующее конфигурационное энтропийное взаимодействие. При высокой концентрации кругов в системе происходит нивелирование («вымораживание») конфигурационной энтропии стержней. Для уточнения обнаруженных эффектов необходимо проведение дальнейших исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asakura, S. On interaction between two bodies immersed in a solution of macromolecules / S. Asakura, F. Oosawa // J. Chem. Phys. – 1954. – p.p. 1255–1256.
2. Meijer, E. J. Colloids dispersed in polymer–solutions – a computer–simulation study / E. J. Meijer, D. Frenkel // J. Chem. Phys. – 1994. – p.p. 6873–6887.
3. Gast, A.P. Polymer Induced Phase Separations in NonAqueous Colloidal Suspensions / A.P. Gast, C.K. Hall, W.B. Russel // J. Coll. Int. Sci. – 1983. – p.p. 251–267.
4. Lekkerkerker H. N. W. Phase behaviour of colloid + polymer mixtures. /H.N.W. Lekkerkerker, W.C.K. Poon, P.N. Pusey, A. Stroobants, P.B. Warren // Europhys. – 1992. – 559 p.
5. Adams, M.Z. Entropically driven microphase transitions in mixtures of colloidal rods and spheres / M. Adams, Z. Dogic, S.L. Keller, S. Fraden // Nature. – 1998. – p.p. 393.
6. Bolhuis, P. G. Numerical study of the phase diagram of a mixture of spherical and rodlike colloids. / P.G. Bolhuis, D. Frenkel // J. Chem. Phys. – 1994. – p.p. 9869–9875.
7. Lekkerkerker, H.N.W. Phase behaviour of rod–like + flexible polymer mixtures / H.N.W. Lekkerkerker, A. Stroobants // Nuovo Cimento. – 1994. – 949 p.
8. Bolhuis, P.G. Numerical study of the phase behavior of rodlike colloids with attractive interactions. / P.G. Bolhuis, A. Stroobants, D. Frenkel, H.N.W. Lekkerkerker // J. Chem. Phys. – 1997. – 1551 p.
9. Vliegthart, G.A. Phase behavior of colloidal rod–sphere mixtures / G.A. Vliegthart, H.N.W. Lekkerkerker // J. of Chem. Phys. – 1999. – 4153.
10. Galanis J. Depletion forces drive polymer–like self–assembly in vibrofluidized granular materials / J. Galanis, R. Nossala, D. Harries // Soft Matter. – 2010. – p.p. 1026–1034.
11. Daniels, L.J. Dynamics of gas–fluidized granular rods / L.J. Daniels, Y. Park, T.C. Lubensky, D.J. Durian // Physical Review E. 79. – 2009.
12. Aranson, I.S. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles / I.S. Aranson, D. Volfson, S. Lev // Physical Review E 75. – 2007.
13. Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard–rod system: Structural transitions and clusters / I.F. Shadrin, M.R. Sharafutdinov, A.M. Elyashevich // J. Chemical information and computer sciences. – 1994. – V 34. – № 2. – p.p. 335–338.
14. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3 (203). – С. 3–9.
15. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры II / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 4 (294). – С. 14–20.
16. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности и аномальное энтропийное взаимодействие. Агрегаты (кластеры) / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 1. – С. 29–37.

17. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности и энтропийное взаимодействие. Агрегаты (кластеры) / И.Ф. Шадрин // Научные ведомости. Белгородского государственного университета. Математика. Физика. – 2013. – № 24.

**Шадрин Иван Фёдорович**

ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел

Кандидат физико–математических наук, доцент кафедры «Физика»

E–mail: Ivshadr@mail.ru

I.F. SHADRIN

## THE RIGID RODS AND CIRCLES ON THE TWO–DIMENSIONAL SURFACE. ABNORMAL ENTROPIC INTERACTING AND ASSEMBLIES

*For study of local frame in system of firm rods and the circles which are on bidimensional (2d) surfaces, computer modeling by a Monte–Carlo method has been used. At the analysis of statistics of spontaneously originating frames from rods (assemblies, clusters) are detected two fields of a linearization by measure of clustering. On small distances between rods (cross ~ 40% of diameter and ~40% of coaxial dilatational length on centers of rods) predominate entropy of short–range volume interacting (depletion interacting), and on major distances long–range configuration entropic interacting predominates. High concentrations of circles in system practically «freeze» activity of configurationally entropy of rods.*

**Keywords:** the rigid rods, circles, the assembly, a cluster, structure formation, patterning, depletion interacting, entropic interacting.

### BIBLIOGRAPHY

1. Asakura, S. On interaction between two bodies immersed in a solution of macromolecules / S. Asakura, F. Oosawa // J. Chem. Phys. – 1954. – p.p. 1255–1256.
2. Meijer, E. J. Colloids dispersed in polymer–solutions – a computer–simulation study / E. J. Meijer, D. Frenkel // J. Chem. Phys. – 1994. – p.p. 6873–6887.
3. Gast, A.P. Polymer Induced Phase Separations in NonAqueous Colloidal Suspensions / A.P. Gast, C.K. Hall, W.B. Russel // J. Coll. Int. Sci. – 1983. – p.p. 251–267.
4. Lekkerkerker H. N. W. Phase behaviour of colloid + polymer mixtures. /H.N.W. Lekkerkerker, W.C.K. Poon, P.N. Pusev, A. Stroobants, P.B. Warren // Europhys. – 1992. – 559 p.
5. Adams, M.Z. Entropically driven microphase transitions in mixtures of colloidal rods and spheres / M. Adams, Z. Dogic, S.L. Keller, S. Fraden // Nature. – 1998. – p.p. 393.
6. Bolhuis, P. G. Numerical study of the phase diagram of a mixture of spherical and rodlike colloids. / P.G. Bolhuis, D. Frenkel // J. Chem. Phys. – 1994. – p.p. 9869–9875.
7. Lekkerkerker, H.N.W. Phase behaviour of rod–like + flexible polymer mixtures / H.N.W. Lekkerkerker, A. Stroobants // Nuovo Cimento. – 1994. – 949 p.
8. Bolhuis, P.G. Numerical study of the phase behavior of rodlike colloids with attractive interactions. / P.G. Bolhuis, A. Stroobants, D. Frenkel, H.N.W. Lekkerkerker // J. Chem. Phys. – 1997. – 1551 p.
9. Vliegenthart, G.A. Phase behavior of colloidal rod–sphere mixtures / G.A. Vliegenthart, H.N.W. Lekkerkerker // J. of Chem. Phys. – 1999. – 4153.
10. Galanis J. Depletion forces drive polymer–like self–assembly in vibrofluidized granular materials / J. Galanis, R. Nossala, D. Harries // Soft Matter. – 2010. – p.p. 1026–1034.
11. Daniels, L.J. Dynamics of gas–fluidized granular rods / L.J. Daniels, Y. Park, T.C. Lubensky, D.J. Durian // Physical Review E. 79. – 2009.
12. Aranson, I.S. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles / I.S. Aranson, D. Volfson, S. Lev // Physical Review E 75. – 2007.
13. Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard–rod system: Structural transitions and clusters / I.F. Shadrin, M.R. Sharafutdinov, A.M. Elvashevich // J. Chemical information and computer sciences. – 1994. – V 34. – № 2. – p.p. 335–338.
14. Shadrin, I.F. Zhostkiye sterzhni na dvumernov poverkhnosti. Klasteriy / I.F. Shadrin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2012. – № 3 (203). – S. 3–9.
15. Shadrin, I.F. Zhostkiye sterzhni na dvumernov poverkhnosti. Klasteriy II / I.F. Shadrin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2012. – № 4 (294). – S. 14–20.
16. Shadrin, I.F. Zhostkiye sterzhni na dvumernov poverkhnosti i anomalnoye entropivnoye vzaimodevstviye. Agregaty (klasteriy) / I.F. Shadrin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 1. – S. 29–37.
17. Shadrin, I.F. Zhostkiye sterzhni na dvumernov poverkhnosti i entropivnoye vzaimodevstviye. Agregaty (klasteriy) / I.F. Shadrin // Nauchnyye vedomosti. Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika. – 2013. – № 24.

**Shadrin Ivan Fodorovich**

State University – ESPC, Orel

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of «Physics»

E–mail: Ivshadr@mail.ru

## ТОРМОЖЕНИЕ РОСТА КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРЕЩИНЫ С КОНЦЕВЫМИ ПЛАСТИЧЕСКИМИ ЗОНАМИ С ПОМОЩЬЮ НАВЕДЕННОГО ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

*Проводится математическое описание торможения роста криволинейной трещины путем нагрева тепловым источником области в окрестности обоих концов трещины на пути ее развития. Сущность применяемого метода состоит в построении в явной форме аналитических функций, соответствующих неизвестным перемещениям вдоль криволинейной трещины. Полученные соотношения дают возможность рассчитать влияние теплового источника (нагретой области) на рост криволинейной трещины в растягиваемой пластине с учетом пластических деформаций.*

**Ключевые слова:** криволинейная трещина, концевые зоны пластических деформаций, температурное поле, температурные напряжения.

К числу весьма эффективных средств торможения роста трещины могут быть отнесены температурные и термоупругие поля [1–3]. Известно, что создание надежных противаварийных систем представляет собой важную проблему, особенно тогда, когда речь идет об уникальных сооружениях и безопасности людей. В связи с этим имеет теоретический и практический интерес исследование торможения роста криволинейной трещины в растягиваемой пластине с учетом пластических деформаций с помощью наведенного теплового поля напряжений.

Рассмотрим бесконечную однородную изотропную пластину, изготовленную из упругого идеально–пластического материала с одной трещиной длиной  $2\ell$  (рисунок 1). В реальных материалах из–за структурных и технологических факторов поверхности трещины имеют неровности и искривления. Рассматривается плоская задача механики упругопластического разрушения о трещине в плоскости, полагая, что контур трещины имеет неровности (малые отклонения от прямолинейной формы). Берега трещины свободны от внешних нагрузок. На бесконечности действует однородное растягивающее напряжение  $\sigma_y^\infty = \sigma_0$ .

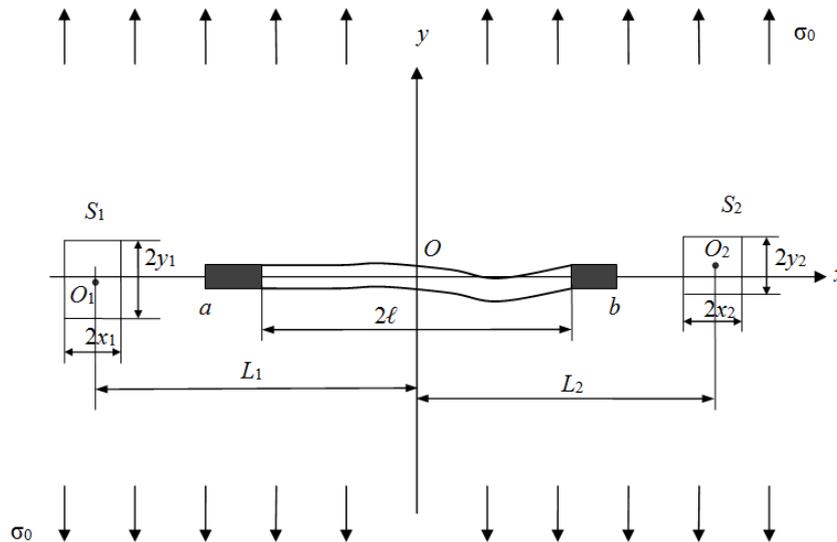


Рисунок 1 – Расчетная схема задачи о торможении трещины

Для торможения роста криволинейной трещины на пути ее роста с помощью нагрева тепловым источником области  $S = S_1 + S_2$  до температуры  $T_0$  создается зона сжимающих напряжений. Материал пластины удовлетворяет условию пластичности Треска–Сен–Венана.

Требуется определить напряженно–деформированное состояние пластины вне криволинейной трещины, а также предельную внешнюю нагрузку, при достижении которой трещины с концевыми пластическими зонами будет расти по сечению листового элемента.

Принимаем следующие упрощающие допущения:

а) все физико–механические характеристики материала листового элемента не зависят от температуры;

б) металл пластины представляет собой однородное и изотропное тело.

Пусть в момент  $t = 0$  произвольная область  $S$  на пути роста трещины в листовом элементе мгновенно нагревается до постоянной температуры  $T = T_0$ . Остальная часть листового элемента в начальный момент имеет нулевую температуру. Под действием внешней растягивающей нагрузки  $\sigma_0$  в вершинах трещины будут возникать зоны пластических деформаций. Рассмотрим задачу о начальном развитии пластических деформаций в кончиках трещины. На основании расчетной схемы Леонова–Панасюка–Дагдейла [4] пластические области будут представлять собой узкие слои на продолжении криволинейной трещины. Как показывают опыты [4 – 6], пластические области будут представлять в таких случаях отрезки некоторой длины  $d_1$  и  $d_2$  вдоль линии трещины.

Размеры  $d_1 = -a - \ell$  и  $d_2 = b - \ell$  концевых зон пластических деформаций подлежат определению. Трещина, имеющаяся в листовом элементе, считается близкой к прямолинейной форме, допуская лишь малые отклонения линии трещины от прямой  $y = 0$ .

Уравнение линии трещины с концевыми зонами принимается в виде  $y = f(x)$ ,  $a \leq x \leq b$ . На основании принятого допущения о форме линии трещины функции  $f(x)$  и  $f'(x)$  являются малыми величинами. Граничные условия рассматриваемой задачи имеют вид:

$$\sigma_n - i\tau_{nt} = 0 \quad \text{при } y = f(x), \quad |x| \leq \ell, \quad (1)$$

$$\sigma_n = \sigma_S; \quad \tau_{nt} = \tau_S \quad \text{при } y = f(x) \quad a \leq x \leq -\ell \text{ и } \ell \leq x \leq b,$$

где  $n, t$  – натуральные координаты;

$\sigma_S$  – предел текучести материала на растяжение;

$\tau_S$  – предел текучести материала на сдвиг.

Для решения задачи вначале определяем температурное поле в плоскости. Температурное поле плоскости определяется из решения краевой задачи теории теплопроводности:

$$a\Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad T = \begin{cases} T_0 & (x, y \in S), \\ 0 & (x, y \notin S), \end{cases} \quad \text{при } t = 0,$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа;

$a$  – коэффициент температуропроводности материала плоскости.

Для обобщенного плоского напряженного состояния считается, что пластина теплоизолирована на боковых поверхностях.

Для определенности, не нарушая общности задачи, пусть область  $S = S_1 + S_2$  представляет совокупность двух прямоугольников со стороны  $2x_j$  и  $2y_j$  ( $j = 1, 2$ ) (рисунок 1). Решение задачи получим методом суперпозиции:

$$\sigma_x = \sigma_{x_0} + \sigma_{x_1}; \quad \sigma_y = \sigma_{y_0} + \sigma_{y_1}; \quad \tau_{xy} = \tau_{xy_0} + \tau_{xy_1}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{x_0}, \sigma_{y_0}, \tau_{xy_0}$  – есть решение задачи термоупругости для пластины без трещины.

После решения задачи термоупругости для сплошной плоскости находим [7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{y_0} &= \sum_{k=1}^2 \sigma_{y_{0k}}; & \tau_{xy_0} &= \sum_{k=1}^2 \tau_{xy_{0k}}; \\ \sigma_{y_{0k}} &= -\frac{\mu(1+\nu)\alpha T_0}{4\sqrt{\pi}} \left\{ 4\sqrt{\pi}A(x, y) + \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left[ \arctg\left(\frac{y-b_k+y_k}{x-L_k+x_k}\right) + \right. \right. \\ &+ \arctg\left(\frac{y_k+b_k-y}{x_k+L_k-x}\right) + \arctg\left(\frac{y_k+b_k-y}{x-L_k+x_k}\right) + \arctg\left(\frac{y-b_k+y_k}{x_k+L_k-x}\right) - \\ &- \int_0^t \frac{1}{\tau\sqrt{a\tau}} \left[ (x-L_k+x_k) \exp\left(-\frac{(x-L_k+x_k)^2}{4a\tau}\right) + (x_k+L_k-x) \exp\left(-\frac{(x_k+L_k-x)^2}{4a\tau}\right) \times \right. \\ &\left. \left. \times \left[ \text{Erf}\left(\frac{y-b_k+y_k}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \text{Erf}\left(\frac{y_k+b_k-y}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right] \right] d\tau \right\}; \end{aligned}$$

$$\tau_{xy_0k} = -\frac{\mu(1+\nu)\alpha T_0}{2\pi} \left\{ \ln \frac{(x-x_k-L_k)^2 + (y-b_k+y_k)^2}{(x-x_k-L_k)^2 + (y-y_k-b_k)^2} + \right. \\ \left. + \ln \frac{(x-L_k+x_k)^2 + (y-y_k-b_k)^2}{(x-L_k+x_k)^2 + (y-b_k+y_k)^2} - \int_0^t \frac{1}{\tau} \left[ \exp\left(-\frac{(x-L_k+x_k)^2}{4a\tau}\right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \exp\left(-\frac{(x_k+L_k-x)^2}{4a\tau}\right) \right] \left[ \exp\left(-\frac{(y-b_k+y_k)^2}{4a\tau}\right) - \exp\left(-\frac{(y_k+b_k-y)^2}{4a\tau}\right) \right] d\tau \right\}.$$

где  $A(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y \in S_k) \\ 0 & (x, y \notin S_k) \end{cases}$ ,

$\mu$  – модуль сдвига материала пластины;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения.

Граничные условия (1) на берегах трещины с концевыми пластическими зонами на основании (2) принимают вид:

$$\sigma_{n_1} - i\tau_{nt_1} = -(\sigma_{y_0}(x, 0) - i\tau_{xy_0}(x, 0)) \quad \text{при } y = f(x), \quad |x| \leq \ell, \\ \sigma_{n_1} - i\tau_{nt_1} = -(\sigma_{y_0} - i\tau_{xy_0}) + \sigma_S - i\tau_S \quad \text{при } y = f(x), \quad a \leq x \leq -\ell \text{ и } \ell \leq x \leq b.$$

Рассмотрим некоторую произвольную реализацию искривленной (с малыми отклонениями от прямолинейной формы) поверхности берегов трещины. Так как функции  $f(x)$  и  $f'(x)$  являются малыми величинами, функцию  $f(x)$  можно представить в виде:

$$f(x) = \varepsilon H(x) \quad a \leq x \leq b,$$

где  $\varepsilon$  – малый параметр.

Компоненты тензора напряжений  $\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}, \tau_{xy_1}$  ищем в виде:

$$\sigma_{x_1} = \sigma_x^{(0)} + \varepsilon\sigma_x^{(1)} + \dots, \quad \sigma_{y_1} = \sigma_y^{(0)} + \varepsilon\sigma_y^{(1)} + \dots, \quad \tau_{xy_1} = \tau_{xy}^{(0)} + \varepsilon\tau_{xy}^{(1)} + \dots$$

Значения напряжений при  $y = f(x)$  найдем, разлагая в ряд выражения для напряжений в окрестности  $y = 0$ . Используя процедуру метода возмущений с учетом предыдущих формул, находим краевые условия при  $y = 0, a \leq x \leq b$ :

– в нулевом приближении:

$$\sigma_y^{(0)} - i\tau_{xy}^{(0)} = -(\sigma_{y_0} - \tau_{xy_0}) \quad \text{при } y = 0, \quad |x| \leq \ell, \\ \sigma_y^{(0)} - i\tau_{xy}^{(0)} = \sigma_S - i\tau_S - (\sigma_{y_0} - \tau_{xy_0}) \quad \text{при } y = 0, \quad a_0 \leq x \leq -\ell \text{ и } \ell \leq x \leq b_0; \quad (3)$$

– в первом приближении:

$$\sigma_y^{(1)} - i\tau_{xy}^{(1)} = N - iT \quad \text{при } y = 0, \quad a_1 \leq x \leq b_1. \quad (4)$$

Здесь 
$$N = 2\tau_{xy}^{(0)} \frac{dH}{dx} - H \frac{\partial \sigma_y^{(0)}}{\partial y}, \quad T = (\sigma_y^{(0)} - \sigma_x^{(0)}) \frac{dH}{dx} - H \frac{\partial \tau_{xy}^{(0)}}{\partial y} \quad \text{при } y = 0; \\ a = a_0 + \varepsilon a_1 + \dots, \quad b = b_0 + \varepsilon b_1 + \dots$$

Компоненты тензора напряжений  $\sigma_x^{(0)}, \sigma_y^{(0)}, \tau_{xy}^{(0)}$  и вектора перемещений  $u_0, v_0$  выразим через две кусочно–аналитические функции комплексного переменного  $z = x + iy$   $\Phi_0(z)$  и  $\Omega_0(z)$  [8].

Используя формулы Колосова–Мухелишвили [8] и граничные условия (3) в нулевом приближении, для определения комплексных потенциалов  $\Phi_0(z)$  и  $\Omega_0(z)$  имеем краевые условия:

$$\Phi_0(z) + \overline{\Phi_0(z)} + \bar{z}\Phi_0'(z) + \Psi_0(z) = f_0(x), \quad (5)$$

где 
$$f_0(x) = \begin{cases} -\sigma_0 - (\sigma_{y_0} + i\tau_{xy_0}) & \text{при } y = 0, \quad |x| \leq \ell \\ -\sigma_0 - (\sigma_{y_0} + i\tau_{xy_0}) + \sigma_S + i\tau_S & \text{при } a_0 \leq x \leq -\ell \text{ и } \ell \leq x \leq b_0 \end{cases}$$

Комплексные потенциалы  $\Phi_0(z)$  и  $\Psi_0(z)$  ищем в виде:

$$\Phi_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{a_0}^{b_0} \frac{g_0(t) dt}{t-z}, \quad (6)$$

$$\Psi_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{a_0}^{b_0} \left[ \frac{g_0(t)}{t-z} - \frac{t g_0(t)}{(t-z)^2} \right] dt,$$

где искомая функция  $g(x)$  выражается через производную раскрытия берегов трещины с концевыми пластическими зонами:

$$g_0(x) = \frac{2\mu}{1+\kappa} \frac{d}{dx} \left[ v_0^+(x,0) - v_0^-(x,0) + i \left( u_0^+(x,0) - u_0^-(x,0) \right) \right],$$

где  $\kappa = 3 - 4\nu$  для плоской деформации и  $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$  для плоского напряженного состояния.

К соотношениям (6) следует добавить дополнительное условие, обеспечивающее однозначность перемещений при обходе контура трещины с концевыми пластическими зонами:

$$\int_{a_0}^{b_0} g_0(x) dx = 0. \quad (7)$$

Удовлетворяя функциями (6) краевому условию на берегах трещины с концевыми зонами (3), после некоторых преобразований получим сингулярное интегральное уравнение относительно искомой функции  $g_0(x)$  в нулевом приближении:

$$\frac{1}{\pi} \int_{a_0}^{b_0} \frac{g_0(t) dt}{t-x} = f_0(x), \quad (8)$$

Сингулярное интегральное уравнение (8) при дополнительном условии (7) после перехода к безразмерным переменным с помощью процедуры алгебраизации сводится к системе  $M$  комплексных алгебраических уравнений для нахождения приближенных значений искомой функции  $g_0(\tau_m) = g_m^0$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) в узловых точках:

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{g_m^0}{\tau_m - \eta_r} = f_0(\eta_r) \quad r = 1, 2, \dots, M-1, \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M g_m^0 = 0.$$

Для замкнутости алгебраической системы (9) не хватает двух уравнений, позволяющих определить размеры концевых пластических зон. Записывая условия конечности напряжений в вершинах трещины, получаем два недостающих уравнения:

$$\sum_{m=1}^M (-1)^{m+M} g_m^0 \operatorname{tg} \frac{\theta_m}{2} = 0; \quad \theta_m = \frac{2m-1}{2M} \pi; \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M (-1)^m g_m^0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_m}{2} = 0.$$

Полученные алгебраические системы (9) и (10) связаны между собой и должны решаться совместно. Система уравнений (9) и (10) является нелинейной из-за неизвестных параметров (размеров)  $a_0$  и  $b_0$  концевых зон пластических деформаций. Следовательно, необходимо решать нелинейную систему из  $M+2$  уравнений, что представляет определенные математические трудности.

Ниже предлагаются два способа для преодоления этих трудностей.

а) если размеры концевых зон пластических деформаций были бы известны, то алгебраическая система была бы линейной. В связи с этим целесообразно нелинейную алгебраическую систему решать методом последовательных приближений. Решаем полученную систему из первых  $M$  уравнений (9) при некотором определенном значении параметров  $a_0^*$  и  $b_0^*$

(например, при  $a_0^* = -\frac{3}{2}\ell$  и  $b_0^* = \frac{3}{2}\ell$ ) относительно  $M$  неизвестных  $g_m^0$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ). Значения параметров  $a_0^*$  и  $b_0^*$  и найденные величины  $g_m^0$  подставляются в  $(M + 1)$  и  $(M + 2)$  уравнения системы (в неиспользованные уравнения (10) системы). Взятые значения параметров  $a_0^*$  и  $b_0^*$  и соответствующие им значения  $g_m^0$  не будут, вообще говоря, удовлетворять двум уравнениям (10). Поэтому, подбирая новые значения параметров  $a_0^*$  и  $b_0^*$  будем многократно повторять вычисления до тех пор, пока два последние уравнения (10) не будут удовлетворяться с заданной точностью.

б) целесообразно использовать обратный метод. Учитывая, что внешняя нагрузка  $\sigma_0$  и параметр температуры  $T_0$  входят в уравнения системы (9) линейным образом, предлагается следующей способ решения разрешающей системы уравнений (9) – (10). Задаем некоторые значения параметров  $a_0$  и  $b_0$ . Решаем алгебраическую систему (9) – (10), считая дополнительными неизвестными величины  $\sigma_0$  и  $T_0$ . Другими словами, проще считать заданными размеры пластических зон  $a_0$  и  $b_0$ , и определять соответствующую внешнюю нагрузку  $\sigma_0$  и параметр  $T_0$ , действующую на пластину. При этом приходится решать каждый раз линейную алгебраическую систему. Линейная алгебраическая система в обоих способах решалась методом Гаусса с выбором главного элемента.

После решения задачи в нулевом приближении и нахождения компонент тензора напряжений находим функции  $N$  и  $T$ . Последовательность решения задачи (4) в первом приближении проводим аналогично нулевому приближению. Функции  $\Phi_1(z)$  и  $\Psi_1(z)$  ищутся аналогично (6) с очевидными изменениями. Для искомой функции  $g_1(x)$ :

$$g_1(x) = \frac{2\mu}{1+\kappa} \frac{d}{dx} \left[ v_1^+(x,0) - v_1^-(x,0) + i(u_1^+(x,0) - u_1^-(x,0)) \right],$$

как и в нулевом приближении, получаем сингулярное интегральное уравнение:

$$\frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{b_1} \frac{g_1(t) dt}{t-x} = N - iT, \tag{11}$$

Сингулярное интегральное уравнение (11) при дополнительном условии типа (7), сводится к конечной алгебраической системе из  $M$  уравнений для нахождения приближенных значений искомой функции  $g_1(\tau_m) = g_m^1$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) в узловых точках:

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{g_m^1}{\tau_m - \eta_r} = N(\eta_r) - iT(\eta_r) \quad r = 1, 2, \dots, M - 1, \tag{12}$$

$$\sum_{m=1}^M g_m^1 = 0.$$

Для замкнутости системы (12) добавляются условия конечности напряжений в вершинах трещин, служащие для определения неизвестных параметров  $a_1$  и  $b_1$ .

На рисунке 2 – 3 представлены графики зависимости безразмерной длины полосы пластичности  $d_2 = (b - \ell)/L$  и  $d_1 = (|a| - \ell)/L$  от безразмерной растягивающей нагрузки  $\sigma_0/\sigma_S$  для следующих значений свободных параметров  $\nu = 0,3$ ;  $\varepsilon_0 = x_0/L = 0,6; 0,7; 0,8$ ;  $\varepsilon_1 = y_0/L = 0,1; 0,2$ ;  $L_1 = L_2 = L$ ;  $\ell_* = \ell/L = 0,3; 0,5; 0,75$ ;  $t_* = 4at/L^2 = 10; 20$ . При расчете было принято  $M = 30$ .

Расчеты показывают, что нагретая зона способствует протеканию пластических деформаций в вершине трещины.

Используя полученное решение и производя некоторые преобразования, находим раскрытие берегов трещины у основания зоны пластических деформаций:

– для левой вершины:

$$v^+(-\ell, 0) - v^-(-\ell, 0) + i(u^+(-\ell, 0) - u^-(-\ell, 0)) =$$

$$= -\frac{\pi(1+\kappa)(b-a)}{4\mu M} \sum_{m=1}^{M_1} (g_0(\tau_m) + \varepsilon g_1(\tau_m))$$

– для правой вершины трещины

$$v^+(\ell, 0) - v^-(\ell, 0) + i(u^+(\ell, 0) - u^-(\ell, 0)) =$$

$$= -\frac{\pi(1+\kappa)(b-a)}{4\mu M} \sum_{m=1}^{M_2} (g_0(\tau_m) + \varepsilon g_1(\tau_m))$$

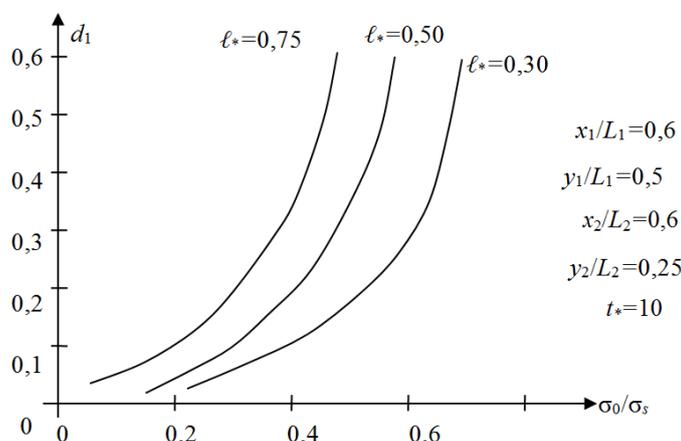


Рисунок 2 – Зависимость безразмерной длины концевой зоны пластических деформаций  $d_1 = (-\ell - a)/L_1$  от безразмерной растягивающей нагрузки  $\sigma_0/\sigma_s$

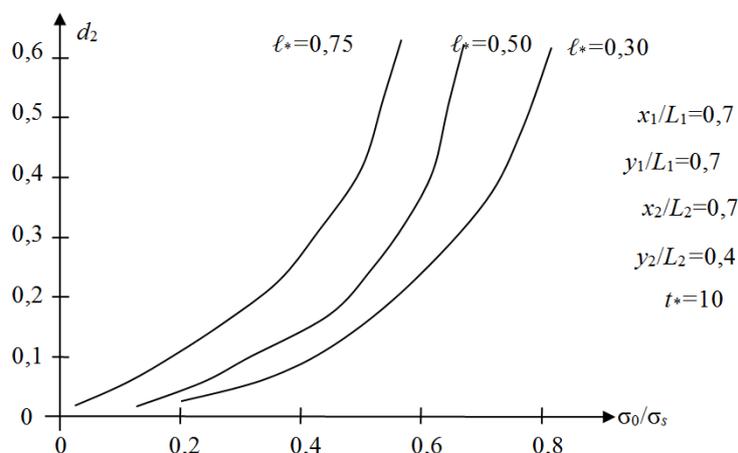


Рисунок 3 – Зависимость безразмерной длины концевой зоны пластических деформаций  $d_2 = (b - \ell)/L_2$  от безразмерной растягивающей нагрузки  $\sigma_0/\sigma_s$

Для модуля раскрытия берегов трещины у основания зоны пластических деформаций находим:

– для левой вершины трещины:

$$V^l = \frac{\pi(1+\kappa)(b-a)}{4\mu M} \sqrt{A^2 + B^2}$$

– для правой вершины трещины:

$$V^n = \frac{\pi(1+\kappa)(b-a)}{4\mu M} \sqrt{C^2 + D^2}$$

Условием, определяющим критическое значение внешней растягивающей нагрузки, при которой происходит рост трещины будет:

– для левой вершины трещины:

$$V^l = \delta_c \tag{13}$$

– для правой вершины трещины:

$$V^n = \delta_c \quad (14)$$

Совместное решение нелинейной системы уравнений (9) – (10) и уравнения (13) или (14) позволяет определить критическую зависимость приложенной нагрузки  $\sigma_0$  от длины трещины, размеры пластических зон и значения искомой функции  $g_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) в узловых точках.

Расчеты показывают, что тепловое поле напряжений значительно замедляет развитие трещины и способствует увеличению предельных разрушающих нагрузок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкель, В.М. Физические основы торможения разрушения / В.М. Финкель. – М.: Metallurgiya, 1977. – 360 с.
2. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
3. Мирсалимов, В.М. Влияние наведенного теплового поля напряжений на рост трещины в упругопластической пластине / В.М. Мирсалимов, Р.И. Кадиев // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2004. – № 1. – С. 10–12.
4. Панасюк, В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1991. – 416 с.
5. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
6. Rusinko, A. Plasticity and Creep of Metals / A. Rusinko, K. Rusinko. – Springer, Berlin, 2011. – 434 p.
7. Паркус, Г. Неустановившиеся температурные напряжения / Г. Паркус. – М.: Физматгиз, 1963. – 252 с.
8. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.

**Мустафаев Азер Байрам оглы**  
 докторант Института математики и механики  
 НАН Азербайджана  
 к.ф.-м.н. наук  
 E-mail: azer\_bm@list.ru

A.B. MUSTAFAYEV

### RETARDATION OF GROWTH OF CURVILINEAR CRACK WITH END PLASTIC ZONES USING INDUCED HEAT FIELD OF STRESSES

*The mathematical description of retardation of curvilinear crack growth by heat source heating a area in the vicinity of both crack ends on the its growth way is carried out. The essence of the using method consists in the construction in explicit form the analytic functions corresponding to the unknown displacements along the curvilinear crack. The obtained relations allow to calculate the effect of the heat source (heated area) on the curvilinear crack growth in elongated plate with the plastic deformations.*

**Keywords:** *curvilinear crack, end zones of plastic deformation, temperature field, thermal stresses.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Finkel, V.M. Fizicheskiye osnovy tormozheniya razrusheniya / V.M. Finkel. – M.: Metallurgiya, 1977. – 360 s.
2. Parton, V.Z. Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya / V.Z. Parton, Ye.M. Morozov. – M.: Nauka, 1985. – 504 s.
3. Mirsalimov, V.M. Vliyaniye navedennogo teplovogo polya napryazheniy na rost treshchiny v uprugoplasticheskoy plastine / V.M. Mirsalimov, R.I. Kadiyev // Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. – 2004. – № 1. – S. 10–12.
4. Panasyuk, V.V. Mekhanika kvazikhрупкого razrusheniya materialov / V.V. Panasyuk. – Kiyev: Naukova dumka, 1991. – 416 s.
5. Mirsalimov, V.M. Neodnomernyye uprugoplasticheskiye zadachi / V.M. Mirsalimov. – M.: Nauka, 1987. – 256 s.
6. Rusinko, A. Plasticity and Creep of Metals / A. Rusinko, K. Rusinko. – Springer, Berlin, 2011. – 434 p.
7. Parkus, G. Neustanovivshiyesya temperaturnyye napryazheniya / G. Parkus. – M.: Fizmatgiz, 1963. – 252 s.
8. Muskhelishvili, N.I. Nekotoryyye osnovnyye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti / N.I. Muskhelishvili. – M.: Nauka, 1966. – 707 s.

**Mustafayev Azer Bayram oglu**  
 doctorant of Institute of Mathematics and Mechanics of Azerbaijan National Academy of Sciences  
 Ph. D. sciences  
 E-mail: azer\_bm@list.ru

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621:658.62.018.012

Е.В. ОЛЕЙНИКОВА

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОДБОРА ДЕТАЛЕЙ ПРИ СБОРКЕ

*Рассмотрена математическая модель повышения качества сборки в машиностроении путем использования вероятностно–статистических методов.*

**Ключевые слова:** вероятностно–статистическая модель, сборка, процесс, качество, размер, технология.

Параметры качества любого готового изделия в значительной степени определяются уровнем технологии и особенностью процессов сборки, которые являются завершающим и наиболее ответственным этапом производства продукции.

Одним из основных показателей качества сборки любого изделия является точность, оцениваемая величиной погрешности размера замыкающего звена. Для повышения качества изготовления изделия необходимо стремиться к уменьшению разброса величины замыкающего звена.

Качество сборки традиционно обеспечивают методами взаимозаменяемости или компенсации. При использовании этих методов параметры качества полученного соединения оценивают только после окончания его сборки. Все корректирующие действия в необходимых случаях также предпринимаются только после того, как процесс сборки уже завершён.

Метод индивидуального подбора может быть использован для сборки высокоточных изделий в ситуации, когда необходимое качество изготовления деталей существенно превышает возможности имеющихся методов изготовления деталей [1]. Основная идея метода подбора заключается в предварительном подборе деталей до сборки таким образом, чтобы они в максимально возможной степени компенсировали погрешности изготовления друг друга. При этом управляемость процесса обеспечивается введением дополнительной операции, выполняемой на компьютере, позволяющей комплектовать детали перед сборкой. В результате, слесарь–сборщик получает комплект деталей и сборочных единиц, а также указания, в каком относительном расположении необходимо соединить их в данном изделии.

Для практического применения метода подбора необходима разработка теоретического метода расчетного определения достигаемой при его использовании точности. Сложность задачи состоит в том, что достигаемые параметры точности носят вероятностный характер. Поэтому для решения этой задачи использовано математическое моделирование процесса образования погрешности при соединении двух деталей.

В качестве объекта для анализа рассмотрено простейшее изделие, состоящее из двух деталей с размерами  $A_1$  и  $A_2$ , являющимися составляющими звеньями возникающей при сборке размерной цепи, уравнение которой  $A_{\Delta} = |A_1 - A_2|$ . Схема размерной цепи представлена на рисунке 1. Для упрощения обработки и интерпретации получаемых результатов принято, что  $A_{1ном} = A_{2ном}$ , то есть номинальное целевое значение величины замыкающего звена равно нулю.

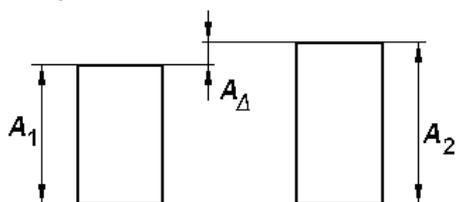


Рисунок 1 – Схема размерной цепи

Принцип алгоритма подбора заключается в следующем [1]: величины действительных размеров собираемых деталей  $A_{1i}$  и  $A_{2j}$ , находящихся в данный момент на сборочном складе, упорядочиваются и для каждой детали  $A_{1i}$  (в порядке возрастания размеров), начиная с первой ( $i=1...l$ ), производится подбор сопрягаемых деталей  $A_{2j}$  ( $j=1...m$ ) и определяется величина замыкающего звена. Вариант, при котором величина образовавшегося замыкающего звена имеет минимальное отклонение от целевого значения, считается наилучшим, запоминается, а соответствующие ему  $A_{1i}$  и  $A_{2j}$  удаляются из базы данных. Затем процесс повторяется для следующей детали  $A_{12}$  и т. д.

Из теории управления качеством [5] известно, что при использовании статистического управления технологическими процессами изготовления деталей, то есть так называемых «налаженных» процессов, распределение действительных размеров изготавливаемых деталей соответствует нормальному закону. Описанный выше процесс подбора математически можно интерпретировать следующим образом [3,4]:

- имеются  $N_1$  деталей  $A_1$  и  $N_2$  деталей  $A_2$ , размеры которых являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону на интервалах  $(A_{1min}, A_{1max})$  и  $(A_{2min}, A_{2max})$  соответственно, где  $A_{min}$  и  $A_{max}$  минимально и максимально допустимые размеры деталей, то есть все детали годные (рисунок 2);
- необходимо найти функцию зависимости максимального значения отклонения образовавшегося замыкающего звена  $A_{\Delta k}$  от целевого значения  $A_{\Delta c}$ .

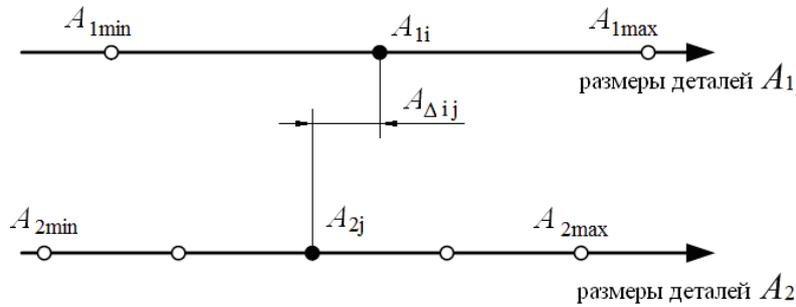


Рисунок 2 – Схема формирования замыкающего звена

Пусть текущие значения размеров собираемой пары деталей  $A_{1i} = x_1, A_{2j} = x_2$ . Тогда текущее значение размера замыкающего звена (рисунок 3):

$$A_{\Delta ij} = |A_{1i} - A_{2j}| = |x_1 - x_2| \quad (1)$$

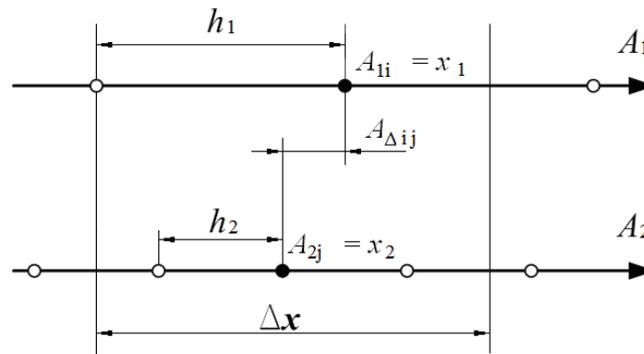


Рисунок 3 – Текущее значение размера замыкающего звена

В наилучшем случае, когда  $x_1 = x_2$ , величина  $A_{\Delta} = 0$ . При самом плохом варианте такого подбора  $x_2$  находится на максимальном расстоянии от  $x_1$ .

В качестве иллюстрации зависимости максимальной величины замыкающего звена  $A_{\Delta max}$  от величин размеров деталей, предлагается следующая модель.

Имеется выборка состоящая из  $N$  деталей, размер которых – случайная величина, распределенная по нормальному закону со средним выборочным  $\mu$  и выборочным средним квадратическим отклонением  $\sigma$ . Наиболее вероятное количество деталей  $n$  на произвольном интервале  $(x, x + \Delta x)$ , с точностью до бесконечно малых высшего порядка относительно  $\Delta x$ , можно вычислить по формуле [2]:

$$n = N \cdot p(x, x + \Delta x) = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot \Delta x \quad (2)$$

Среднее расстояние  $h$  между размерами соседних деталей, определим следующим образом:

$$h = \frac{\Delta x}{n} \quad (3)$$

Определим максимальную величину замыкающего звена для двух заданных выборок собираемых деталей объемом  $N_1, N_2$  с известными средними выборочными  $\mu_1, \mu_2$  и выборочными отклонениями  $\sigma_1, \sigma_2$  на интервале  $(x, x + \Delta x)$ .

$$A_{\Delta \max} = |x_1 - x_2|_{\max} = \frac{1}{2} \min |h_1, h_2| = \frac{1}{2} \min \left| \frac{\Delta x}{n_1}, \frac{\Delta x}{n_2} \right| \quad (4)$$

Функциональная зависимость величины  $A_{\Delta \max}(x)$ , с помощью формул (2) и (4) примет вид:

$$A_{\Delta \max}(x) = \frac{1}{2} \min \left| \frac{\sigma_1 \sqrt{2\pi}}{N_1} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}, \frac{\sigma_2 \sqrt{2\pi}}{N_2} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \right| \quad (5)$$

График функции для  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$  и  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$  на интервале  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ , где  $\mu$  – номинальный размер детали, а  $\sigma$  – стандартное отклонение, приведен на рисунке 4.

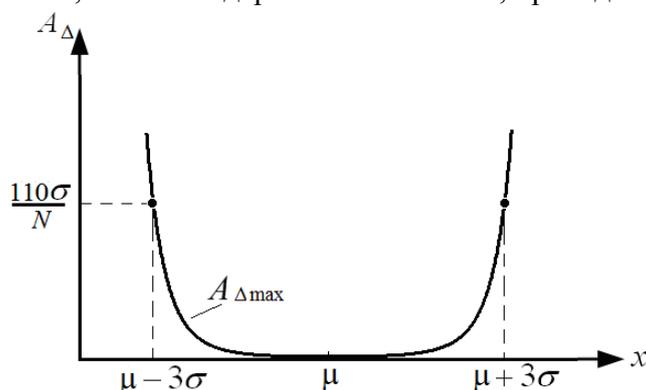


Рисунок 4 – Зависимость максимальной величины замыкающего звена от величин размеров деталей

График показывает, что для деталей со средними значениями размеров вероятная величина образующегося при сборке замыкающего звена наиболее близка к целевому значению, то есть достигается максимальное качество. Для деталей с крайними значениями размеров эта погрешность будет гораздо больше, поскольку, из-за «редкости» деталей расстояние  $A_{\Delta ij}$  увеличивается.

Формула (5) позволяет прогнозировать предполагаемый результат сборки для случая, если величины действительных размеров собираемых деталей заданы нормальным вероятностным законом. При этом необходимо выполнение первоначальных условий, а именно,  $N_1, N_2 \geq 100$ .

В реальности количество имеющихся на сборке деталей может быть меньше 100. В этом случае возможна ситуация, когда количество деталей, размеры которых находятся на каком-либо интервале, может существенно отличаться от теоретического. Это приведет к тому, что максимальная погрешность будет выше теоретической. В таком случае можно говорить о том, что с определенной вероятностью будет существовать другая, более высокая граница отклонения замыкающего звена от целевого значения.

Аналогичные зависимости установлены и для других законов распределения. Предложена универсальная формула определения отклонения замыкающего звена при сборке методом подбора; в обобщенном виде эта зависимость может быть представлена таким образом:

$$A_{\Delta \max}(x) = \frac{1}{2} \min \left| \frac{1}{N_1 \cdot f_1(x)}, \frac{1}{N_2 \cdot f_2(x)} \right|, \quad (6)$$

где  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  плотности распределения вероятностей случайных величин, характеризующих величины размеров деталей – составляющих звеньев сборочной размерной цепи.

Таким образом, полученные функциональные модели позволяют без проведения эксперимента определять наиболее вероятные показатели качества при сборке с использованием метода подбора.

Для обеспечения стабильности результатов процесса сборки необходимо контролировать неизменность законов и параметров распределения действительных размеров состав-

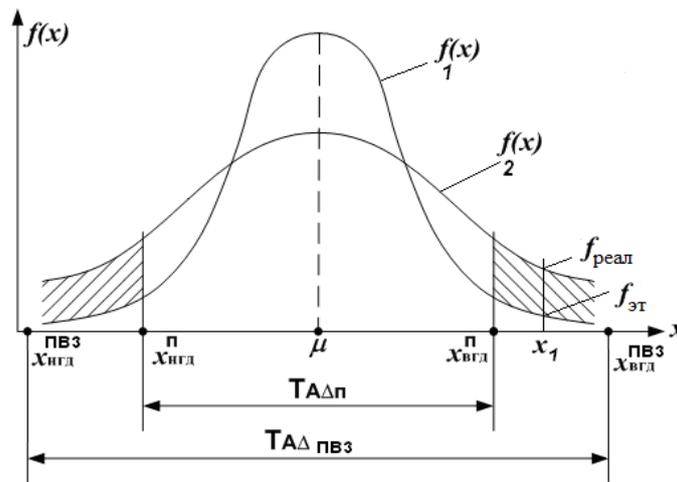
ляющих звеньев. Было проведено исследование, в результате которого определено, что существенное влияние на результат сборки оказывает рассогласование средних значений и средних квадратических отклонений размеров в партиях собираемых деталей. Поэтому, для управления процессом изготовления деталей предложен критерий несоответствия, позволяющий определять существенность возникающих отклонений среднего значения и среднего квадратического отклонения, а также необходимость использования каких-либо мер для компенсации этих отклонений.

Критерий несоответствия  $Q_{\Pi}$  может быть определен как величина, численно равная площади криволинейной трапеции, заключенной между эталонной и реальной кривыми распределения результатов сборки. Критерий несоответствия характеризует изменение (ухудшение) распределения размера замыкающего звена по сравнению с ожидаемым (принятым за эталон) – т.е. увеличение вероятности появления изделий, размер замыкающего звена которых выходит за границы принятого допуска на него  $T_{\Delta\Pi}$ .

$$Q_{\Pi} = \int_{-\infty}^{x_{н\Delta\Pi}} (f_2(x) - f_1(x)) dx + \int_{x_{в\Delta\Pi}}^{+\infty} (f_2(x) - f_1(x)) dx \quad (7)$$

На рисунке 5 графики функций  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  характеризуют соответственно ожидаемую и реальную кривые распределения, характеризующие процесс сборки и подчиняющиеся нормальному закону:

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_1^2}} \text{ и } f_2(x) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (8)$$



**Рисунок 5 – Геометрический смысл критерия несоответствия:**

$T_{\Delta\Pi}$  – допуск на замыкающее звено для метода подбора;  $T_{\Delta\Pi\text{вз}}$  – допуск на замыкающее звено для метода полной взаимозаменяемости;  $x_{н\Delta\Pi}$  и  $x_{в\Delta\Pi}$  – нижняя и верхняя границы допуска на замыкающее звено для метода подбора;  $x_{н\Delta\Pi\text{вз}}$  и  $x_{в\Delta\Pi\text{вз}}$  – нижняя и верхняя границы допуска на замыкающее звено для метода полной взаимозаменяемости;  $x$  – независимая переменная – случайная величина, характеризующая размеры замыкающего звена, полученные в результате сборки;  $f(x)$  – функция, описывающая плотность распределения вероятностей случайной величины  $x$ ;  $f_{\text{эт}}$  и  $f_{\text{реал}}$  – ожидаемая (принятая за эталон) и реальная плотности вероятностей получения изделия с величиной замыкающего звена  $x_1$ .

Для управления процессом формирования качества при подборе деталей необходимо назначить требования к допустимым значениям критерия несоответствия  $Q_{\Pi}$ . Очевидно, что допуск должен быть односторонним, т.е. он должен ограничивать максимальное допустимое значение рассогласования, поскольку, чем меньше величина  $Q_{\Pi}$ , тем ближе реальное распределение размеров в партии деталей к эталонному. В идеале, при  $Q_{\Pi} = 0$  эти распределения совпадают.

Определение «шумов» процесса позволяет оценивать качество используемого алгоритма подбора, анализировать возможные последствия воздействия шума на процесс. Для процесса сборки по методу индивидуального подбора деталей такими последствиями могут быть:

- неполная собираемость деталей при заданных требованиях к качеству (часть годных деталей на сборке не имеет пары);
- несоответствующее качество при заданной собираемости (увеличенное поле рассеяния замыкающего звена при сборке всех имеющихся деталей).

Для коррекции этих несоответствий могут быть использованы известные методы.

Предложенные математические разработки позволяют при осуществлении сборки обеспечивать устойчивость запланированных результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майорова, Е.А. Исследование возможностей повышения качества сборки путем использования индивидуального подбора деталей / Е.А. Майорова, В.В. Непомилуев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2006. – № 10. – С. 34–38.
2. Кобзарь А.И., Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
3. Непомилуев, В.В. Вероятностно–статистическая модель процесса индивидуального подбора деталей / В.В. Непомилуев, Е.В. Олейникова, Н.И. Гусарова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015 – № 1. – С. 8–13.
4. Олейникова, Е.В. Разработка функциональной модели образования погрешности при использовании метода подбора / Е.В. Олейникова // Известия Юго–Западного Государственного Университета. Серия Техника и технологии. – № 4. – С. 28–32.
5. Taguchi, Genichi Taguchis Quality Engineering Handbook / Genichi Taguchi. – John Wiley & Sons, Inc. ASI Consulting Group, LLC, Livonia, Michigan. – 2005. – 1804 p.

#### **Олейникова Елена Валентиновна**

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»  
Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»  
152934, г. Рыбинск Ярославской области, ул. Пушкина, д.53, РГАТУ имени П.А. Соловьева,  
Тел. 8–910–975–02–84.  
E–mail: leona73@yandex.ru

---

Ye.V. OLENIKOVA

### **ANALYTICAL MODEL OF PROCESS SELECTION OF INDIVIDUAL ITEMS IN THE ASSEMBLY**

*The article examines the possibility of improving the quality of the assembly in the machine building by using computer technology and probabilistic–statistical models.*

**Keywords:** *probabilistic–statistical models, assembly, process, quality, size, technology.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Mayorova, Ye.A. Issledovaniye vozmozhnostey povysheniya kachestva sborki putem ispolzovaniya individualnogo podbora detaley / Ye.A. Mayorova, V.V. Nepomiluyev // Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii. – 2006. – № 10. – S. 34–38.
2. Kobzar A.I., Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov / A.I. Kobzar. – M.: FIZMATLIT, 2006. – 816 s.
3. Nepomiluyev, V.V. Veroyatnostno–statisticheskaya model protsesssa individualnogo podbora detaley / V.V. Nepomiluyev, Ye.V. Oleynikova, N.I. Gusarova // Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii. – 2015 – № 1. – S. 8–13.
4. Oleynikova, Ye.V. Razrabotka funktsionalnoy modeli obrazovaniya pogreshnosti pri ispolzovanii metoda podbora / Ye.V. Oleynikova // Izvestiya Yugo–Zapadnogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii. – № 4. – S. 28–32.
5. Taguchi, Genichi Taguchis Quality Engineering Handbook / Genichi Taguchi. – John Wiley & Sons, Inc. ASI Consulting Group, LLC, Livonia, Michigan. – 2005. – 1804 p.

#### **Oleynikova Elena Valentinovna**

Federal State–Financed Educational Institution of High Professional Education «P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University»  
senior lecturer of the Department «Higher mathematics»  
E–mail: leona73@yandex.ru

Д.В. ШУТИН

## ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АКТИВНОГО РАДИАЛЬНОГО ГИДРОСТАТОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА

В статье рассмотрен процесс верификации разработанной математической модели активного радиального гидростатодинамического подшипника. Известна также математическая модель гидродинамического подшипника, полученная посредством аналитического интегрирования уравнения Рейнольдса для двухмерного случая течения смазочного материала. В процессе верификации сравнивались значения несущей способности подшипника, рассчитанные с помощью данных моделей. Кроме того, был определен оптимальный размер конечно-разностной сетки, применяемой в численной модели. Анализ полученных данных показал хорошее согласование результатов, расхождение не превышало 15% для диапазона эксцентриситетов от 0 до 0.63. Сделан вывод об адекватности разработанной математической модели с учетом выявленных границ применимости.

**Ключевые слова:** активный подшипник, математическая модель, метод конечных разностей, верификация, несущая способность, управление движением ротора.

Моделирование процессов, происходящих в роторных системах с подшипниками жидкостного трения, является важнейшим этапом их исследования и проектирования, поскольку позволяет исследовать особенности функционирования инженерных решений в широком диапазоне условий и с минимальными затратами. Важнейшим этапом разработки математической модели объекта является ее верификация, которая заключается в сравнении получаемых с ее помощью результатов с известными результатами, степень достоверности которых заведомо удовлетворяет предъявляемым к разрабатываемой модели требованиям. При этом процессы в роторно-опорных системах обычно описываются сложными зависимостями, кроме того, программные реализации таких моделей в большинстве случаев основываются на численных методах, что вносит дополнительные погрешности. В связи с этим верификация разрабатываемых математических моделей элементов роторно-опорных систем имеет особое значение, поскольку позволяет обоснованно доказать адекватность полученных решений, определить границы их применимости и обеспечить в пределах данных границ точность, достаточную для достижения целей моделирования.

Активные гидростатодинамические опоры роторов, назначение и принцип функционирования которых описаны в [1]–[3], представляют собой подшипники жидкостного трения, в которых несущая способность создается за счет сочетания гидростатического и гидродинамического эффектов. Возможность управления параметрами гидростатической составляющей позволяют осуществлять целенаправленное воздействие на ротор за счет варьирования реакции смазочного слоя и таким образом управлять движением ротора. Ввиду малой изученности используемого принципа функционирования, что отмечено в [4], актуальной задачей является исследование зависимостей, составляющих процесс управления движением ротора в рассматриваемых опорах. Важным этапом такого исследования является разработка математической модели активного гидростатодинамического подшипника и ее верификация. Общая структура математической модели роторно-опорной системы с таким подшипником представлена на рисунке 1.

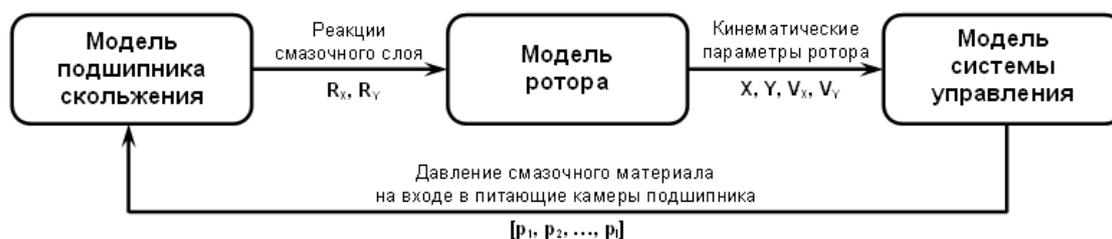


Рисунок 1 – Структура математической модели роторно-опорной системы с активным гидростатодинамическим подшипником

Модель системы управления представляет собой, по сути, математическую запись законов управления движением ротора. Современные цифровые системы управления, по сути, представляют собой регуляторы, алгоритмы функционирования в которых содержатся в виде программного кода, что обеспечивает их практически полное соответствие математическим моделям. Погрешности, вносимые процессами конвертации сигналов в измерительных трактах, можно считать незначительными и не принимать во внимание.

В качестве математической модели ротора, в соответствии с обозначенными ранее целями исследования, используется одномассовая модель жесткого ротора, чтобы исключить влияние его геометрических параметров на процесс управления. Кроме того, активные гидростатодинамические опоры в настоящий момент имеют существенные ограничения по быстродействию [2] и с высокой степенью вероятности системы с такими опорами будут проектироваться для работы в зоне докритических частот. Целесообразность использования модели жесткого ротора в таких условиях обоснована, например, в [5], потому модель ротора в настоящем исследовании также не требует отдельной верификации.

Математическая модель гидростатодинамического подшипника в составе активной опоры является, по сути, математической моделью смазочного слоя, который создает несущую способность подшипника. Такая модель строится с целью определения полей давления и сил, действующих на ротор, которые в активной опоре являются одновременно управляющими воздействиями. Модель смазочного слоя строится на основе закономерностей гидродинамической теории смазки с учетом ряда допущений. В связи с этим, верификация математической модели активного радиального гидростатодинамического подшипника сводится, по сути, к верификации модели смазочного слоя и ее программной реализации.

Таким образом, целью настоящей работы является верификация разработанной математической модели смазочного слоя гидростатодинамического подшипника, являющейся неотъемлемой частью модели активной опоры соответствующего типа, а также и обоснование отдельных параметров процесса моделирования.

Ввиду обозначенной общей цели проводимого исследования активных гидростатодинамических опор обоснованным является принятие ряда допущений и включение в математическую модель смазочного слоя только тех компонентов, которые непосредственно участвуют в процессе управления движением ротора. Ряд других факторов, таких как, например, температура смазочного материала, перекос ротора в опоре и т.д., также влияют на происходящие в системе процессы, однако такое влияние не вносит принципиальных корректив в исследуемые зависимости и потому дает основания для их исключения из расчета. Обозначим систему допущений, принятых в исследуемой модели. К общим допущениям гидродинамической теории смазки относятся [6]:

- 1) рассматривается только жидкостный характер трения в подшипнике;
- 2) движение смазочного материала является ламинарным;
- 3) смазочный материал является несжимаемым (вода, масло);
- 4) смазка плотно прилипает к поверхностям трущихся тел.

Кроме того, с учетом особенностей решаемой задачи была принята система дополнительных допущений:

1) для установления базовых зависимостей процесса управления движением ротора в активной гидростатодинамической опоре достаточным является рассмотрение установившегося режима работы роторной системы с постоянной частотой вращения ротора  $\omega = const$  и, соответственно, постоянной окружной скоростью движения ротора  $U = const$ ;

2) установившийся режим работы роторной системы характеризуется установившимся тепловым балансом, поэтому решение задачи расчета сил в подшипнике возможно в изотермической постановке. В качестве смазочного материала рассматриваются ньютоновские жидкости (чистая вода или масло), которые при постоянной температуре имеют постоянную вязкость, то есть  $\mu = const$ ;

3) так как скорость  $W$  течения смазочной жидкости по направлению к торцам подшипника значительно меньше скорости в направлении вращения, то в первом приближении можно принять  $W = 0$ , переходя при этом к плоскому потоку;

4) перемещение ротора вдоль продольной оси отсутствует, он совершает в подшипнике только радиальные перемещения.

Схема, отражающая геометрические параметры моделируемого подшипника, приведена на рисунке 2.

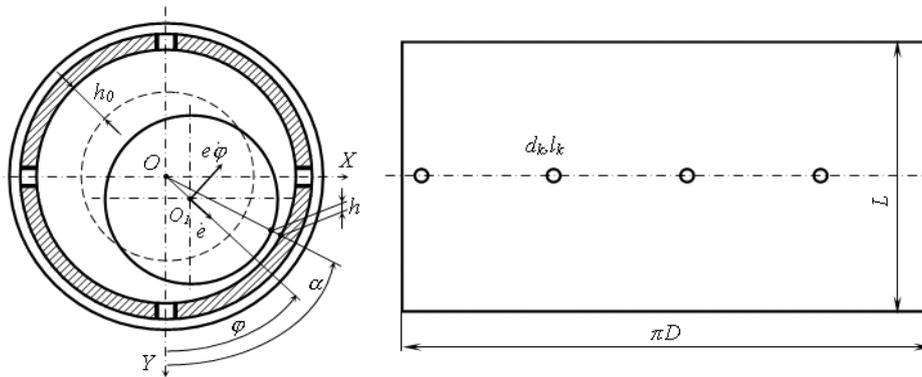


Рисунок 2 – Геометрические параметры гидростатодинамического подшипника

Моделирование смазочного слоя подшипников жидкостного трения проводится на основе математического аппарата гидродинамической теории смазки. Базовым уравнением при этом является уравнение Навье–Стокса и выводимое из него обобщенное уравнение Рейнольдса [7]. С учетом принятых допущений последнее принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 12\mu V + 6\mu U \cdot \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $p$  – функция, описывающая поле давления смазочного слоя;

$L$  – длина подшипника, м;

$D$  – диаметр подшипника, м;

$\alpha$  – текущий угол развертки опорной поверхности подшипника, рад;

$h$  – функция, описывающая величину радиального зазора между ротором и опорной поверхностью подшипника.

При отсутствии перекоса, то есть при параллельности оси ротора и продольной оси втулки подшипника, данная функция имеет следующий вид [7]:

$$h(\alpha) = h_0 - X \cdot \sin \alpha - Y \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $h_0$  – радиальный зазор между ротором и поверхностью подшипника при совпадении центра цапфы ротора с продольной осью втулки подшипника (рисунок 2);

$X, Y$  – координаты положения центра цапфы ротора в системе координат  $XOY$ .

Таким образом, задача расчета поля давлений смазочного слоя является краевой задачей решения уравнений (1) и (2) с граничными условиями, к числу которых относятся гипотеза Зоммерфельда о неразрывности смазочного слоя [8], известное давление на торцах подшипника конечной длины и известное давление смазочного материала в местах расположения питающих камер. Последний параметр является ключевым для моделирования активных гидростатодинамических опор, поскольку именно регулируемое изменение давления в питающих камерах создает обеспечивает управление движением ротора. Вместе с тем, с целью учета дросселирующего эффекта совместно с уравнениями (1)–(2) решается уравнение баланса расходов [7]:

$$Q_H = Q_x + Q_y + Q_z, \quad (3)$$

где  $Q_H$  – суммарный массовый расход смазочного материала через дросселирующее устройство,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_x, Q_y, Q_z$  – массовые расходы смазочного материала через дросселирующее устройство в отдельных направлениях,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Аналитическое решение системы уравнений (1)–(3) ввиду нелинейности уравнения (1), является сложной задачей, поэтому для ее решения целесообразно использовать числен-

ные методы. В рассматриваемой математической модели применялся хорошо зарекомендовавший себя и легко поддающийся алгоритмизации метод конечных разностей. Данный метод основан на разбиении интегрируемой области (опорной поверхности подшипника) на множество элементов посредством наложения ортогональной сетки и заменой согласно полученному разбиению аналитических зависимостей на конечно-разностные зависимости. Подробно применение метода конечных разностей для расчета полей давлений подшипников жидкостного трения описан в [7]. Необходимо отметить, что размерность накладываемой сетки является параметром моделирования, существенно влияющим на результат, и является предметом настоящего исследования.

Точность вычислений с использованием численных методов существенно зависит от их параметров. Для использованного метода конечных элементов это, в первую очередь, размерность сетки. Ее увеличение позволяет повысить точность получаемого результата, однако в то же время потребное машинное время для проведения соответствующих вычислений возрастает в геометрической прогрессии [9]. Специфика решаемой задачи по исследованию управления движением ротора в активном гидростатодинамическом подшипнике требует проведения значительного количества вычислений, поэтому актуальным является выбор оптимальной размерности сетки, которая обеспечит достаточную точность вычислений при минимизации потребного машинного времени.

С целью решения указанной задачи была определена зависимость величины несущей способности подшипника, рассчитанной с использованием численной модели, от размерности сетки. При этом моделировался подшипник со следующими параметрами: тип подшипника – гидродинамический, длина подшипника 51 мм, диаметр 40 мм; радиальный зазор 100 мкм; смазочный материал – вода; частота вращения ротора – 5000 об/мин. Вычислялась несущая способность подшипника при наложении квадратной сетки размерности от 25 до 85 элементов с шагом 4 элемента. Всего проводилось 3 таких расчета для величин относительного эксцентриситета положения ротора 0,1, 0,3 и 0,5. Результаты вычислений приведены на рисунке 3. Для каждого из расчетов оценивалась динамика изменения величины несущей способности, полученных при численном расчете. В качестве критерия оптимальности была установлена величина изменения вычисленного значения для всех вариантов сетки с размерностью больше текущей в пределах одного расчета.

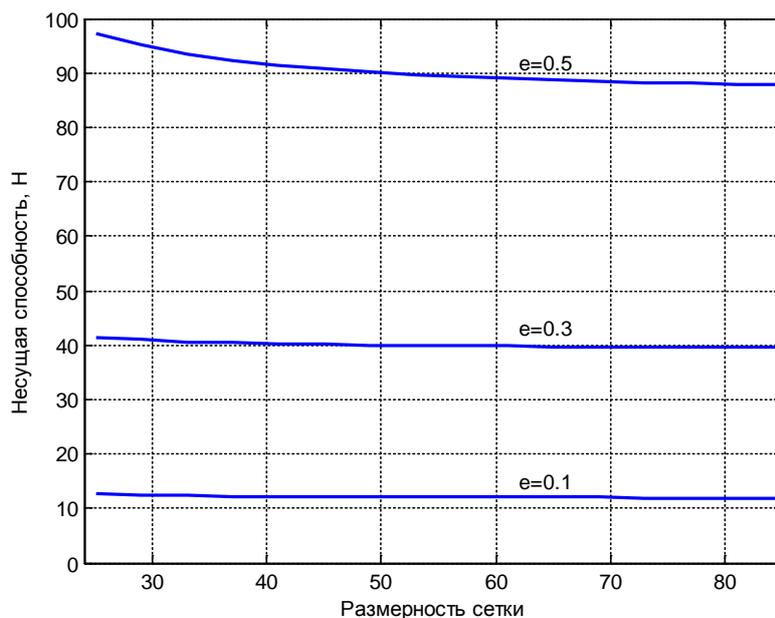


Рисунок 3 – Зависимость несущей способности от размерности сетки и эксцентриситета

В каждом расчете с увеличением размерности сетки наблюдалось асимптотическое приближение графиков к определенным значениям. Во всех случаях, начиная с размерности

сетки 50 и выше, дальнейшее увеличение этого параметра приводило к изменению величины несущей способности не более, чем на 3%, а начиная с размерности 40 – не более, чем на 5%. Такие значения вариативности результатов можно считать незначительными, что дает основание использовать в процессе моделирования роторно–опорной системы в рассмотренном диапазоне эксцентриситетов сетку размерностью от 40 элементов и выше без внесения в результаты существенной погрешности за счет использования численных методов решения уравнений. Таким образом, все дальнейшие вычисления проводились с использованием конечно–разностной сетки размером 45x45 элементов.

В то время как аналитическое решение обобщенного уравнения Рейнольдса в полной форме является сложной и не решенной на настоящий момент времени задачей, сокращение постановки задачи до двухмерного случая, то есть рассмотрение только распределения давления в плоскости, перпендикулярной оси подшипника, позволяет получить аналитические зависимости для определения сил реакций смазочного слоя. В работе [10] приводится аналитическое решение задачи расчета сил в гидродинамическом подшипнике.

Система принятых в [10] допущений совпадает с таковой в настоящей работе, и с учетом постановки задачи уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right] = 12\mu V + 6\mu U \cdot \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (4)$$

Интегрируя (4) сначала по оси координат  $OZ$ , совпадающей с осью подшипника, а затем по опорной поверхности, получаем выражения для сил реакций по осям  $OX$  и  $OY$ :

$$R_x = -0.5\mu\pi DL^3 \left[ \frac{\omega \cdot Y + 2V_x}{2(h_0^2 - X^2 - Y^2)^{3/2}} + \frac{3X \cdot (X \cdot V_x + Y \cdot V_y)}{(h_0^2 - X^2 - Y^2)^{5/2}} \right],$$

$$R_y = -0.5\mu\pi DL^3 \left[ \frac{2V_y - \omega \cdot X}{2(h_0^2 - X^2 - Y^2)^{3/2}} + \frac{3Y \cdot (X \cdot V_x + Y \cdot V_y)}{(h_0^2 - X^2 - Y^2)^{5/2}} \right]. \quad (5)$$

где  $\omega$  – частота вращения ротора, рад/с;

$V_x$  и  $V_y$  – проекции радиальной скорости движения ротора на оси  $OX$  и  $OY$ , м/с.

Описанное в [10] решение задачи расчета сил получено для участка длиной  $L$  гидродинамического подшипника бесконечной длины, в то время как разработанная математическая модель описывает гидростатодинамический подшипник конечной длины. Чтобы иметь возможность сопоставлять аналитически описанную модель с разработанной, последнюю необходимо модифицировать для получения аналогичной постановки задачи. Для этого исключим из числа граничных условий известные значения давлений в областях, соответствующих расположению питающих камер, а также известные значения давления на торцах подшипника, продолжая при этом проводить численное интегрирование для зоны, ограниченной длиной подшипника  $L$ . Таким образом, получим модель конечного участка гидродинамического подшипника бесконечной длины, которая полностью соответствует рассмотренной в [10]. Это дает возможность производить сравнение результатов, полученных с использованием указанных математических моделей.

Известные аналитические решения упрощенных модификаций уравнения Рейнольдса для различных модификаций подшипников скольжения широко используются в практике инженерных расчетов на протяжении многих лет [6, 11, 12]. В связи с этим описанная аналитическая модель гидродинамического подшипника была использована в качестве базового объекта, верификация разработанной математической модели может быть признана успешной в той мере, в которой наблюдается согласование результатов вычислений с использованием верифицируемой и базовой моделей. Таким образом, верификация разработанной математической модели заключалась в сопоставлении значений параметров работы роторной системы, рассчитанных при помощи верифицируемой модели, с параметрами, рассчитанными посредством рассмотренных аналитических зависимостей. В качестве оцениваемого параметра была выбрана несущая способность подшипника скольжения, поскольку именно силовые факторы среди параметров смазочного слоя имеют первостепенное значение для моделирования роторных систем с активными гидростатодинамическими опорами.

В ходе исследования проводилось моделирование роторной системы с теми же основными параметрами, что и при определении оптимальной размерности сетки метода конечных разностей. Моделировалось два состояния системы – статичное, когда кинематика ротора описывается только его текущими координатами, при том что мгновенное значение его скорости в радиальном направлении равно нулю, и квазистатичное, характеризуемое ненулевым значением радиальной скорости.

Для статичного состояния системы расчеты проводились для различных частот вращения ротора – 0 (вращение отсутствует), 3000, 5000 и 10000 об/мин. Для каждой частоты вращения вычислялась несущая способность при значениях относительного эксцентриситета от 0 до 0,9 с шагом 0,05. Величину эксцентриситета составляло соответствующее смещение ротора в положительном направлении оси OY. Полученные зависимости величины несущей способности от указанных параметров приведены на рисунке 4.

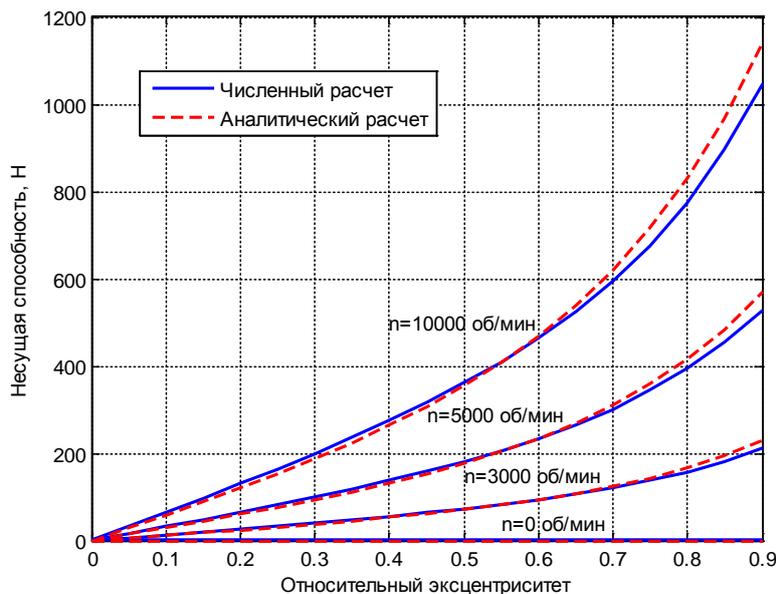


Рисунок 4 – Зависимость несущей способности подшипника от частоты вращения ротора и эксцентриситета

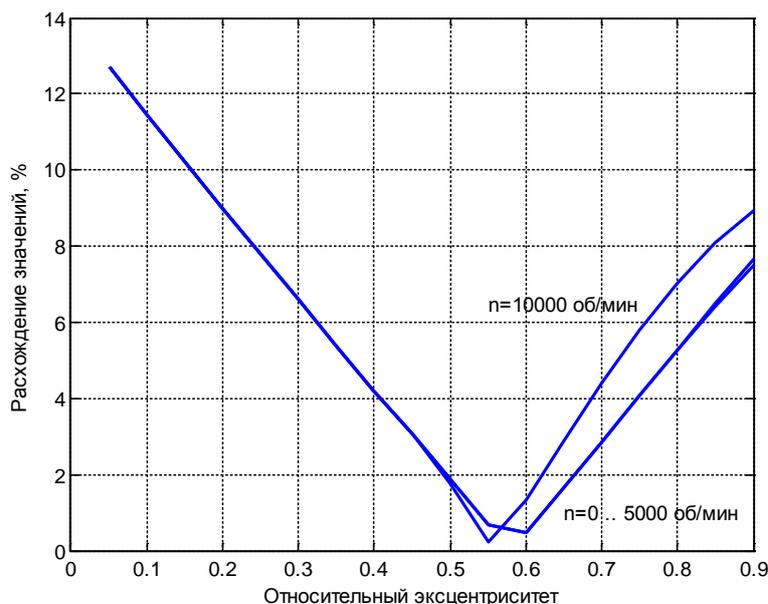


Рисунок 5 – Степень расхождения результатов вычислений для статического состояния

Для наглядного представления и оценки результатов вычислений на рисунке 5 приведены графики, отражающие разницу  $\varepsilon$  между значениями несущей способности, вычислен-

ными с использованием численной и аналитической моделей, определяющуюся следующим соотношением:

$$\varepsilon_i = \frac{2 \cdot |R_i^q - R_i^A|}{|R_i^q| + |R_i^A|} \cdot 100\%,$$

где  $R^q$  и  $R^A$  – несущие способности подшипника, определенные с использованием, соответственно, численной и аналитической модели.

Результат вычислений для статичного состояния системы показывает, что во всем диапазоне изменяемых параметров наблюдается хорошее согласование результатов вычислений с использованием рассматриваемых моделей. С увеличением частоты вращения ротора имеется тенденция к незначительному повышению степени расхождения результатов, при этом во всем исследуемом диапазоне она не превышает 13%.

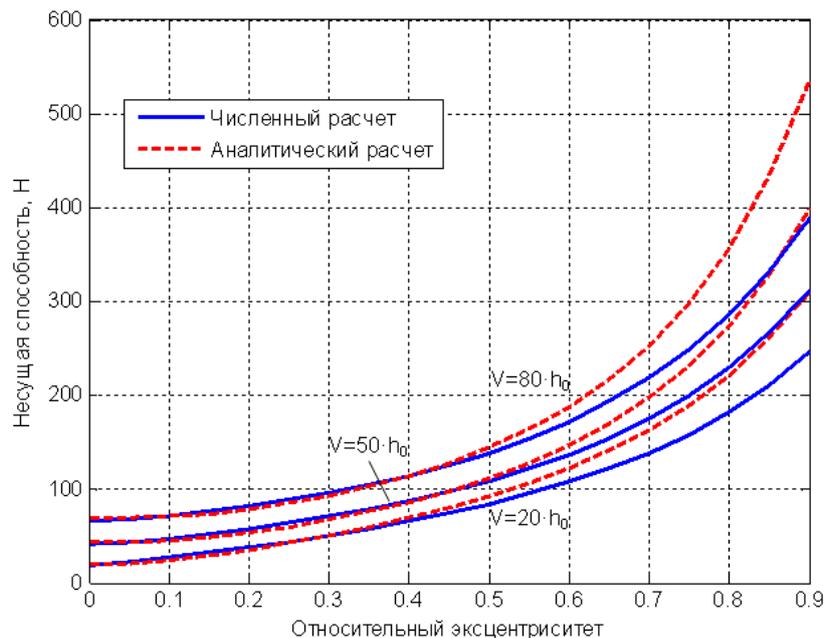


Рисунок 6 – Зависимость несущей способности подшипника от радиальной скорости и эксцентриситета

При исследовании квазистатичного состояния роторно–опорной системы частота вращения ротора была принята 5000 об/мин. Варьируемыми параметрами являлись мгновенная радиальная скорость ротора  $V$  и относительный эксцентриситет. Значения радиальной скорости движения ротора выбирались исходя из типичных ее значений для ротора, совершающего синхронную прецессию с известной амплитудой при принятой частоте вращения. Были отобраны амплитуды колебаний ротора 15%, 30% и 50% от величины радиального зазора, что численно приблизительно соответствует скоростям  $20 \cdot h_0$ ,  $50 \cdot h_0$  и  $80 \cdot h_0$ , или, соответственно,  $1,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $3,7 \cdot 10^{-3}$  и  $6,2 \cdot 10^{-3}$  м/с. Вектор скорости был направлен в положительном направлении оси ОУ. Диапазон, шаг и способ варьирования эксцентриситета, а также прочие параметры системы оставались теми же, что и для статичного состояния. Полученные зависимости величины несущей способности от указанных параметров приведены на рисунке 6. Степень расхождения результатов определялась так же, как и для статичного состояния, ее графическое отображение приведено на рисунке 7.

Для квазистатичного состояния для всех радиальных скоростей движения ротора наблюдается вариабельность степени расхождения результатов вычислений и общая тенденция к ее повышению с увеличением эксцентриситета. При этом в диапазоне низких и средних значений эксцентриситета 0...0,63 расхождение значений не превышает 15%.

В ходе исследования была определена минимально необходимая потребность размерности конечно–элементной сетки, используемой для проведения вычислений с использованием разработанной модели с тем, чтобы считать погрешности, вносимые применением ме-

тогда конечных разностей вместо аналитического интегрирования уравнений, незначительными и не учитывать их влияние на получаемые результаты. В ходе дальнейших вычислений, составляющих процесс верификации математической модели, использовался размер сетки, выбранный с учетом полученных результатов.

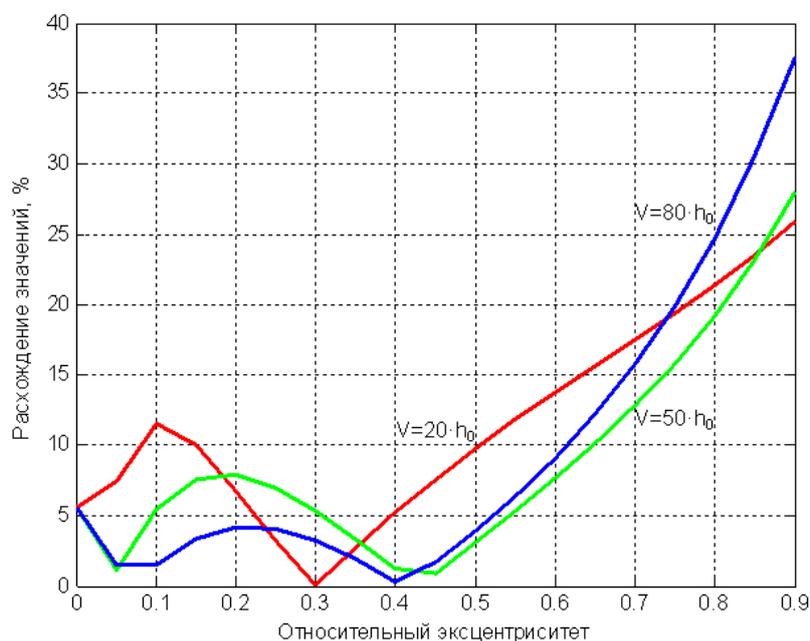


Рисунок 7 – Степень расхождения результатов вычислений для квазистатического состояния

В процессе верификации разработанной математической модели был проведен сравнительный анализ результатов вычислений, полученных с использованием численной и аналитической моделей. Совместное рассмотрение полученных данных как для статичного, так и для квазистатичного состояний роторно–опорной системы показывает в целом хорошее согласование результатов.

Вместе с тем, поскольку исследование роторных систем на активных радиальных гидростатодинамических подшипниках заключается в определении и дальнейшем анализе множества перемещений ротора в опоре, то есть в исследовании динамического состояния системы, при оценке адекватности разработанной модели следует опираться в первую очередь на рассмотренное квазистатическое состояние. Таким образом, верифицируемую математическую модель можно считать адекватной при моделировании движения ротора в активном радиальном гидростатодинамическом подшипнике в диапазоне относительных эксцентриситетов от 0 до 0,63, при этом отклонение результатов от полученных с использованием аналитических зависимостей, характеризующихся высокой степенью достоверности производимых с их использованием расчетов, не превышает 15%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шутин, Д.В. Моделирование активных радиальных гидростатических подшипников / Д.В. Шутин, Л.А. Савин // Известия Юго–Западного государственного университета. Серия «Техника и технология». – 2012. – № 1. – С. 54–60.
2. Савин, Л.А. Принципы управления мехатронным гидростатическим подшипником. Автоматизированные системы проектирования и научных исследований технических систем. / Л.А. Савин, Д.В. Шутин, Р.Н. Поляков // Материалы II Всероссийской научно–методической конференции «ОПиДМ – XXI век» – Орел: ОрелГТУ. – 2010. – С. 14–21.
3. Savin, L. Control of Rotor Motion Using Active Fluid–Film Bearings. / L. Savin, D. Shutin // Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics, Mechanisms and Machine Science 21. Springer International Publishing Switzerland. – 2015. – 91 p.
4. Savin, L. A Review on Active Bearings and Perspectives of Using Them in Rotating Machinery / L. Savin, D. Shutin, A. Babin. // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications. – 2014. – Т. 630. – p.p. 181–187.
5. Кельзон, А.С. Расчет и конструирование роторных машин / А.С. Кельзон, Ю.Н. Журавлев, Н.А. Январев. – Л., «Машиностроение», 1977. – 288 с.
6. Жирицкий, Г.С. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин / Г.С. Жирицкий, В.А. Стрункин. – М.: «Машиностроение», 1968. – 520 с.

7. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с подшипниками скольжения: монография. / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение–1, 2006. – 444 с.
8. Дмитриенко, А.И. Опоры роторов турбонасосных агрегатов / А.И. Дмитриенко, В.Н. Доценко, Г.С. Жердев. – Харьков: Харьковский авиационный институт, 1994. – 36 с.
9. Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
10. Chu, F. Periodic, Quasi-Periodic and Chaotic Vibrations of a Rub-Impact Rotor System Supported on Oil Film Bearing / F. Chu, Z. Zhang // International Journal of Engineering Science. – 1997. – Т. 35. – № 10/11. – p.p. 963–973.
11. Коровчинский, М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения / М.В. Коровчинский. – М.: Mashgiz, 1959. – 404 с.
12. Rao, J.S. Rotor Dynamics / J.S. Rao. – New Age International, 1996. – 435 p.

**Шутин Денис Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орел

Инженер-исследователь НОЦ «Мехатроника и международный инжиниринг»

E-mail: rover.ru@gmail.com

D.V. SHUTIN

## VERIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE ACTIVE RADIAL HYBRID BEARING

*The topic of the paper is verification of the mathematical model of an active radial hybrid bearing. There is a known mathematical model of a plain hydrodynamic bearing obtained by analytical integrating of the Reynolds equation for the two-dimensional flow of the lubricant. During the verification process the values of the load capacity obtained with the mentioned models have been compared. Besides that, the minimal needed size of a grid used within the applied finite differences method was determined. The analysis of the obtained data shows good matching of the results with obtained different models. The difference of the results is less than 15% within the eccentricity range of 0...0.65 for all the examined combinations of the rotor-bearing systems parameters. It allows to conclude that the developed mathematical model is adequate within the mentioned applicability limits.*

**Keywords:** active bearing, mathematical model, finite differences method, verification, load capacity, rotor motion control.

## BIBLIOGRAPHY

1. Shutin, D.V. Modelirovaniye aktivnykh radialnykh gidrostaticheskikh podshipnikov / D.V. Shutin, L.A. Savin // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Tekhnika i tekhnologiya». – 2012. – № 1. – S. 54–60.
2. Savin, L.A. Printsipy upravleniya mekhatronnym gidrostaticheskim podshipnikom. Avtomatizirovannyye sistemy proyektirovaniya i nauchnykh issledovaniy tekhnicheskikh sistem. / L.A. Savin, D.V. Shutin, R.N. Polyakov // Materialy II Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «OPiDM – XXI vek» – Orel: OrelGTU. – 2010. – S. 14–21.
3. Savin, L. Control of Rotor Motion Using Active Fluid-Film Bearings. / L. Savin, D. Shutin // Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics, Mechanisms and Machine Science 21. Springer International Publishing Switzerland. – 2015. – 91 p.
4. Savin, L. A Review on Active Bearings and Perspectives of Using Them in Rotating Machinery / L. Savin, D. Shutin, A. Babin. // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications. – 2014. – T. 630. – p.p. 181–187.
5. Kelzon, A.S. Raschet i konstruirovaniye rotornykh mashin / A.S. Kelzon, YU.N. Zhuravlev, N.A. Yanvarev. – L., «Mashinostroyeniye», 1977. – 288 s.
6. Zhiritskiy, G.S. Konstruktsiya i raschet na prochnost detaley parovykh i gazovykh turbin / G.S. Zhiritskiy, V.A. Strunkin. – М.: «Mashinostroyeniye», 1968. – 520 s.
7. Savin, L.A. Modelirovaniye rotornykh sistem s podshipnikami skolzheniya: monografiya. / L.A. Savin, O.V. Solomin. – М.: Mashinostroyeniye–1, 2006. – 444 s.
8. Dmitriyenko, A.I. Opory rotorov turbonasosnykh agregatov / A.I. Dmitriyenko, V.N. Dotsenko, G.S. Zherdev. – Kharkov: Kharkovskiy aviatsionnyy institut, 1994. – 36 s.
9. Samarskiy, A.A. Chislennyye metody / A.A. Samarskiy, A.V. Gulin. – М.: Nauka, 1989. – 432 s.
10. Chu, F. Periodic, Quasi-Periodic and Chaotic Vibrations of a Rub-Impact Rotor System Supported on Oil Film Bearing / F. Chu, Z. Zhang // International Journal of Engineering Science. – 1997. – T.35. – № 10/11. – p.p. 963–973.
11. Korovchinskiy, M.V. Teoreticheskiye osnovy raboty podshipnikov skolzheniya / M.V. Korovchinskiy. – М.: Mashgiz, 1959. – 404 s.
12. Rao, J.S. Rotor Dynamics / J.S. Rao. – New Age International, 1996. – 435 p.

**Shutin Denis Vladimirovich**

State University – ESPC, Oryol

Research Engineer of the SEC «Mechatronics and International Engineering»

E-mail: rover.ru@gmail.com

В.Г. МАЛИНИН, Ю.Ю. МУССАУИ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МУФТ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ МЕТОДАМИ СТРУКТУРНО–АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ

*Методами структурно–аналитической мезомеханики выполнено исследование напряжённно–деформированного состояния толстостенного цилиндра из материала с эффектом памяти формы при его дорновании и иницировании фазовых превращений в условиях термоциклирования через температурные интервалы обратимых мартенситных реакций. Представлены результаты математического моделирования процесса подготовки и сборки термомеханического соединения с помощью цилиндрических муфт из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ).*

**Ключевые слова:** структурно–аналитическая мезомеханика; математическое моделирование; эффект памяти формы; термомеханическое соединение; краевая задача; прямое мартенситное превращение; обратное мартенситное превращение; напряжённно–деформированное состояние.

Термомеханические соединения (ТМС) трубопроводов относятся к числу наиболее распространённых примеров конструкционного применения материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ). Так, например, в 1972–1982 гг. американская фирма «Райхен» поставила для авиации более 300 тыс. ТМС, известных за рубежом под названием «Крайофит» [1]. В настоящее время ТМС успешно используются в подводных и надводных кораблях, космонавтике, трубопроводной арматуре АЭС. Описание разнообразных ТМС имеется в большом количестве патентов и других публикациях [1, 2].

Широкое использование материалов с ЭПФ в качестве ТМС требует развития расчётов в рамках инженерной механики материалов. Важным аспектом при расчёте ТМС является учёт особенностей влияния градиента и вида напряжённного состояния на кинетику развития мартенситных превращений, инициируемых в процессе подготовки и сборки ТМС с использованием муфт из материала с ЭПФ. Однако, в опубликованных работах, посвящённых развитию методов расчёта ТМС [1–4], обозначенные обстоятельства, как правило, не обсуждаются.

В данной статье, на основе методов структурно–аналитической мезомеханики, приводятся результаты аналитического решения краевой задачи механики для термомеханического соединения с применением толстостенной муфты из материала с эффектом памяти формы.

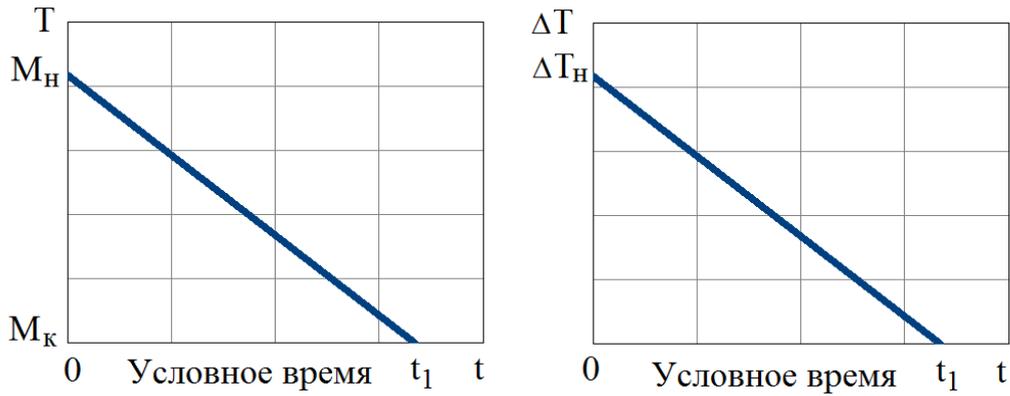
Рассматриваемая задача условно поделена на три части:

1. расчёт напряжённно–деформированного состояния (НДС) на этапе охлаждения муфты в интервале температур прямого мартенситного превращения;
2. расчёт НДС на этапе нагрева цилиндра в интервале температур обратной мартенситной реакции;
3. расчёт НДС на этапе сборки термомеханического соединения.

Первый этап решения включает в себя расчёт напряжённно–деформированного состояния толстостенного цилиндра при охлаждении в интервале температур прямого мартенситного превращения под действием постоянного внутреннего давления и изменяющейся по толщине стенки цилиндра температуры.

При достижении температуры конца мартенситной реакции происходит её выравнивание по толщине и проводится разгрузка цилиндра, рассчитываются остаточные напряжения. Схема изменения (температурного режима) представлена на рисунке 1.

При решении задачи используется гипотеза плоской деформации. Основные уравнения, используемые в расчёте:



**Рисунок 1 – Изменение температуры на этапе охлаждения**  
 слева – изменение температуры на внешнем радиусе;  
 справа – изменение разности температур по толщине стенки цилиндра.

1) физические соотношения [3]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r - \frac{1}{E} \cdot (\sigma_r - \mu \cdot (\sigma_\theta + \sigma_z)) - \alpha \cdot (T - M_K) &= \frac{V_\phi \cdot (M_H - T)}{M_H - M_K} \cdot (\sigma_r - \sigma); \\ \varepsilon_\theta - \frac{1}{E} \cdot (\sigma_\theta - \mu \cdot (\sigma_r + \sigma_z)) - \alpha \cdot (T - M_K) &= \frac{V_\phi \cdot (M_H - T)}{M_H - M_K} \cdot (\sigma_\theta - \sigma); \\ \varepsilon_z - \frac{1}{E} \cdot (\sigma_z - \mu \cdot (\sigma_r + \sigma_\theta)) - \alpha \cdot (T - M_K) &= \frac{V_\phi \cdot (M_H - T)}{M_H - M_K} \cdot (\sigma_z - \sigma), \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$  – деформации соответственно в радиальном, окружном и осевом направлениях;

$E, \mu$  – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала цилиндра;

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения;

$T$  – функция эффективной температуры, характеризующая её изменение по толщине стенки цилиндра;

$V_\phi$  – коэффициент структурно–механической податливости в условиях мартенситных превращений;

$M_H, M_K$  – температуры соответственно начала и конца мартенситной реакции;

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  – напряжения соответственно в радиальном, окружном и осевом направлениях;

$\sigma$  – среднее напряжение.

2) условие пластичности Треска–Сен–Венана:  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T^*$ ,

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – соответственно первое и третье главные напряжения;

$\sigma_T^*$  – эффективный фазовый предел текучести материала;

3) дифференциальные уравнения равновесия и совместности деформаций для осесимметричной задачи:  $r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0$ ;  $r \cdot \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \varepsilon_\theta - \varepsilon_r = 0$ .

При выводе аналитических зависимостей для расчёта НДС принимаются:

1) стационарный закон изменения температуры по толщине стенки цилиндра:

$$T(r) = M_H + (M_H - M_K) \cdot \left[ \left( 1 - \frac{t}{t_1} \right) \cdot \frac{r_2 - r}{r_2 - r_1} - \frac{t}{t_1} \right],$$

где  $t$  – условное время, характеризующее кинетику прямого мартенситного превращения вдоль радиуса цилиндра при охлаждении;

$t_1$  – условное время, соответствующее моменту, когда значение температуры во всех точках цилиндра равно  $M_k$ ;

$r_2, r_1$  – соответственно наружный и внутренний радиусы толстостенного цилиндра;

$r$  – текущий радиус в пределах толщины стенки цилиндра;

2) зависимость, учитывающая влияние температуры и неоднородности напряжённо-деформированного состояния на фазовый предел текучести материала:

$$\sigma_T^* = \sigma_T^0 \cdot \left( \chi - \frac{T}{M_H} \right) \cdot \frac{1}{(1-\beta) \cdot \left( 1 + \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\text{grad}(\gamma_m)}{\gamma_m} \right)},$$

где  $\sigma_T^0$  – начальное значение фазового предела текучести;

$\chi$  – характеристика материала цилиндра;

$\beta$  – параметр, характеризующий влияние неоднородности напряжённо-деформированного состояния толстостенного цилиндра;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий геометрические размеры изделия и отражающий влияние масштабного фактора на свойства материала;

$\gamma_m$  – максимальная угловая деформация.

На основе вышеуказанных соотношений получены аналитические выражения для расчёта НДС цилиндра из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ) в виде:

$$u(x) = \frac{1}{(1-\beta) \cdot \eta} \cdot (K_6 \cdot x + K_7 \cdot x^2 + K_8 \cdot x^3 + K_9 \cdot x \cdot \ln(x)) - \frac{C_1}{\eta} \cdot x \cdot I_2(x) + \frac{x}{\eta} \cdot A - \frac{\psi}{\eta} \cdot \left( (1-2 \cdot \mu) \cdot x + \frac{x_2^2}{x} \right); \quad \varepsilon_r(x) = \frac{1}{1-\beta} \cdot ((K_6 + K_9) + 2 \cdot K_7 \cdot x + 3 \cdot K_8 \cdot x^2 + K_9 \cdot \ln(x)) - C_1 \cdot (I_2(x) + e^{-x}) + A - \psi \cdot \left( 1 - 2 \cdot \mu - \frac{x_2^2}{x^2} \right); \quad \varepsilon_\theta(x) = \frac{1}{1-\beta} \cdot (K_6 + K_7 \cdot x + K_8 \cdot x^2 + K_9 \cdot \ln(x)) - C_1 \cdot I_2(x) + A - \psi \cdot \left( 1 - 2 \cdot \mu + \frac{x_2^2}{x^2} \right);$$

$$\sigma_r(x) = \frac{1}{1-\beta} \cdot (K_{10} + K_{11} \cdot x + K_{13} \cdot \ln(x) + K_{14} \cdot \ln(x + K_{12})) + C_2 \cdot (J_2(x) - J_3(x)) + B + \frac{E \cdot \psi}{1+\mu} \cdot \left( \frac{x_2^2}{x^2} - 1 \right); \quad \sigma_\theta(x) = \frac{1}{1-\beta} \cdot (K_{10} + K_{11} \cdot x + K_{13} \cdot \ln(x) + K_{14} \cdot \ln(x + K_{12})) + \frac{K_{15} + K_{16} \cdot x + K_{11} \cdot x^2}{x + K_{12}} + C_2 \cdot \left( K_{17} \cdot \frac{e^{-(x+K_{12})}}{x + K_{12}} + J_2(x) - J_3(x) \right) + B - \frac{E \cdot \psi}{1+\mu} \cdot \left( \frac{x_2^2}{x^2} + 1 \right); \quad \sigma_z(x) = \frac{1}{1-\beta} \cdot \left( \frac{3 \cdot \mu \cdot (M_H - M_K) + B_\phi \cdot E \cdot (M_H - K_1 + K_2 \cdot x)}{3 \cdot (M_H - M_K) + 2 \cdot B_\phi \cdot E \cdot (M_H - K_1 + K_2 \cdot x)} \cdot \left( 2K_{10} + 2K_{11} \cdot x + 2 \cdot K_{13} \cdot \ln(x) + 2K_{14} \cdot \ln(x + K_{12}) + \frac{K_{15} + K_{16} \cdot x + K_{11} \cdot x^2}{x + K_{12}} \right) + C_2 \cdot \left( \frac{3 \mu \cdot (M_H - M_K) + B_\phi E \cdot (M_H - K_1 + K_2 x)}{3(M_H - M_K) + 2B_\phi E \cdot (M_H - K_1 + K_2 x)} \cdot \left( K_{17} \frac{e^{-(x+K_{12})}}{x + K_{12}} + 2J_2(x) - 2J_3(x) \right) \right) -$$

$$-\frac{3 \cdot \alpha \cdot E \cdot (K_1 - M_K - K_2 \cdot x) \cdot (M_H - M_K)}{3 \cdot (M_H - M_K) + 2 \cdot B_\phi \cdot E \cdot (M_H - K_1 + K_2 \cdot x)} - \frac{2 \cdot \mu \cdot E}{1 + \mu} \cdot \psi,$$

где  $u(x)$  – компонента радиального перемещения;

$x = \eta \cdot r$  – переменная, введённая для упрощения записи выражений;

$A, B, C_1, C_2$  – постоянные интегрирования.

Остальные величины определяются следующими зависимостями:

$$M_H^* = M_H + \left( \frac{1 + \mu}{B_\phi \cdot E} \right) \cdot (M_H - M_K); K_1 = M_H - \frac{(M_H - M_K) \cdot t}{t_1} + \left( 1 - \frac{t}{t_1} \right) \cdot \frac{(M_H - M_K) \cdot x_2}{x_2 - x_1};$$

$$K_2 = \frac{(M_H - M_K)}{x_2 - x_1} \cdot \left( 1 - \frac{t}{t_1} \right); K_3 = \frac{B_\phi \cdot \sigma_T^0}{M_H - M_K} \cdot \left( \chi \cdot M_H^* - \left( \chi + \frac{M_H^*}{M_H} \right) \cdot K_1 + \frac{K_1^2}{M_H} \right);$$

$$K_4 = \frac{B_\phi \cdot \sigma_T^0}{M_H - M_K} \cdot \left( \left( \chi + \frac{M_H^*}{M_H} \right) \cdot K_2 - \frac{2 \cdot K_1 \cdot K_2}{M_H} \right); K_5 = \frac{B_\phi \cdot \sigma_T^0}{M_H - M_K} \cdot \frac{K_2^2}{M_H};$$

$$K_6 = -(K_4 - K_3 - 2 \cdot K_5) \cdot \ln(x_2) + \frac{K_5}{2} \cdot x_2^2 - (2 \cdot K_5 - K_4) \cdot x_2; K_7 = 2 \cdot K_5 - K_4; K_8 = \frac{-K_5}{2};$$

$$K_9 = K_4 - K_3 - 2 \cdot K_5; K_{10} = \left( - \left( \frac{K_9}{M_H^* - K_1} - \frac{K_7}{K_2} - \frac{(M_H^* - K_1) \cdot K_5}{K_2^2} \right) \cdot \ln \left( x_2 + \frac{M_H^* - K_1}{K_2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{K_9}{M_H^* - K_1} \cdot \ln(x_2) - \frac{K_5}{K_2} \cdot x_2 \right) \cdot \frac{M_H - M_K}{B_\phi}; K_{11} = \frac{K_5}{K_2} \cdot \frac{M_H - M_K}{B_\phi}; K_{12} = \frac{M_H^* - K_1}{K_2};$$

$$K_{13} = - \frac{M_H - M_K}{B_\phi} \cdot \frac{K_9}{M_H^* - K_1}; K_{14} = \frac{M_H - M_K}{B_\phi} \cdot \left( \frac{K_9}{M_H^* - K_1} - \frac{K_7}{K_2} - \frac{K_{12} \cdot K_5}{K_2} \right);$$

$$K_{15} = - \frac{M_H - M_K}{B_\phi \cdot K_2} \cdot K_9; K_{16} = - \frac{M_H - M_K}{B_\phi \cdot K_2} \cdot K_7; K_{17} = \frac{e^{K_{12}}}{K_2}; I_2(x) = \int_{x_2}^x \frac{e^{-x}}{x} dx;$$

$$J_2(x) = \frac{1}{K_2 \cdot K_{12}} \cdot I_2(x); J_3(x) = \frac{K_{17}}{K_{12}} \cdot \int_{x_2 + K_{12}}^{x + K_{12}} \frac{e^{-x}}{x} dx; \psi = 0, \text{ при } t \in (0, t_1);$$

$$\psi = \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{q \cdot x_1^2}{x_2^2 - x_1^2}, \text{ при } t = t_1.$$

Для определения НДС цилиндра в упругой области (область чистого аустенита) используются зависимости теории упругости. Построение эпюр нормальных напряжений по толщине стенки цилиндра проводится для следующих значений исходных величин:  $r_1 = 0,0125 \text{ м}$ ,  $r_2 = 0,0225 \text{ м}$ ,  $\eta = 1,0$ ,  $q = 100 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ,  $\mu = 0,33$ ,  $\alpha = 140 \cdot 10^{-7} 1/^\circ \text{ С}$ ,  $E = 74 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ,  $M_H = 50 \text{ }^\circ \text{ С}$ ,  $M_K = 20 \text{ }^\circ \text{ С}$ ,  $\sigma_T^0 = 65 \cdot 10^6 \text{ Па}$ ,  $B_\phi = 8 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ ,  $\chi = 2$ .

На рисунках 2 – 4 приведены эпюры нормальных напряжений для различных стадий процесса охлаждения.

На рисунках 5, 6 приведены соответственно результаты решения задачи Ламе и эпюры остаточных напряжений. На рисунке 7 приведён график изменения перемещений внутренней поверхности цилиндра при охлаждении.

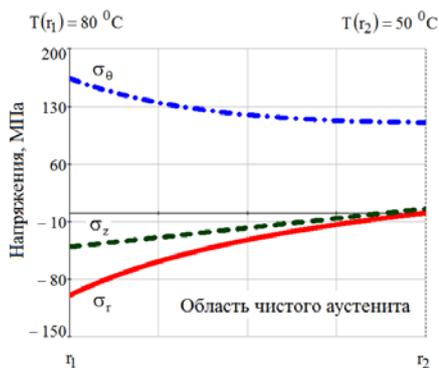


Рисунок 2 – Эпюры нормальных напряжений при  $t = 0$

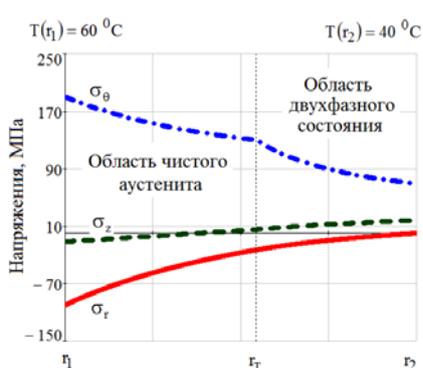


Рисунок 3 – Эпюры нормальных напряжений при  $t = 0,333t_1$

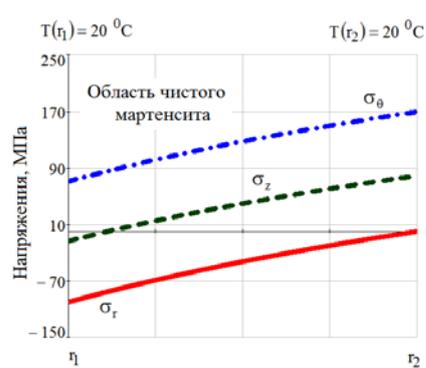


Рисунок 4 – Эпюры нормальных напряжений при  $t = t_1$  без разгрузки

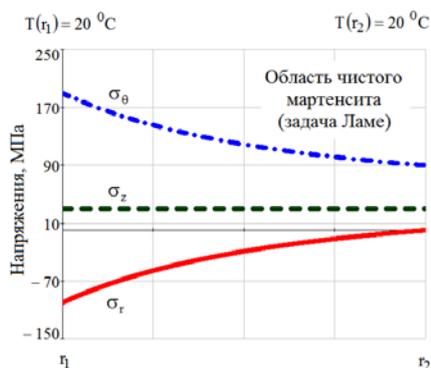


Рисунок 5 – Эпюры нормальных напряжений для задачи Ламе

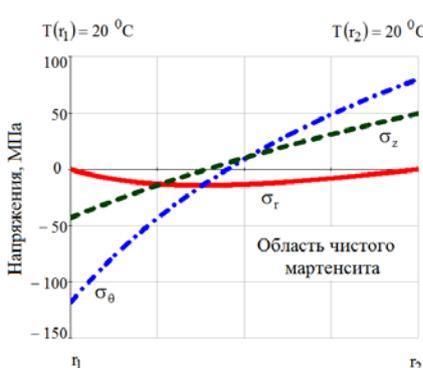


Рисунок 6 – Эпюры нормальных напряжений при  $t = t_1$  после разгрузки

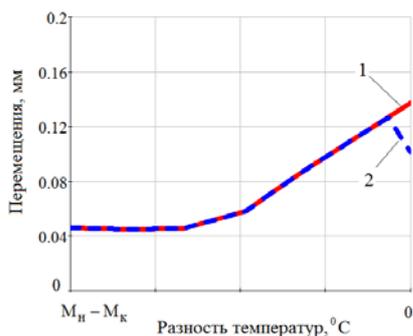


Рисунок 7 – Изменение перемещений внутреннего радиуса цилиндра:  
1 – без разгрузки;  
2 – после разгрузки

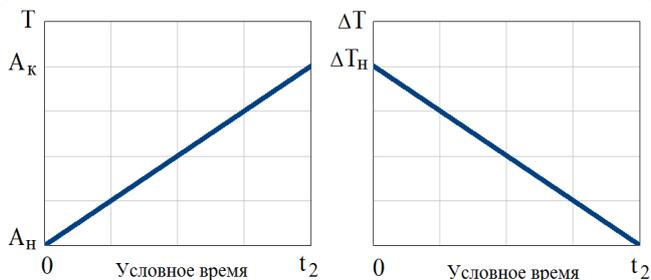


Рисунок 8 – Температурный режим  
слева – изменение температуры на внешнем радиусе;  
справа – изменение разности температур по толщине цилиндра

аналитической мезомеханики.

Основные уравнения, используемые в расчёте:

1) физические соотношения, записанные с учётом принятых гипотез:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r - \alpha \cdot (A_K - T) - \frac{1}{E} \cdot (\sigma_r - \mu \cdot (\sigma_\theta + \sigma_z)) &= \frac{\varepsilon_r^0}{\xi} \cdot \frac{A_K - T}{A_K - A_H}; \\ \varepsilon_\theta - \alpha \cdot (A_K - T) - \frac{1}{E} \cdot (\sigma_\theta - \mu \cdot (\sigma_r + \sigma_z)) &= \frac{\varepsilon_\theta^0}{\xi} \cdot \frac{A_K - T}{A_K - A_H}; \\ -\alpha \cdot (A_K - T) - \frac{1}{E} \cdot (\sigma_z - \mu \cdot (\sigma_r + \sigma_\theta)) &= \frac{\varepsilon_z^0}{\xi} \cdot \frac{A_K - T}{A_K - A_H}, \end{aligned}$$

Второй этап решения включает в себя расчёт толстостенного цилиндра из материала с ЭПФ на этапе реализации обратного мартенситного превращения. Рассматриваются два случая граничных условий на внутренней поверхности цилиндра: а) постоянное внутреннее давление; б) нулевое давление (при нагреве после разгрузки). Изменение температурного режима представлено на рисунке 8.

При решении используются гипотезы аддитивности, плоской деформации, а также принимается модель структурно-

где  $A_H, A_K$  – температура соответственно начала и конца обратной мартенситной реакции;  
 $\varepsilon_r^0, \varepsilon_\theta^0, \varepsilon_z^0$  – деформации соответственно в радиальном, окружном и осевом направлениях, накопленные при охлаждении на этапе реализации прямого мартенситного превращения;  
 $\xi$  – коэффициент, обеспечивающий непрерывность по перемещениям при переходе от решения задачи охлаждения к решению задачи нагрева;

2) дифференциальные уравнения равновесия и совместности деформаций для осесимметричной задачи:

$$r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0; \quad r \cdot \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \varepsilon_\theta - \varepsilon_r = 0.$$

При выводе аналитических зависимостей принимается стационарный линейный закон изменения температуры по толщине стенки цилиндра:

$$T(r) = A_K + (A_H - A_K) \cdot \left( \left( 1 - \frac{t}{t_2} \right) \cdot \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right),$$

где  $t$  – условное время, характеризующее кинетику процесса обратного мартенситного превращения вдоль радиуса цилиндра при нагреве;

$t_2$  – условное время, соответствующее моменту, когда значение температуры во всех точках цилиндра равно  $A_K$ .

На основе вышеприведённых соотношений получены следующие аналитические выражения для расчёта НДС толстостенного цилиндра на этапе реализации обратного мартенситного превращения:

$$\begin{aligned} u &= -e_{12} + e_{21} \cdot x + e_{23} \cdot \frac{1}{x} + e_{24} \cdot x \cdot \ln(x) + e_{25} \cdot x^2 \cdot \ln(x) + e_{26} \cdot \frac{e^{-x}}{x} + e_{26} \cdot e^{-x} + \\ &\quad + e_{15} \cdot x \cdot e^{-x} + e_{16} \cdot \frac{I_4(x)}{x} + e_{17} \cdot \frac{I_5(x)}{x} + A_2 \cdot x + \frac{B_2}{x}; \\ \varepsilon_\theta &= \eta \cdot \left( e_{21} + e_{22} \cdot x - e_{12} \cdot \frac{1}{x} + e_{23} \cdot \frac{1}{x^2} + e_{24} \cdot \ln(x) + e_{25} \cdot x \cdot \ln(x) + e_{26} \cdot \frac{e^{-x}}{x^2} + \right. \\ &\quad \left. + e_{26} \cdot \frac{e^{-x}}{x} + e_{15} \cdot e^{-x} + e_{16} \cdot \frac{I_4(x)}{x^2} + e_{17} \cdot \frac{I_5(x)}{x^2} + A_2 + \frac{B_2}{x^2} \right); \\ \varepsilon_r &= \eta \cdot \left( (e_{21} + e_{24}) + (2 \cdot e_{22} + e_{25}) \cdot x - e_{23} \cdot \frac{1}{x^2} + e_{24} \cdot \ln(x) + 2 \cdot e_{25} \cdot x \cdot \ln(x) + \right. \\ &\quad \left. + (-e_{26} + e_{15}) \cdot e^{-x} - e_{15} \cdot x \cdot e^{-x} - e_{26} \cdot \frac{e^{-x}}{x} - e_{26} \cdot \frac{e^{-x}}{x^2} + e_{16} \cdot I_1(x) + e_{17} \cdot I_3(x) + \right. \\ &\quad \left. - e_{16} \cdot \frac{I_4(x)}{x^2} - e_{17} \cdot \frac{I_5(x)}{x^2} + A_2 - \frac{B_2}{x^2} \right); \\ \sigma_r &= F \cdot \left( E_0 + E_1 \cdot x + E_2 \cdot \frac{1}{x} + E_3 \cdot \frac{1}{x^2} + E_4 \cdot x \cdot \ln(x) + E_5 \cdot e^{-x} + E_6 \cdot x \cdot e^{-x} + \right. \\ &\quad \left. + E_7 \cdot \frac{e^{-x}}{x} + E_7 \cdot \frac{e^{-x}}{x^2} + E_8 \cdot I_1(x) + E_9 \cdot I_2(x) + E_{10} \cdot I_3(x) + E_{11} \cdot x \cdot I_2(x) + \right. \\ &\quad \left. + E_{12} \cdot \frac{I_4(x)}{x^2} + E_{13} \cdot \frac{I_5(x)}{x^2} + \eta \cdot A_2 - (1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot \frac{B_2}{x^2} \right); \\ \sigma_\theta &= F \cdot \left( F_0 + F_1 \cdot x + F_2 \cdot \frac{1}{x} + F_3 \cdot \frac{1}{x^2} + F_4 \cdot x \cdot \ln(x) + F_5 \cdot e^{-x} + F_6 \cdot x \cdot e^{-x} + \right. \\ &\quad \left. + F_7 \cdot \frac{e^{-x}}{x} + F_7 \cdot \frac{e^{-x}}{x^2} + F_8 \cdot I_1(x) + F_9 \cdot I_2(x) + F_{10} \cdot I_3(x) + F_{11} \cdot x \cdot I_2(x) + \right. \end{aligned}$$

$$+ F_{12} \cdot \frac{I_4(x)}{x^2} + F_{13} \cdot \frac{I_5(x)}{x^2} + \eta \cdot A_2 + (1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot \frac{B_2}{x^2} \Big);$$

$$\sigma_z = F \cdot \left( G_0 + G_1 \cdot x + G_2 \cdot \frac{1}{x} + G_3 \cdot \frac{1}{x^2} + G_4 \cdot x \cdot \ln(x) + G_5 \cdot e^{-x} + G_6 \cdot x \cdot e^{-x} + \right.$$

$$+ G_7 \cdot \frac{e^{-x}}{x} + G_7 \cdot \frac{e^{-x}}{x^2} + G_8 \cdot I_1(x) + G_9 \cdot I_2(x) + G_{10} \cdot I_3(x) + G_{11} \cdot x \cdot I_2(x) +$$

$$\left. + G_{12} \cdot \frac{I_4(x)}{x^2} + G_{13} \cdot \frac{I_5(x)}{x^2} + 2 \cdot \mu \cdot \eta \cdot A_2 \right),$$

где  $u$  – радиальное перемещение;

$A_2, B_2$  – константы интегрирования, определяемые из граничных условий.

Остальные коэффициенты определяются выражениями:

$$D_1 = (2A_H - A_K) + (A_K - A_H) \cdot \left( \left( 1 - \frac{t}{t_2} \right) \cdot \frac{x_2}{x_2 - x_1} + \frac{2 \cdot t}{t_2} \right); D_2 = \frac{A_K - A_H}{x_2 - x_1} \cdot \left( 1 - \frac{t}{t_2} \right);$$

$$D_3 = \frac{A_K - D_1}{A_K - A_H} \cdot \frac{1}{\xi}; D_4 = \frac{D_2}{A_K - A_H} \cdot \frac{1}{\xi}; D_1^* = A_K - D_1; D_2^* = -D_2; F = \frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)};$$

$$K_3 = \left( \chi \cdot M_H^* - \left( \chi + \frac{M_H^*}{M_H} \right) \cdot M_K + \frac{M_K^2}{M_H} \right) \cdot \frac{B_\phi \cdot \sigma_T^0}{M_H - M_K}; M_H^* = M_H + \frac{1 + \mu}{B_\phi \cdot E} \cdot (M_H - M_K);$$

$$e_0 = -(1 + \mu) \cdot \alpha \cdot D_1^* - D_3 \cdot \left( \frac{K_3}{1 - \beta} \cdot (-1 + \mu + \ln(x_2)) + A - a \cdot \psi \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \right);$$

$$e_1 = -(1 + \mu) \cdot \alpha \cdot D_2^* - D_4 \cdot \left( \frac{K_3}{1 - \beta} \cdot (-1 + \mu + \ln(x_2)) + A - a \cdot \psi \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \right);$$

$$e_2 = -(1 - 2 \cdot \mu) \cdot a \cdot \psi \cdot D_4 \cdot x_2^2; e_3 = -(1 - 2 \cdot \mu) \cdot a \cdot \psi \cdot D_3 \cdot x_2^2; e_4 = \frac{K_3 \cdot D_3}{1 - \beta}; e_5 = \frac{K_3 \cdot D_4}{1 - \beta};$$

$$e_6 = (1 - \mu) \cdot \frac{C_2 \cdot B_\phi}{M_H - M_K} \cdot D_3; e_7 = (1 - \mu) \cdot \frac{C_2 \cdot B_\phi}{M_H - M_K} \cdot D_4; e_8 = \frac{C_2 \cdot B_\phi}{M_H - M_K} \cdot D_3;$$

$$e_9 = \frac{C_2 \cdot B_\phi}{M_H - M_K} \cdot D_4; e_{10} = \frac{2 \cdot (1 - \mu) \cdot e_5 + e_1}{(1 - \mu) \cdot \eta}; e_{11} = \frac{-2 \cdot e_4}{\eta}; e_{12} = \frac{-e_2}{(1 - \mu) \cdot \eta}; e_{13} = \frac{-e_5}{(1 - \mu) \cdot \eta};$$

$$e_{14} = \frac{e_6 - e_7 - 2 \cdot e_9}{(1 - \mu) \cdot \eta}; e_{15} = \frac{e_7}{(1 - \mu) \cdot \eta}; e_{16} = \frac{-2 \cdot e_8}{(1 - \mu) \cdot \eta}; e_{17} = \frac{-e_9}{(1 - \mu) \cdot \eta};$$

$$e_{18} = -e_{10} \cdot x_1 - e_{11} \cdot \ln(x_1) + e_{12} \cdot \frac{1}{x_1} - e_{13} \cdot (-x_1 + x_1 \cdot \ln(x_1)) + e_{14} \cdot e^{-x_1};$$

$$e_{19} = e_{10} - e_{13}; e_{20} = -e_{14} - e_{15}; I_1(x) = \int_{x_1}^x \frac{e^{-x}}{x} dx; I_3(x) = \int_{x_1}^x I_2(x) dx; e_{21} = \frac{e_{18}}{2} - \frac{e_{11}}{4};$$

$$e_{22} = \frac{e_{19}}{3} - \frac{e_{13}}{9}; I_4(x) = \int_{x_1}^x x \cdot I_1(x) dx; I_5(x) = \int_{x_1}^x x \cdot I_3(x) dx;$$

$$e_{23} = -\frac{e_{18}}{2} \cdot x_1^2 - \frac{e_{19}}{3} \cdot x_1^3 - e_{11} \cdot \left( \frac{x_1^2}{2} \cdot \ln(x_1) - \frac{x_1^2}{4} \right) + e_{12} \cdot x_1 - e_{13} \cdot \left( \frac{x_1^3}{3} \cdot \ln(x_1) - \frac{x_1^3}{9} \right) +$$

$$e_{20} \cdot (1 + x_1) \cdot e^{-x_1} + e_{15} \cdot (-x_1^2 - 2 \cdot x_1 - 2) \cdot e^{-x_1}; e_{24} = \frac{e_{11}}{2}; e_{25} = \frac{e_{13}}{3}; e_{26} = 2 \cdot e_{15} - e_{20};$$

$$E_0 = e_0 + \eta \cdot e_{21} + (1 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{24}; E_1 = e_1 + (1 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{25} + (2 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{22};$$

$$\begin{aligned}
 E_2 &= e_2 - \mu \cdot \eta \cdot e_{12}; & E_3 &= e_3 - (1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot e_{23}; & E_4 &= e_5 + (2 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{25}; \\
 E_5 &= e_6 - (1 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{26} + \eta \cdot e_{15}; & E_6 &= e_7 - (1 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{15}; & E_7 &= -(1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot e_{26}; \\
 E_8 &= (1 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{16}; & E_9 &= e_8; & E_{10} &= (1 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{17}; & E_{11} &= e_9; & E_{12} &= -(1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot e_{16}; \\
 E_{13} &= -(1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot e_{17}; & F_0 &= e_0 - (1 - 2 \cdot \mu) \cdot e_4 + \eta \cdot e_{21} + \mu \cdot \eta \cdot e_{24}; \\
 F_1 &= e_1 - (1 - 2 \cdot \mu) \cdot e_5 + (1 + \mu) \cdot \eta \cdot e_{22} + \mu \cdot \eta \cdot e_{25}; \\
 F_2 &= -e_2 - (1 - \mu) \cdot \eta \cdot e_{12}; & F_3 &= -e_3 + (1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot e_{23}; & F_4 &= e_5 + (1 + \mu) \cdot \eta \cdot e_{25}; \\
 F_5 &= e_6 - e_8 - \mu \cdot \eta \cdot e_{26} + \eta \cdot e_{15}; & F_6 &= e_7 - e_9 - \mu \cdot \eta \cdot e_{15}; & F_7 &= (1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot e_{26}; & F_8 &= \mu \cdot \eta \cdot e_{16}; \\
 F_9 &= e_8; & F_{10} &= \mu \cdot \eta \cdot e_{17}; & F_{11} &= e_9; & F_{12} &= (1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot e_{16}; & F_{13} &= (1 - 2 \cdot \mu) \cdot \eta \cdot e_{17}; \\
 G_0 &= \mu \cdot (F_0 + E_0) - E \cdot \alpha \cdot D_1^*; & G_1 &= \mu \cdot (F_1 + E_1) + E \cdot \alpha \cdot D_2^*; & G_3 &= \mu \cdot (F_3 + E_3); \\
 G_4 &= \mu \cdot (F_4 + E_4); & G_5 &= \mu \cdot (F_5 + E_5); & G_6 &= \mu \cdot (F_6 + E_6); & G_7 &= \mu \cdot (F_7 + E_7); \\
 G_8 &= \mu \cdot (F_8 + E_8); & G_9 &= \mu \cdot (F_9 + E_9); & G_{10} &= \mu \cdot (F_{10} + E_{10}); & G_{11} &= \mu \cdot (F_{11} + E_{11}); \\
 G_{12} &= \mu \cdot (F_{12} + E_{12}); & G_{13} &= \mu \cdot (F_{13} + E_{13}).
 \end{aligned}$$

На рисунках 9 – 11 представлено распределение напряжений для различных этапов нагрева в интервале температур обратного мартенситного превращения после выполнения разгрузки при температуре конца мартенситной реакции. На рисунке 12 представлен график изменения перемещений внутренней поверхности цилиндра за один термоцикл (охлаждение – нагрев). На рисунках 13 – 15 приведены эпюры нормальных напряжений для различных этапов нагрева при постоянном внутреннем давлении. На рисунке 16 представлен график изменения перемещений внутренней поверхности цилиндра.

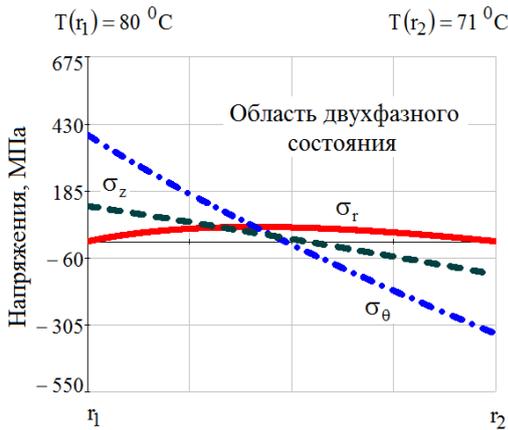


Рисунок 9 – Распределение нормальных напряжений при  $t = 0,7t_2$

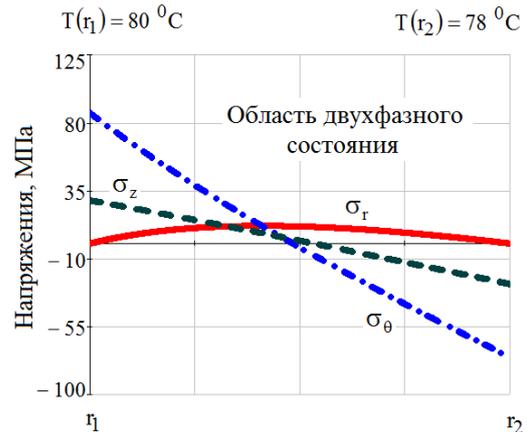


Рисунок 10 – Распределение нормальных напряжений при  $t = 0,933t_2$

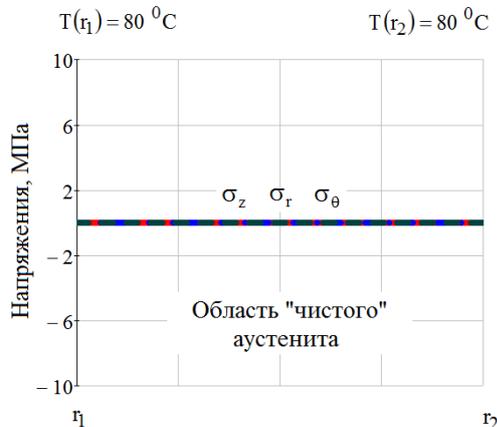


Рисунок 11 – Распределение нормальных напряжений при  $t = t_2$

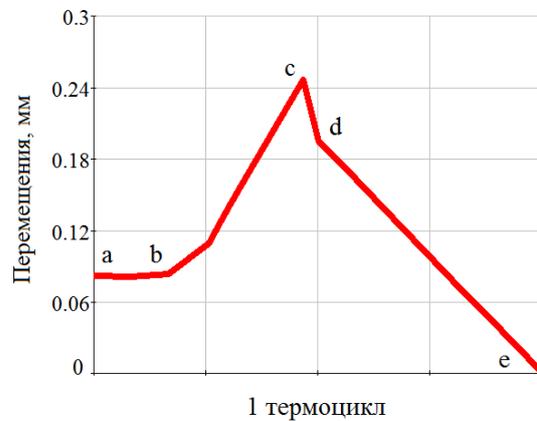


Рисунок 12 – Перемещения внутренней поверхности за один термоцикл с разгрузкой

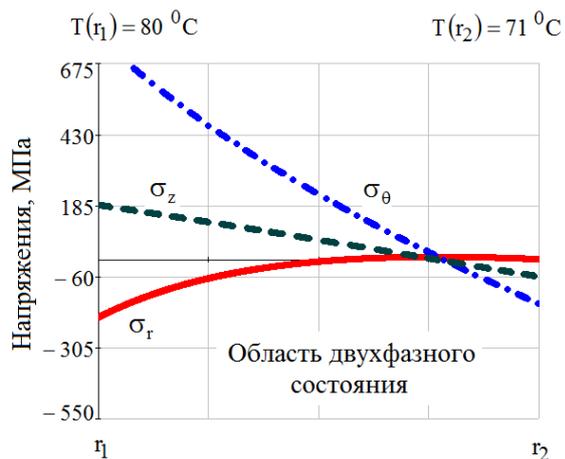


Рисунок 13 – Распределение нормальных напряжений при  $t = 0,7t_2$

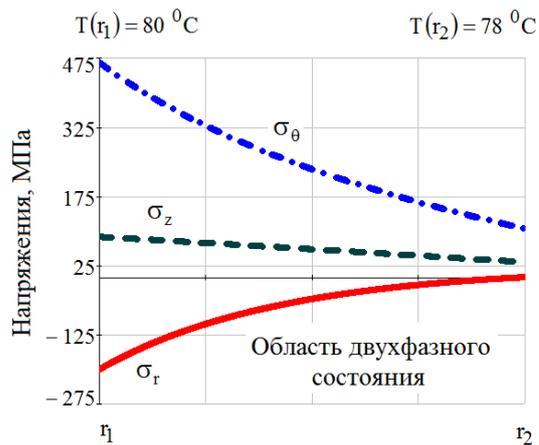


Рисунок 14 – Распределение нормальных напряжений при  $t = 0,933t_2$

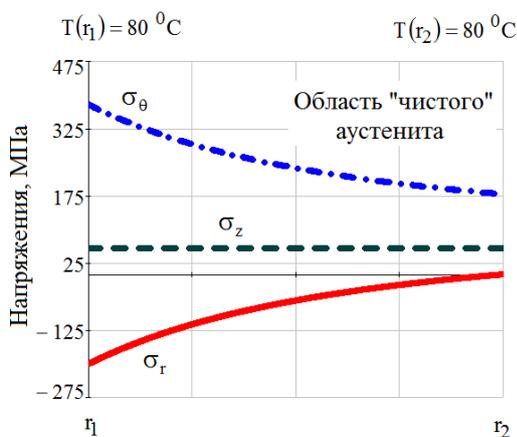


Рисунок 15 – Распределение нормальных напряжений при  $t = t_2$

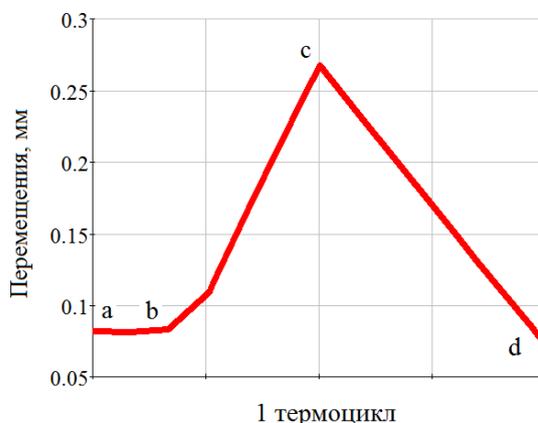


Рисунок 16 – Изменение перемещений внутренней поверхности за один термоцикл без разгрузки

На последнем этапе выполняется расчёт термомеханического соединения с применением толстостенной муфты (цилиндра) из материала с эффектом памяти формы. При выполнении расчётов используются результаты предыдущих этапов и методика, представленная в [5]. На рисунке 17 представлены элементы термомеханического соединения.

Для обеспечения граничных условий на внутренней и внешней поверхности цилиндра из материала с ЭПФ, записываем граничные условия:

$$\sigma_r^\Phi(x_1) = -p_k; \quad \sigma_r^\Phi(x_2) = 0,$$

где  $p_k$  – контактное давление.



Рисунок 17 – Элементы термомеханического соединения

Из последних равенств находим константы интегрирования:

$$A_2 = \frac{x_1^2 \cdot (F \cdot (R_{x1} - R_{x2}) + p_k)}{F \cdot \eta \cdot (x_2^2 - x_1^2)} - \frac{1}{\eta} \cdot R_{x2}; \quad B_2 = \frac{x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot (F \cdot (R_{x1} - R_{x2}) + p_k)}{(1 - 2 \cdot \mu) \cdot F \cdot \eta \cdot (x_2^2 - x_1^2)},$$

где

$$\begin{aligned} R_{x1} = & E_0 + E_1 \cdot x_1 + E_2 \cdot \frac{1}{x_1} + E_3 \cdot \frac{1}{x_1^2} + E_4 \cdot x_1 \cdot \ln(x_1) + E_5 \cdot e^{-x_1} + E_6 \cdot x_1 \cdot e^{-x_1} + \\ & + E_7 \cdot \frac{e^{-x_1}}{x_1} + E_7 \cdot \frac{e^{-x_1}}{x_1^2} + E_8 \cdot I_1(x_1) + E_9 \cdot I_2(x_1) + E_{10} \cdot I_3(x_1) + E_{11} \cdot x_1 \cdot I_2(x_1) + \\ & + E_{12} \cdot \frac{I_4(x_1)}{x_1^2} + E_{13} \cdot \frac{I_5(x_1)}{x_1^2}; \\ R_{x2} = & E_0 + E_1 \cdot x_2 + E_2 \cdot \frac{1}{x_2} + E_3 \cdot \frac{1}{x_2^2} + E_4 \cdot x_2 \cdot \ln(x_2) + E_5 \cdot e^{-x_2} + E_6 \cdot x_2 \cdot e^{-x_2} + \\ & + E_7 \cdot \frac{e^{-x_2}}{x_2} + E_7 \cdot \frac{e^{-x_2}}{x_2^2} + E_8 \cdot I_1(x_2) + E_9 \cdot I_2(x_2) + E_{10} \cdot I_3(x_2) + E_{11} \cdot x_2 \cdot I_2(x_2) + \\ & + E_{12} \cdot \frac{I_4(x_2)}{x_2^2} + E_{13} \cdot \frac{I_5(x_2)}{x_2^2}. \end{aligned}$$

Перемещения внутренней поверхности муфты из материала с ЭПФ (с учётом найденных коэффициентов интегрирования) определяются выражением:

$$u^\Phi(x_1) = H_1 + H_2 \cdot p_k,$$

где

$$\begin{aligned} H_1 = & U_{x1} + \frac{R_{x1} - R_{x2}}{\eta \cdot (x_2^2 - x_1^2)} \cdot \left( x_1^3 + \frac{x_2^2 \cdot x_1}{1 - 2 \cdot \mu} \right) - \frac{x_1 \cdot R_{x2}}{\eta}; \quad H_2 = \frac{1}{F \cdot \eta \cdot (x_2^2 - x_1^2)} \cdot \left( x_1^3 + \frac{x_2^2 \cdot x_1}{1 - 2 \cdot \mu} \right); \\ U_{x1} = & -e_{12} + e_{21} \cdot x_1 + e_{23} \cdot \frac{1}{x_1} + e_{24} \cdot x_1 \cdot \ln(x_1) + e_{25} \cdot x_1^2 \cdot \ln(x_1) + e_{26} \cdot \frac{e^{-x_1}}{x_1} + e_{26} \cdot e^{-x_1} + \\ & + e_{15} \cdot x_1 \cdot e^{-x_1} + e_{16} \cdot \frac{I_4(x_1)}{x_1} + e_{17} \cdot \frac{I_5(x_1)}{x_1}. \end{aligned}$$

Условие по перемещениям на границе контакта цилиндров:

$$u^\Phi(x_1) - u^Y(x_1) = \Delta,$$

где  $\Delta$  – превышение внешнего радиуса обжимаемого цилиндра внутреннего радиуса наружного цилиндра (из материала с эффектом памяти формы);

$u^Y(x_1)$  – перемещения внешней поверхности обжимаемого цилиндра, которые определяются выражением:

$$u^Y(x_1) = \frac{-p_k \cdot x_1}{\eta \cdot E_1} \cdot \left( \frac{x_1^2 + x_0^2}{x_1^2 - x_0^2} - \mu_1 \right).$$

Из последнего равенства определяем контактное давление:

$$p_k = \frac{\Delta - H_1}{H_2 - H_3},$$

где

$$H_3 = \frac{x_1}{\eta \cdot E_1} \cdot \left( \frac{x_1^2 + x_0^2}{x_1^2 - x_0^2} - \mu_1 \right).$$

Ниже приводятся результаты расчёта напряжённо–деформированного состояния термомеханического соединения при варьировании толщины стенки обжимаемого цилиндра и величины  $\Delta$ . Вариация вышеуказанных параметров необходима для создания термомеханического соединения, элементы которого будут равнопрочными.

Значения исходных величин для построения эпюр напряжений в термомеханическом соединении:  $r_1 = 0,0135$  м,  $r_2 = 0,0225$  м,  $r_{01} = 0,0111$  м,  $s_{01} = 0,0025$  м,  $r_{02} = 0,0121$  м,  $s_{02} = 0,0015$  м,  $\Delta_1 = 0,0001$  м,  $\Delta_2 = 0,00005$  м,  $\eta = 1$ ,  $\mu = 0,33$ ,  $E = 74 \cdot 10^9$  Па,  $\mu' = 0,3$ ,  $E' = 2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\alpha = 140 \cdot 10^{-7}$  1/°С,  $M_H = 50$  °С,  $M_K = 20$  °С,  $A_H = 50$  °С,  $A_K = 80$  °С,  $B_\phi = 8 \cdot 10^{-11}$  Па<sup>-1</sup>,  $\sigma_T^0 = 65 \cdot 10^6$  Па,  $\chi = 2$ .

На рисунках 18 – 21 представлено распределение напряжений в термомеханическом соединении для следующих сочетаний параметров  $\Delta$  и  $s$ : 1)  $s_{01} - \Delta_1$ ; 2)  $s_{01} - \Delta_2$ ; 3)  $s_{02} - \Delta_2$ ; 4)  $s_{02} - \Delta_1$ . Эпюры напряжений построены при  $T(r_1) = T(r_2) = A_K$ .

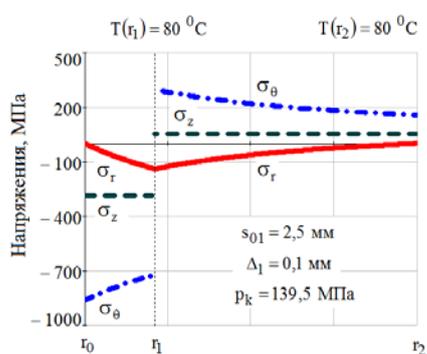


Рисунок 18 – Распределение напряжений в ТМС по первому сочетанию

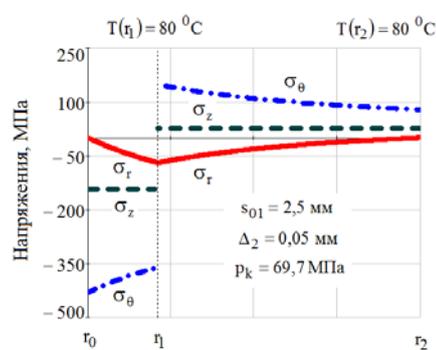


Рисунок 19 – Распределение напряжений в ТМС по второму сочетанию

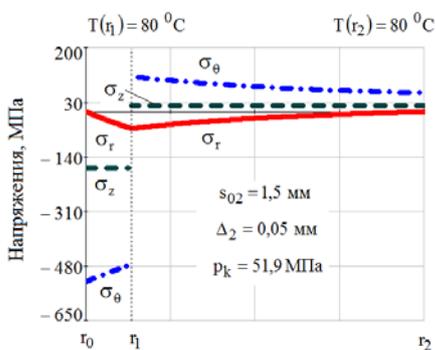


Рисунок 20 – Распределение напряжений в ТМС по третьему сочетанию

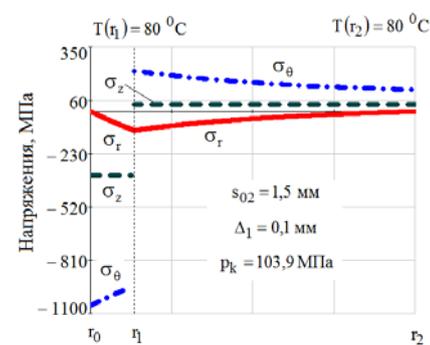


Рисунок 21 – Распределение напряжений в ТМС по четвёртому сочетанию

Анализ результатов, представленных на рисунках 1 – 21, позволяет заключить, что использование методов структурно–аналитической мезомеханики даёт возможность выполнения инженерного расчёта распределения напряжений и термо–деформационного поведения в ТМС из материалов с эффектом памяти формы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сплавы с памятью. Технология и применение: Учебник / О.И. Крахин, А.П. Кузнецов, М.Г. Косов. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 332 с.
2. Сплавы с памятью. Основы проектирования конструкций: Учебник / О.И. Крахин, А.П. Кузнецов, М.Г. Косов; под ред. проф. д.т.н. О.И. Крахина. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 396 с.
3. Лихачёв, В. А. Структурно–аналитическая теория прочности / В. А. Лихачёв, В. Г. Малинин. – СПб.: Наука, 1993. – 471 с.

4. Волков, А.Е. Расчет напряженно–деформированного состояния в цилиндре из ТИНИ при охлаждении под нагрузкой и разгрузке / А.Е. Волков, А.С. Кухарева // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2008. – С. 1337–1340.

5. Кобяков, Е. Т. Осесимметричная задача теории упругости: задания и методические указания к курсовой работе / Е. Т. Кобяков, Ю. С. Степанов. – Орёл: ОрелГТУ, 2003. – 67 с.

**Малинин Владислав Георгиевич**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орёл  
Доктор физико–математических наук, зав. кафедрой  
«Динамика и прочность машин»  
E–mail: malinin.mvg@yandex.ru

**Муссауи Юсеф Юссефович**

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный  
Университет»  
Аспирант  
E–mail: yusmus@yandex.ru

V.G. MALININ, Yu.Yu. MUSSAUI

## SIMULATION OF CREATION THERMOMECHANICAL CONNECTION USING COUPLINGS SHAPE MEMORY MATERIALS METHOD OF STRUCTURAL–ANALYTICAL MESOMECHANICS

*The research of stress–strain state of thick–walled cylinder made of material with shape memory effect when burnishing and initiating phase transformation in the terms of thermal cycling through temperature intervals of reversible martensitic reactions using methods of structural analytical mesomechanics. The results of mathematical modeling of preparation process and assembly of thermomechanical joint using cylindrical coupling with shape memory effect (SME).*

**Keywords:** structural analytical mesomechanics; mathematical modeling; shape memory effect; thermomechanical joint; boundary value problem; direct martensitic transformation; reverse martensitic transformation; stress–strain state.

### BIBLIOGRAPHY

1. Splavy s pamyatyu. Tekhnologiya i primeneniye: Uchebnik / O.I. Krakhin, A.P. Kuznetsov, M.G. Kosov. – Staryy Oskol: TNT, 2011. – 332 s.

2. Splavy s pamyatyu. Osnovy proyektirovaniya konstruktsiy: Uchebnik / O.I. Krakhin, A.P. Kuznetsov, M.G. Kosov; pod red. prof. d.t.n. O.I. Krakhina. – Staryy Oskol: TNT, 2012. – 396 s.

3. Likhachov, V. A. Strukturno–analiticheskaya teoriya prochnosti / V. A. Likhachov, V. G. Malinin. – SPb.: Nauka, 1993. – 471 s.

4. Volkov, A.Ye. Raschet napryazhenno–deformirovannogo sostoyaniya v tsilindre iz TINИ pri okhlazhdenii pod nagruzkoy i razgruzke / A.Ye. Volkov, A.S. Kukhareva // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya. – 2008. – S. 1337–1340.

5. Kobyakov, Ye. T. Osесimmetrichnaya zadacha teorii uprugosti: zadaniya i metodicheskiye ukazaniya k kursovoy rabote / Ye. T. Kobyakov, Yu. S. Stepanov. – Orol: OrelGTU, 2003. – 67 s.

**Malinin Vladislav Georgiyevich**

State University – ESPC, Orel  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head.  
Department «Dynamics and strength of machines»  
E–mail: malinin.mvg@yandex.ru

**Mussaui Yusef Yussefovich**

Orel State Agrarian University, Orel  
graduate  
E–mail: yusmus@yandex.ru

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ,** **РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ**

УДК 629.424.2

Д.И. ГОНЧАРОВ, В.В. КОБИЩАНОВ, Д.Я. АНТИПИН

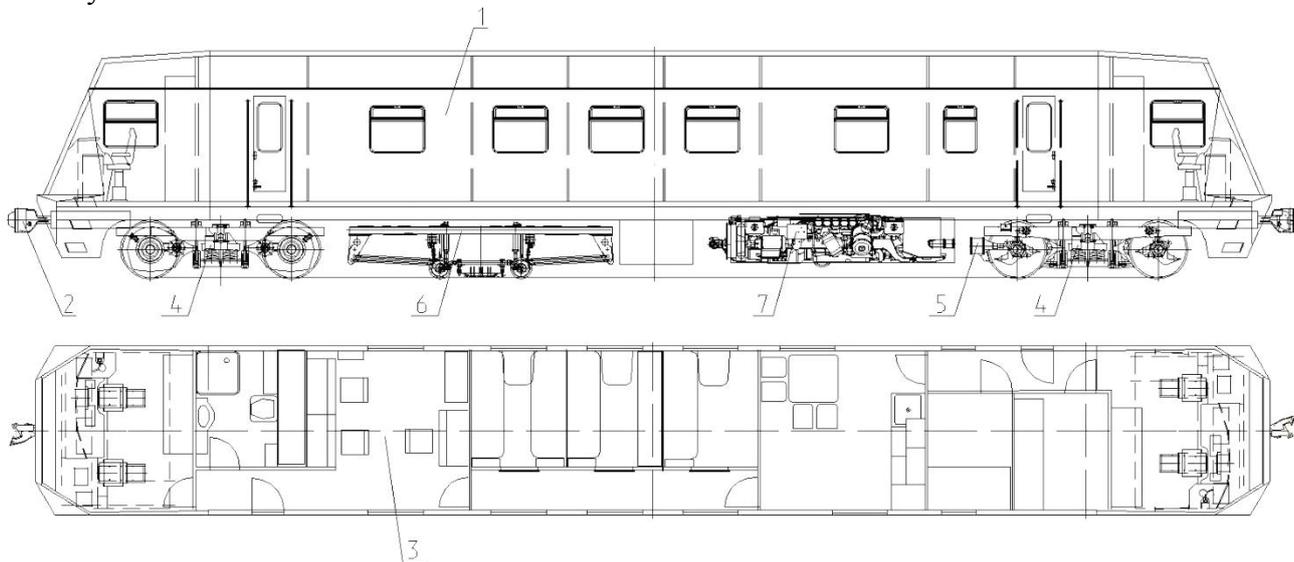
### **ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КУЗОВА АВТОМОТРИСЫ РАСЧЕТНЫМИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ**

*С появлением и развитием железной дороги появились потребности в ее обслуживании и ремонте, а также доставке пассажиров на второстепенных линиях с небольшим пассажиропотоком. Для ускоренной доставки ремонтного персонала к месту проведения работ, улучшения условий труда и повышения уровня механизации труда при техническом обслуживании пути создаются самоходные подвижные единицы, автомотрисы.*

**Ключевые слова:** автомотриса, напряженно-деформированное состояние, допускаемые напряжения.

Тверским институтом вагоностроения по заказу «Фирмы «ТВЕМА» разработан проект самоходной автомотрисы «Север», в соответствии с которым изготовлен опытный образец, а затем и партия. Получен патент на полезную модель № 2014125293. Количество произведенных на данный момент самоходных подвижных единиц равно 17. Автомотриса специального назначения выполняет функции путеизмерителя и дефектоскопа.

Автомотриса (рисунок 1) содержит кузов 1, автосцепное оборудование 2, аппаратный салон 3, тележки 4, тормозное оборудование 5, дефектоскопное оборудование 6, силовую установку 7.



**Рисунок 1 – Общий вид автомотрисы**

Несущими элементами кузова являются рама, боковые стены и крыша, образуя единую несущую систему.

Технические характеристики приведены в таблице 1.

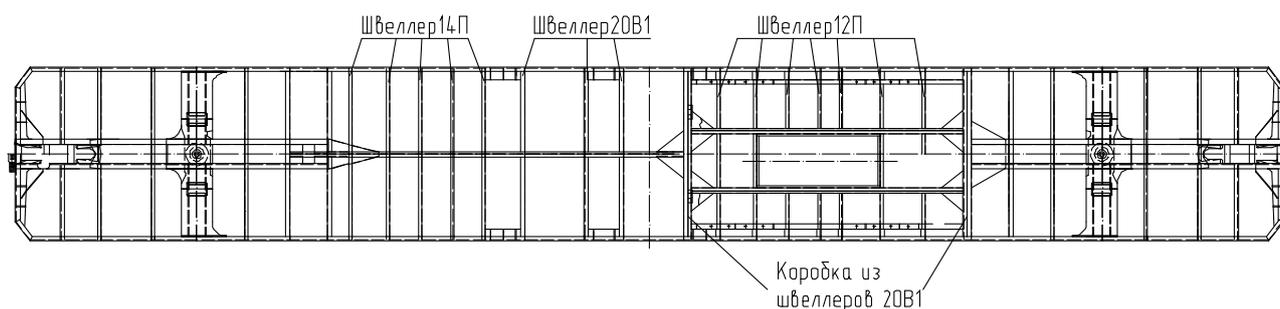
Все узлы кузова (рама, лицевые части, крыша, боковые стены) являются оригинальными, что обусловлено их функциональным назначением.

Наиболее сложным узлом является рама (рисунок 2), позволяющая разместить под вагоном ряд агрегатов, имеющих существенную массу, и специальные места для их монтажа и обслуживания. К таким агрегатам относятся: дизель-генератор с посадочными размерами: 2880 мм – по длине, 2590 мм – по ширине и массой – 5 т; топливный бак массой (с горючим)

– 2,5 т; аккумуляторный бокс – 1 т; дефектоскопная тележка – 1 т. С учетом этого рама кузова имеет хребтовую балку переменного сечения, которая прерывается на участке монтажа дизель–генератора.

Таблица 1 – Технические характеристики предлагаемой автотомотрисы.

Габарит	1–Т
Длина по осям автосцепки, мм	23500
Ширина, мм	3144
Высота от УГР, мм	4313
База, мм	16000
Конструкционная скорость, км/ч	120
Скорость передвижения в рабочем режиме:	
–дефектоскоп, км/ч	не более 70
–путеизмеритель, км/ч	не более 100
Мощность силовой установки, кВт	500
Масса вагона брутто, т	72
Моторные тележки	модель 18–9958
Масса тележки, т	13



**Рисунок 2 – Рама (вид сверху)**

Противоударные стойки лицевой части (ЛЧ) и горизонтальные элементы изготовлены из швеллера № 14П ГОСТ 8240–97. Обшивка ЛЧ гладкая толщиной 2,5 мм. Внешний вид лицевой части выбран с учетом функционального назначения, уменьшения лобового сопротивления при движении и придания эстетичного внешнего вида.

Рама выполнена из стали 09Г2С ГОСТ 19281–89 класс прочности 345, обшивка и каркас кузова – из стали 15 пс ГОСТ 1050–88

Несущая способность кузова проверялась расчетными и экспериментальными методами в соответствии с требованиями «Норм...» [1].

Для создания расчётной схемы МКЭ (рисунок 3) использовался проектно–вычислительный комплекс SCAD [2]. При моделировании обшивки использовались конечные элементы оболочки (для гладкой – изотропные, для гофрированной – ортотропные). Элементы каркаса моделировались стержневыми элементами [3].

Вертикальная распределённая нагрузка прикладывалась по площади пола, горизонтальной проекции крыши и в месте крепления тележки дефектоскопа. Вертикальная нагрузка от оборудования, имеющего существенную массу, учитывалась отдельно как узловая. Продольные усилия с присоединенным моментом прикладывались к задним (сжимающая) и передним (растягивающая) упорным угольникам. Усилия взаимодействия силовой установки автотомотрисы учитывались в соответствии с методиками [4].

Закрепление расчетной схемы в пространстве, как твердого тела (при расчете по режимам «Норм...» [1]), обеспечивали четыре вертикальные (по оси Z) линейные связи на скользунах, две продольные линейные связи по оси X в месте приложения продольной нагрузки (на одном конце рамы), а также две дополнительные поперечные линейные связи по оси Y по концам кузова.

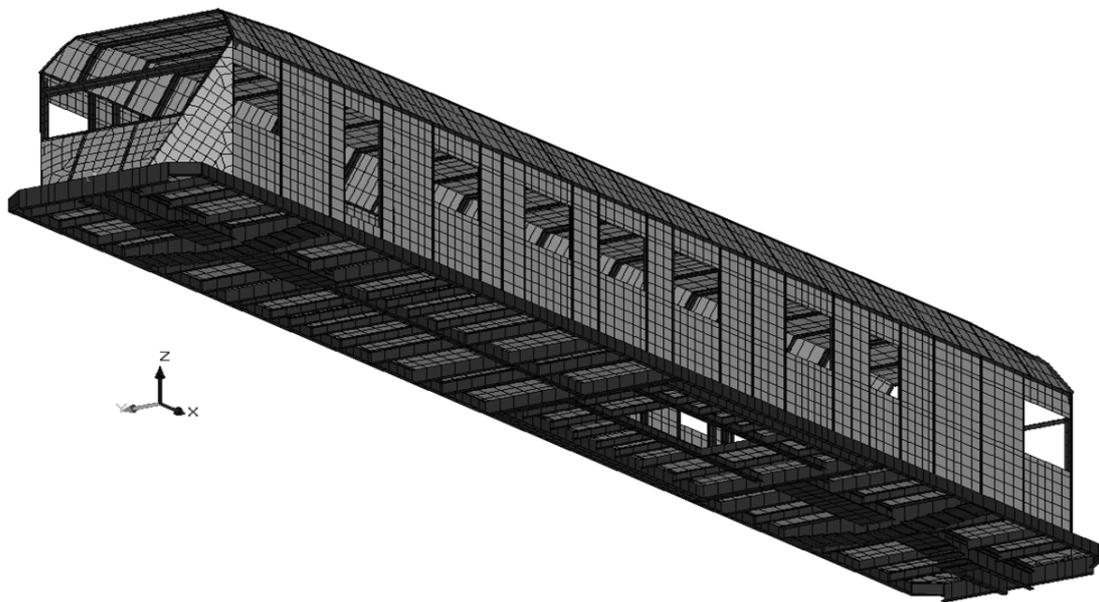


Рисунок 3 – Расчётная схема МКЭ автомотрисы

Частота первого тона изгибных колебаний кузова ( $\nu$ ) определялась по формуле 1:

$$\nu = k \frac{\alpha^2}{2\pi L^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ_0}{m}}, \quad (1)$$

где  $k = 0,85$  – поправочный коэффициент;  
 $\alpha = 4,73$  – корень частотного уравнения;  
 $L$  – длина кузова;  
 $E$  – модуль упругости;  
 $m$  – масса единицы длины кузова;  
 $J_0$  – момент инерции поперечного сечения кузова.

При моменте инерции кузова  $J_0 = 0,0482 \text{ м}^4$  частота  $\nu = 14,38 \text{ Гц}$ , что выше допускаемой «Нормами...» [1].

Проведены прочностные статические испытания опытного кузова, от воздействия следующих нормативных испытательных нагрузок:

- продольные сжимающие нагрузки 0,4 и 2,5 МН и растягивающие нагрузки 0,4 МН;
- вертикальным нагрузкам, равным весу брутто и тары кузова.

Испытательные нагрузки реализовались в специальном гидравлическом стенде, предназначенном для статических испытаний вагонов, с использованием штатных устройств, позволяющих имитировать эксплуатационные нагрузки. Каждый вид испытательных нагружений, при получении стабильных результатов, повторялся не менее трех раз. Замерялись нормальные напряжения по среднему сечению кузова, в сечении по шкворневой балке и дополнительно в основных несущих элементах рамы (обвязки, продольные балки, поперечные балки и ряд сечений в хребтовой балке). Схема расположения исследуемых сечений на кузове испытуемого объекта изображена на рисунке 4.

На исследуемый кузов вагона для замера микродеформаций устанавливалось в среднем до 250 тензодатчиков измерения проводились от сочетания нагрузок по I и II расчетным режимам «Норм...» [1]. С помощью микропроцессорной многоканальной тензометрической

системы ММТС–64 Новосибирского НИИ им. С.Чаплыгина. Погрешность измерений не более 0,1%.

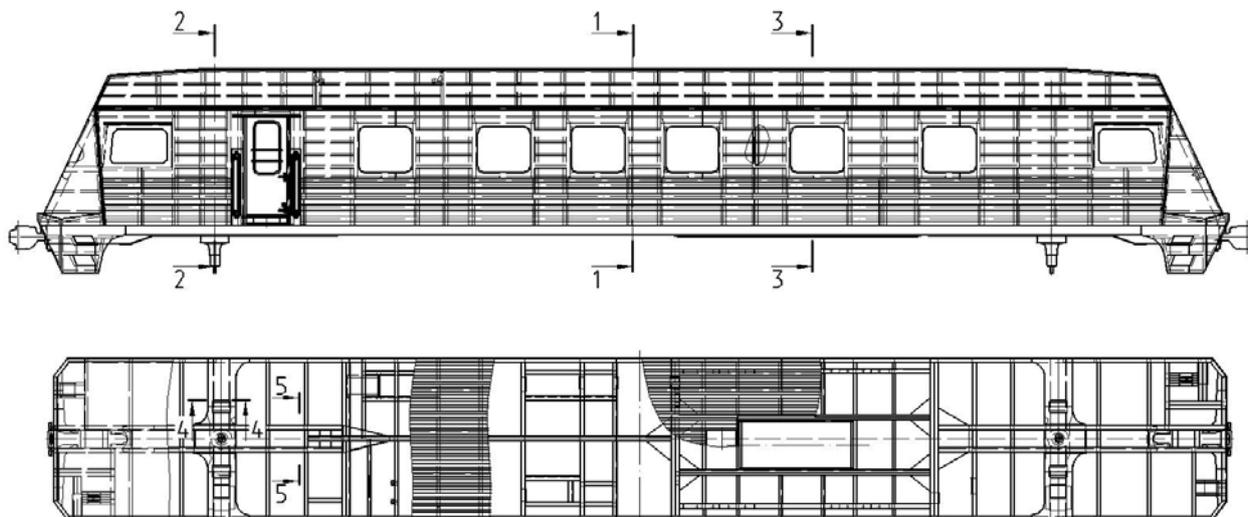


Рисунок 4 – Схема расположения исследуемых сечений на кузове

В таблице 2 приведены максимальные нормальные напряжения ( $\sigma_x$ , МПа) по результатам расчетов [5] и эксперимента [6].

Таблица 2 – Максимальные нормальные напряжения ( $\sigma_x$ , МПа).

Элемент конструкции	$\sigma_T$	[ $\sigma$ ]		Режим			
				I		II	
		I	II	Расчет	Экс-т	Расчет	Экс-т
хребтовая балка	345	327	210	-240	-224	-72	-59
шкворневая балка	345	327	210	-234	-212	-69	-63
Остальные несущие элементы рамы	345	345	220	-287	-262	-94	-76
Обшивка и каркас кузова	205	205	165	-203	-189	152	138

Максимальные напряжения по I и II режиму в обшивке кузова и элементах каркаса не превысили допустимых. Потери устойчивости несущих элементов и обшивы не зарегистрировано. На основании результатов расчетов и экспериментов установлено, что кузов по прочности и устойчивости удовлетворяет требованиям «Норм...».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М.: ВНИИВ–ВНИИЖТ, 1997. – 147 с.
2. Перельмутер, А.В. Расчет модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Киев, Изд-во «Сталь», 2002. – 600с.
3. Аверченков, В.И. Математическое моделирование сложных технологических объектов большой размерности факторного пространства в условиях пассивного эксперимента / В.И. Аверченков, Л.Я. Козак, В.В. Кобищанов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 3 (39). – С. 86–94.
4. Космодамианский, А.С. Динамические нагрузки в тяговом приводе локомотива при коротком замыкании тягового асинхронного двигателя / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Повышение эффективности использования и совершенствования системы технического обслуживания и ремонта локомотивов: Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омский гос. ун-т путей сообщения, Омск. – 2014. – С. 10–14.

5. Выполнение приближенных расчетов и проверка параметров основных элементов с целью обеспечения несущей способности кузова автотрисы: Отчет / ЗАО НО ТИВ; Шифр темы – 08.08.09 – Тверь, 2008. – 49 с.

6. Несущая способность вагонных конструкций и узлов при нормированных режимах нагружения. Прочность при статическом действии нагрузок Протокол приемочных испытаний № 168/05–08 ЗАО НО ТИВ – Тверь, 2008. – 38 с.

**Гончаров Дмитрий Игоревич**  
ЗАО «Научная организация  
Тверской институт вагоностроения»  
Заведующий лабораторией  
«Кузова, внутреннее оборудование  
пассажирских вагонов и САПР»  
170003, г. Тверь, Санкт –  
Петербургское шоссе 45г,  
Тел.: 8–963–222–24–64  
E–mail: amid1884@yandex.ru

**Кобищанов Владимир Владимирович**  
ФГБОУ ВПО «Брянский  
государственный технический  
университет»  
Директор Учебно – научного  
института транспорта, доктор техни-  
ческих наук, профессор  
241035, г. Брянск, бульвар 50 – лет  
Октября д. 7,  
Тел.: (4832) 56 –04 –66  
E–mail: adya24@rambler.ru

**Антипин Дмитрий Яковлевич**  
ФГБОУ ВПО «Брянский  
государственный технический  
университет»  
кандидат технических наук,  
доцент, заведующий кафедрой  
«Подвижной состав железных  
дорог», 241035, г. Брянск,  
бульвар 50 – лет Октября д. 7,  
Тел.: (4832) 56 –04 –66  
E–mail: adya24@rambler.ru

---

D.I. GONCHAROV, V.V. KOBISHCHANOV, D.YA. ANTIPIN

## EVALUATION OF CARRYING CAPACITY OF BODY RAILCARS CALCULATED AND EXPERIMENTAL METHODS

*With the advent and development of the railway came the need for its maintenance and repair, as well as delivery of passengers on secondary lines with a small number of passengers. For expedited shipping maintenance personnel to the place of work, improve working conditions and increase the level of mechanization of labor for maintenance paths are self-propelled mobile units, railcars.*

**Keywords:** railcar, the stress–strain state, allowable stress.

### BIBLIOGRAPHY

1. Normy dlya rascheta i otsenki prochnosti nesushchikh elementov i dinamicheskikh kachestv ekipazhnoy chasti motorvagonnogo podvizhnogo sostava zheleznikh dorog MPS RF kolei 1520 mm. – М.: VNIIV–VNIIZHT, 1997. – 147 s.
2. Perelmuter, A.V. Raschet modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza / A.V. Perelmuter, V.I. Slivker. – Kiyev, Izd–vo «Stal», 2002. – 600s.
3. Averchenkov, V.I. Matematicheskoye modelirovaniye slozhnykh tekhnologicheskikh ob»yektov bolshoy razmernosti faktornogo prostranstva v usloviyakh passivnogo eksperimenta / V.I. Averchenkov, L.YA. Kozak, V.V. Kobishchanov // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2013. – № 3 (39). – S. 86–94.
4. Kosmodamianskiy, A.S. Dinamicheskiye nagruzki v tyagovom privode lokomotiva pri korotkom zamykanii tyagovogo asinkhronnogo dvigatelya / A.S. Kosmodamianskiy, V.I. Vorobyev, A.A. Pugachev // Povysheniye effektivnosti ispolzovaniya i sovershenstvovaniya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov: Mezhdvuz. temat. sb. nauch. tr. – Omskiy gos. un–t putey soobshcheniya, Omsk. – 2014. – S.10–14
5. Vypolneniye priblizhennykh raschetov i proverka parametrov osnovnykh elementov s tselyu obespecheniya nesushchey sposobnosti kuzova avtomotrisy: Otchet / ZAO NO TIV; Shifr temy – 08.08.09 – Tver, 2008. – 49 s.
6. Nesushchaya sposobnost vagonnykh konstruktсий i uzlov pri normirovannykh rezhimakh nagruzheniya. Prochnost pri staticheskom deystvii nagruzok Protokol priyemochnykh ispytaniy № 168/05–08 ZAO NO TIV – Tver, 2008. – 38 s.

**Goncharov Dmitry Igorevich**  
Closed Joint Stock Company, a scientific organization Tver car–building institute  
Head of the Laboratory «Body, interior equipment of passenger cars and CAD»  
170003, Tver, Saint – Petersburg highway 45г,  
Ph.: 8–963–222–24–64  
E–mail: amid1884@yandex.ru

**Kobishchanov Vladimir Vladimirovich**  
FGBOU «Bryansk State Technical University»  
Director of Teaching – Research Institute of Transport, Dr. Sci. Sciences, Professor  
241035, Bryansk, Boulevard 50 – years of October 7,  
Ph.: (4832) 56 –04 –66  
E–mail: adya24@rambler.ru

**Antipin Dmitry Yakovlevich**  
FGBOU «Bryansk State Technical University»  
Head of the Department «Railway rolling stock»,  
Candidate of technical Sciences, Docent,  
241035, Bryansk, Boulevard 50 – years of October 7,  
Ph.: (4832) 56 –04 –66  
E–mail: adya24@rambler.ru

С.В. МИРОНЕНКО, М.Б. БОРОДИНА, Л.А. САВИН

## ДЕМПФИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗОК ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МУФТЫ С ЗУБЧАТЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

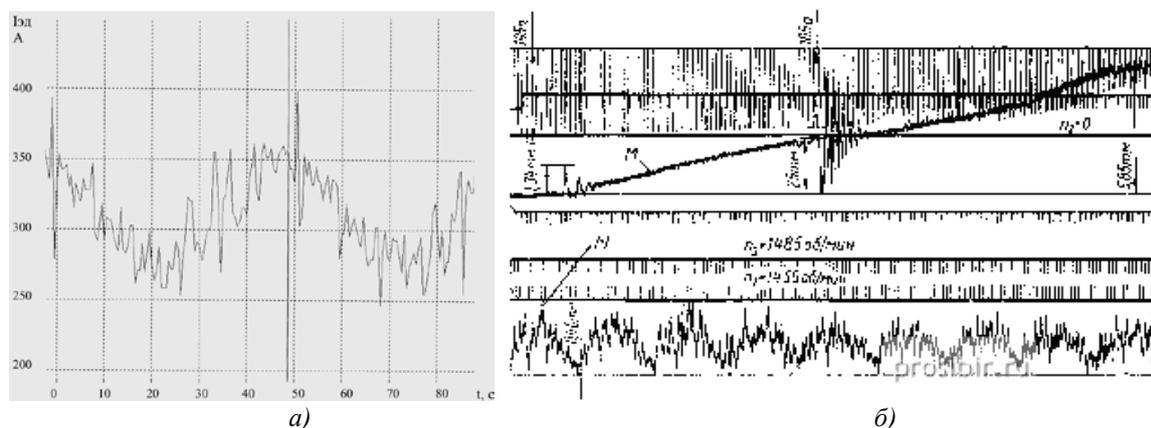
*В статье представлено описание модели гидромеханической муфты с зубчатым дифференциальным исполнительным механизмом, построенной в программном комплексе Matlab Simulink. Приведены основные результаты теоретических исследований муфты в режиме упругого демпфирования высокоинтенсивных нагрузок, а также определены факторы, влияющие на работу муфты в этом режиме. Представлены зависимости коэффициента динамичности муфты от начальных параметров гидросистемы.*

**Ключевые слова:** гидромеханическая муфта; зубчатый дифференциальный исполнительный механизм; параметры гидросистемы; математическая модель; коэффициент динамичности; импульсная нагрузка.

Технологические машины горно–металлургического комплекса обладают значительной энергией вращающихся масс, способностью двигателей развивать большие приводные крутящие моменты и высоким уровнем изменения динамических параметров движения. Рабочие нагрузки измеряются сотнями кН, имеют высокую интенсивность и случайный характер изменения.

На рисунке 1 приведены экспериментальные осциллограммы изменения тока электродвигателя в приводах обжиговой печи ЦОИ ОАО ОЭМК [1] и моментов конусной дробилки ВНИИМЕТМАШа на пусковых и основных режимах работы [2,3] (рисунок 1). Пропорционально изменению величины тока электродвигателя происходят колебания моментов сил упругости в линии валопровода.

Представленные графики показывают, что оборудование металлургических и горнодобывающих предприятий работает в условиях жестких динамических нагрузок, в большинстве случаев имеющих импульсный (пиковый) характер, отсюда нагрузки на привод приходятся намного больше расчетных. Это приводит к ускоренному износу деталей привода и увеличению зазоров в соединениях, что в свою очередь приводит к появлению еще более значительных динамических нагрузок. Кроме того, приводы определенную часть времени функционируют на переходных режимах, на которых имеет место непроизводительный расход энергии на ускорение и торможение вращающихся масс.



**Рисунок 1 – Экспериментальные осциллограммы нагрузок:**

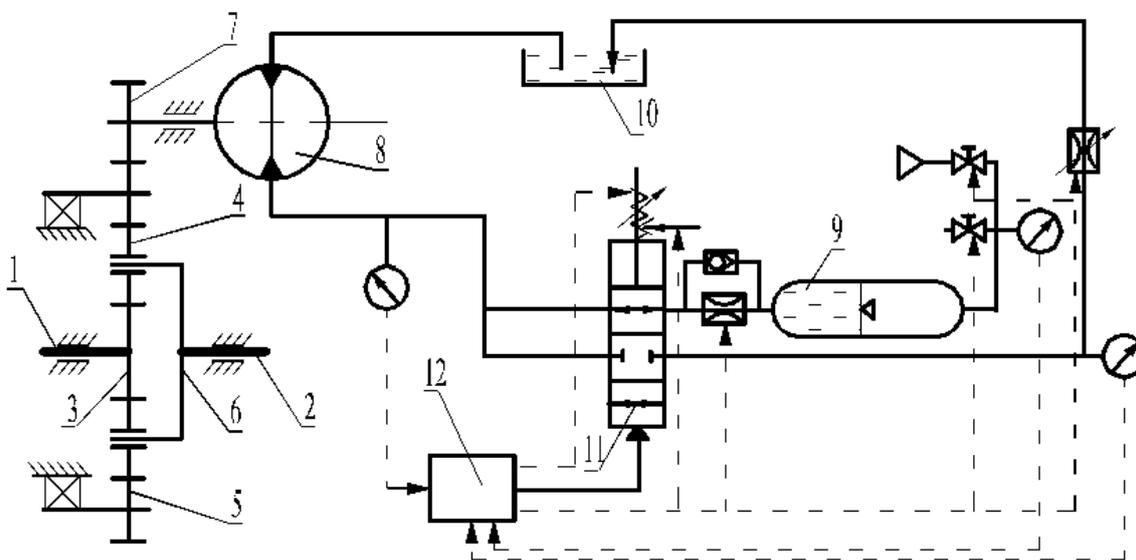
- а) токи электродвигателя обжиговой печи;  
б) моменты приводы конусной дробилки на пусковых и основных режимах

Следствиями работы машин в режиме периодического воздействия динамических нагрузок высокой интенсивности являются повышенный расход электрической энергии, перегрузки электродвигателя и элементов механической системы. Это приводит к значительным затратам на восстановление поломок, вызванных перегрузками элементов металлургических машин, существенным потерям производства (повышенная материалоемкость оборудования, низкая энергетическая эффективность). Вполне очевидно, что проблема снижения негативного влияния воздействия ударных импульсных нагрузок высокой интенсивности на приводы тяжело нагруженных механизмов не теряет свою актуальность и требует использования комплексных мер, включая современную элементную базу, автоматизированные средства проектирования и информационно-измерительные устройства.

Одним из перспективных направлений защиты приводов является использование предохранительных гидромеханических муфты с функциями самовосстановления режима и различными видами исполнительных механизмов.

В работах [4–10] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований муфт с гидромеханическими исполнительными механизмами различных видов, в частности, на основе передач винт–гайка.

Анализ этих работ показал, что гидромеханические муфты с зубчатым дифференциальным передаточным механизмом (рисунок 2) обладают наибольшими функциональными возможностями защиты привода от динамических нагрузок и перегрузок, так как имеют наибольший угол относительного закручивания полумуфт и кинематически не размыкаются при срабатывании. Но, как видно из анализа представленных работ, такой тип муфт исследовался только в качестве муфты сцепления в транспортных средствах [7]. В связи с этим, исследование предохранительных и упруго–демпфирующих возможностей гидромеханических муфт с зубчатым дифференциальным передаточным механизмом в приводах тяжело нагруженных машин является актуальной задачей.



*Рисунок 2 – Управляемая гидромеханическая муфта с дифференциальным механизмом*

Муфта [9] работает следующим образом. На установившемся режиме работы технологической машины момент от ведущего вала 1 через солнечное колесо 3 (рисунок 2) передаётся через сателлиты 4 на водило 6, связанное с ведомым валом 2. При этом коронное колесо 5 удерживается от поворота шестерней 7, связанной с гидромашинной 8, вал которой не вращается, так как давление в гидромашине 8 равно давлению в гидродемпфере 9, связанном с гидромашинной золотниковым гидрораспределителем 11, подвижный элемент которого находится в нижнем положении (рисунок 2).

При возрастании момента на валу 2 коронное колесо 5 проворачивается, и гидромашинная 8, демпфируя нагрузку, начинает работать в режиме насоса, закачивая

жидкость в гидродемпфер 9, накапливая часть энергии, до тех пор, пока давление в гидромашине 8 не уравновесится давлением в гидродемпфере. При снижении момента на валу 2, гидромашина 8 начинает работать в режиме мотора, проворачивая коронное колесо 5 в обратную сторону и возвращая энергию, накопленную в гидродемпфере 9, в привод до тех пор, пока не установится равновесное состояние.

Если момент на муфте превышает допустимый достаточно продолжительное время, то растёт давление в напорной магистрали и система управления 12 смещает вверх золотник гидрораспределителя 11. Рабочая жидкость из гидромашины 8 поступает в слив 10, резко падает давление в гидросистеме и гидромашина 8 не удерживает коронное колесо 5 дифференциального передаточного механизма. Гидромашина 8 работает в режиме холостого хода насоса, коронное колесо 5 вращается, что обеспечивает остановку ведомого вала 2, связанного с водилом 6. Это практически означает размыкание (срабатывание) предохранительной муфты. При восстановлении муфты золотник гидрораспределителя 11 автоматически или по команде оператора смещается в исходное положение.

Особенностью данной муфты является то, что в зависимости от задаваемых параметров гидросистемы, можно менять характеристики демпфирования высокоинтенсивных нагрузок, как на стадии проектирования, так и непосредственно в ходе работы механизма. Факторами, определяющими работу муфты в режиме упругого демпфирования, являются начальное давление в газовой полости гидропневмодемпфера 9 и расход гидравлической жидкости в напорной линии гидромашины 8.

Для данной конструкции была составлена математическая модель на базе стандартных блоков библиотек программного комплекса Matlab Simulink [12]. Модель представляет собой синтез подсистемы исполнительного зубчатого механизма с приводом от асинхронного двигателя и гидравлической подсистемы (рисунок 3). Параметры блоков задавались согласно реальным характеристикам элементов физической модели муфты. В качестве основной характеристики муфты для данного случая был выбран коэффициент динамичности  $K_d$ , равный отношению наибольших передаваемых моментов  $M_{max}$  к базовым (номинальным) значениям  $M_n$  и во многом определяющий степень демпфирования высокоинтенсивных нагрузок в системе.

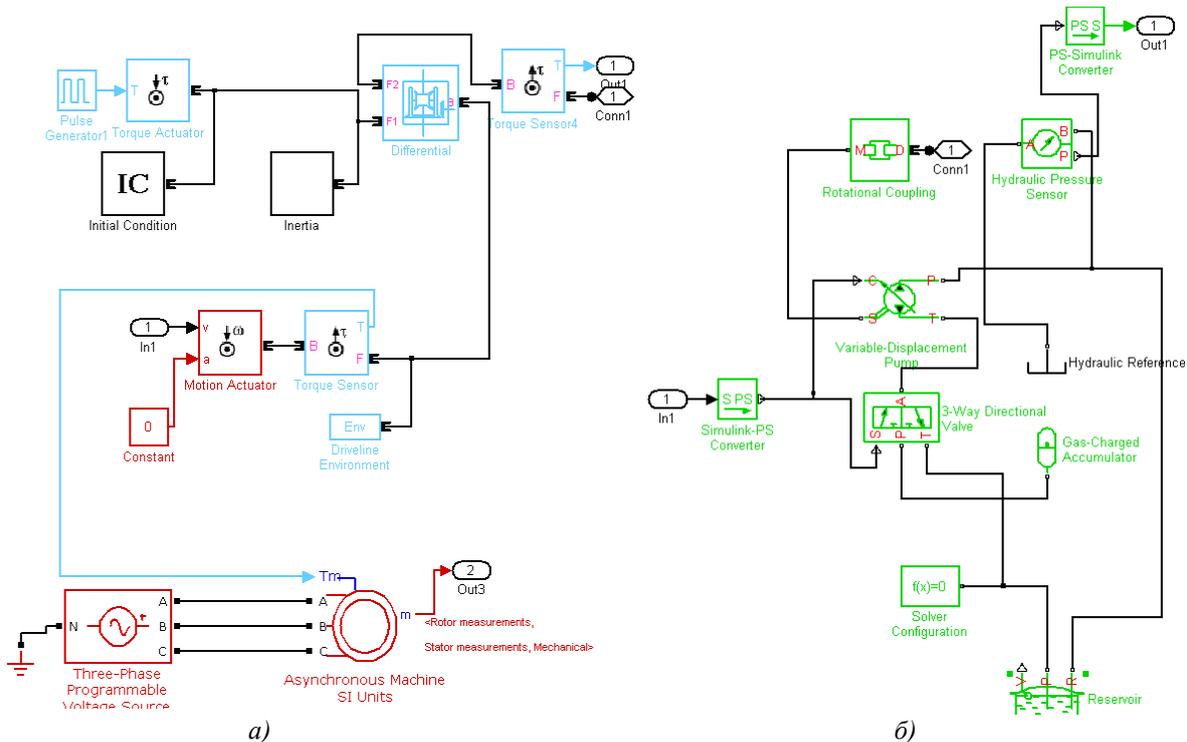
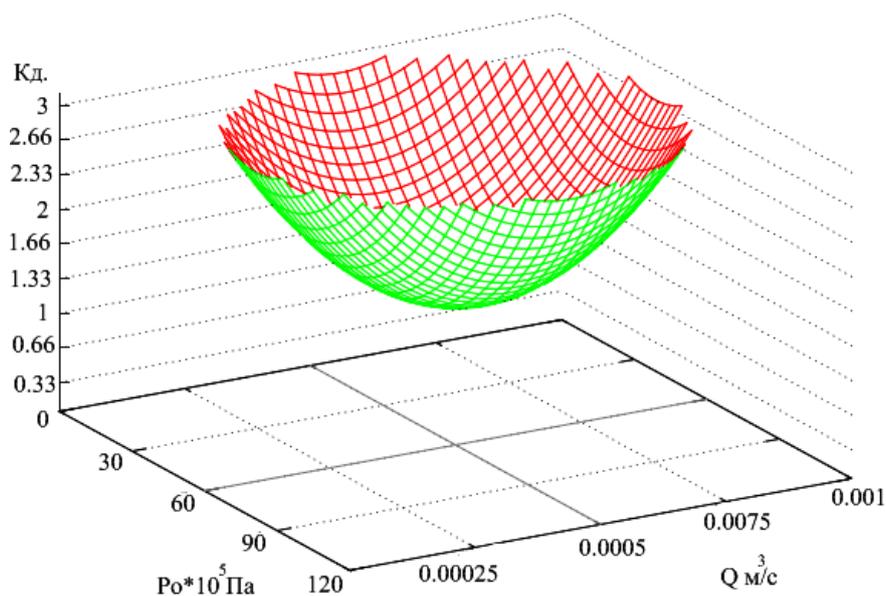


Рисунок 3 – Подсистемы модели муфты:  
 а) исполнительного зубчатого механизма; б) гидравлической системы

Для исследования факторов, влияющих на характеристики демпфирования муфты, со стороны рабочего органа механизма была задан импульсный момент сопротивления с амплитудой  $M = 80 \text{ кН} \cdot \text{м}$ . и периодом  $T = 1 \text{ сек}$ . При этом значения начального давления в газовой полости гидропневмоаккумулятора изменялись от  $P_0 = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$  до  $P_0 = 12 \cdot 10^6 \text{ Па}$  а значения расхода гидравлической жидкости от  $Q = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / \text{сек}$  до  $Q = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{сек}$ . Результаты исследований показали, что изменение момента на валу привода при импульсных технологических нагрузках зависит от начального давления в гидропневмоаккумуляторе и расхода жидкости в гидросистеме.

На основании полученных данных, была построена теоретическая зависимость коэффициента динамичности  $K_d$  от расхода гидравлической жидкости в гидросистеме и значения начального давления в газовой полости гидропневмоаккумулятора (рисунок 4).



*Рисунок 4 – Зависимость коэффициента динамичности муфты от начального давления в газовой полости гидропневмоаккумулятора при различных расходах гидравлической жидкости*

При малом давлении в газовой полости гидропневмоаккумулятора коэффициент динамичности муфты будет относительно высоким ( $K_d = 2,4$ ), вследствие того, что гидроаккумулятор при передаче номинального момента уже накачан большим количеством жидкости, при этом угол относительного закручивания полумуфт при демпфировании пиковых нагрузок значительно уменьшается. Относительно большое начальное давление также не позволит эффективно демпфировать высокоинтенсивные нагрузки ( $K_d = 2,4$ ), по причине того, что муфта будет работать не как упругодемпфирующая, а как жесткая.

При малом расходе жидкости (при перекрытии гидродресселя от 75% до 95%), коэффициент динамичности муфты также будет относительно высоким. Основной причиной повышенной динамики муфты в этом случае будет являться большое сопротивление гидравлической жидкости. Слишком большой расход жидкости также негативно сказывается на эффективности демпфирования, вследствие того, что гидроаккумулятор слишком быстро заполняется гидравлической жидкостью, что значительно увеличивает жесткость муфты.

Полученная зависимость позволяет подобрать рациональные параметры гидросистемы муфты, при которых коэффициент динамичности минимален в режиме демпфирования импульсных нагрузок. Для муфты с конструктивными параметрами реальной модели экспериментального стенда рациональными являются  $P = 6 \text{ МПа}$ ,  $Q = 0,0005 \text{ м}^3 / \text{сек}$ .

Задав параметры начального давления в гидropневмодемппфере и расхода жидкости в гидромашине, при которых коэффициент динамичности является минимальным, сравнили работу жёсткой и исследуемой муфты в режиме демппфирования импульсных нагрузок. Результаты сравнения показали, что коэффициент динамичности в гидромеханической муфте ниже в 1,9 раза, чем в жёсткой муфте.

Отсюда следует, что в настоящее время существует необходимость внедрения гидромеханических муфт в те сферы производства, где оборудование эксплуатируется в режимах повышенной динамики. Это позволит сократить расход электроэнергии, уменьшить периодичность ремонтов, а также увеличить надёжность работы привода оборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булавин, К.А. Разработка конструкции и расчет параметров гидростатической муфты для привода вращающейся обжиговой печи / К.А. Булавин // Образование, наука, производство и управление в XXI веке: Сб. тр. Международной научной конференции. Т.2. Старый Оскол: Изд-во ООО «ТНТ». – 2004. – С. 33–37.
2. Большаков, В.И. Методика исследования динамики приводов металлургических машин / В.И. Большаков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – М. – 2000. – № 3. – С. 72–78.
3. Кожевников, С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / С.Н. Кожевников. Киев: Наукова думка, 1986. – 277 с.
4. Бородина, М.Б. Динамика работы гидромеханической муфты с управляемым параметром / М.Б. Бородина, К.А. Булавин, Л.А. Савин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 3–2. – С. 44–49.
5. Бородина, М.Б. Использование гидростатических муфт для защиты приводов тяжело нагруженного оборудования / М.Б. Бородина, К.А. Булавин, Б.А. Шевченко // Сталь. – 2006. – № 3. – С. 68–72.
6. Фокин, А.Е. Исследование адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения / А.Е. Фокин, М.Д. Гавриленко, М.П. Шишкарёв // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – № 1. – С. 49–56.
7. Кузнецов, Н.Г. Динамическая нагруженность МТА при разгоне с трактором МТЗ–80Л, оборудованным пневмогидравлической планетарной муфтой сцепления. / Н.Г. Кузнецов, Д.А. Нехорошев, Н.С. Воробьева // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2011. – № 2. – С. 176–183.
8. Бородина, М.Б. Адаптивные гидромеханические устройства мехатронных роторных систем / М.Б. Бородина, Л.А. Савин // Известия Юго–западного государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 151–155.
9. Пат. 2536035 Российская Федерация, МПК F16D 25/06, F16D 3/34, F16D 31/00. Гидромеханическая муфта / М.Б. Бородина, Л.А. Савин, А.Г. Шевченко, Б.А. Шевченко; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – № 2012110183/11; заявл. 19.03.2012; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35. – 10 с.
10. Bacon, Philip H. When clutches beat servos sor Sorque control / Philip H. Bacon // Mach. Des. –1993. – № 6. – р.р. 86–88.
11. Мироненко, С.В. Моделирование динамики работы гидромеханической муфты с планетарным дифференциальным передаточным механизмом / С.В. Мироненко, М.Б. Бородина, Л.А. Савин // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: Сборник научных статей в 2 частях. Ч.1 ЮЗГУ, г. Курск. – 2014. – С. 300–305.
12. Терехин, В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.01): учебное пособие / В.Б. Терехин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Из-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

**Мироненко Станислав Викторович**  
 Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Старый Оскол  
 Аспирант  
 E-mail: mironenko.stanislaw@yandex.ru

**Бородина Марина Борисовна**  
 Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Старый Оскол  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика»  
 E-mail: borodina\_marina@mail.ru

**Савин Леонид Алексеевич**  
 ФГБОУ ВПО «Государственный университет УНПК», г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг»  
 E-mail: savin@ostu.ru

S.V. MIRONENKO, M.B. BORODINA, L.A. SAVIN

## DAMPING OF PULSE LOADINGS THE HYDROMECHANICAL COUPLING WITH THE GEAR DIFFERENTIAL EXECUTIVE MECHANISM

*The description of model of the hydromechanical coupling with the gear differential executive mechanism constructed in the program Matlab Simulink complex is presented in article. The main results of theoretical researches of the coupling are given in the mode of elastic damping of high-intensity loadings, and also the factors influencing operation of the coupling in this mode are defined. Dependences of coefficient of dynamism of the coupling on initial parameters of a hydraulic system are presented.*

**Keywords:** hydromechanical coupling; gear differential executive mechanism; hydraulic system parameters; mathematical model; dynamism coefficient; pulse loading.

### BIBLIOGRAPHY

1. Bulavin, K.A. Razrabotka konstruktssii i raschet parametrov gidrostaticheskoy mufty dlya privoda vrashchayushchey obzhigovoy pechi / K.A. Bulavin // *Obrazovaniye, nauka, proizvodstvo i upravleniye v XXI veke: Sb. tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. T.2. Staryy Oskol: Izd-vo OOO «TNT». – 2004. – S. 33–37.*
2. Bolshakov, V.I. Metodika issledovaniya dinamiki privodov metallurgicheskikh mashin / V.I. Bolshakov // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. – M. – 2000. – № 3. – S. 72–78.*
3. Kozhevnikov, S.N. Dinamika nestatsionarnykh protsessov v mashinakh / S.N. Kozhevnikov. Kiyev: Naukova dumka, 1986. – 277 s.
4. Borodina, M.B. Dinamika raboty gidromekhanicheskoy mufty s upravlyayemym parametrom / M.B. Borodina, K.A. Bulavin, L.A. Savin // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 3–2. – S. 44–49.*
5. Borodina, M.B. Ispolzovaniye gidrostaticheskikh muft dlya zashchity privodov tyazhelo nagruzhennogo oborudovaniya / M.B. Borodina, K.A. Bulavin, B.A. Shevchenko // *Stal. – 2006. – № 3. – S. 68–72.*
6. Fokin, A.Ye. Issledovaniye adaptivnoy friktsionnoy mufty s differentsirovannymi parami treniya / A.Ye. Fokin, M.D. Gavrilenko, M.P. Shishkarev // *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2011. – № 1. – S. 49–56.*
7. Kuznetsov, N.G. Dinamicheskaya nagruzhennost MTA pri razgone s traktorom MTZ–80L, oborudovannym pnevmogidravlicheskoy planetarnoy muftoy stsepleniya. / N.G. Kuznetsov, D.A. Nekhoroshev, N.S. Vorobyeva // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysheye professionalnoye obrazovaniye. – 2011. – № 2. – S. 176–183.*
8. Borodina, M.B. Adaptivnyye gidromekhanicheskiye ustroystva mekhatronnykh rotornykh sistem / M.B. Borodina, L.A. Savin // *Izvestiya Yugo-zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2013. – № 1. – S. 151–155.*
9. Pat. 2536035 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16D 25/06, F16D 3/34, F16D 31/00. Gidromekhanicheskaya mufta / M.B. Borodina, L.A. Savin, A.G. Shevchenko, B.A. Shevchenko; zayavitel i patentoobladatel FGAOU «Natsionalnyy issledovatel'skiy tekhnologicheskii universitet «MISIS». – № 2012110183/11; zayavl. 19.03.2012; opubl. 20.12.2014, Byul. № 35. – 10 s.
10. Bacon, Philip H. When clutches beat servos sor Sorque control / Philip H. Bacon // *Mach. Des. – 1993. – № 6. – p.p. 86–88.*
11. Mironenko, S.V. Modelirovaniye dinamiki raboty gidromekhanicheskoy mufty s planetarnym differentsialnym peredatochnym mekhanizmom / S.V. Mironenko, M.B. Borodina, L.A. Savin // *Vibratsionnyye tekhnologii, mekhatronika i upravlyayemye mashiny: Sbornik nauchnykh statey v 2 chastyakh. CH.1 YUZGU, g. Kursk. – 2014. – S. 300–305.*
12. Terekhin, V.B. Modelirovaniye sistem elektroprivoda v Simulink (Matlab 7.01): uchebnoye posobiye / V.B. Terekhin; Natsionalnyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet. – Tomsk: Iz-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. – 292 s.

**Mironenko Stanislav Viktorovich**  
Stary Oskol technological Institute.  
A.A. Ugarov (branch) of National  
research technological University  
«MISIS», Stary Oskol  
Graduate  
E-mail: mironenko.stanislav@yandex.ru

**Borodina Marina Borisovna**  
Stary Oskol technological Institute.  
A.A. Ugarov (branch) of National  
research technological University  
«MISIS», Stary Oskol  
Candidate of technical Sciences, Pro-  
fessor of «Applied mechanics»  
E-mail: borodina\_marina@mail.ru

**Savin Leonid Alekseevich**  
State University – ESPC, Orel  
Doctor of technical Sciences, Profes-  
sor, head. the Department of mecha-  
tronics and international engineering  
E-mail: savin@ostu.ru

А.В. СЫТИН, В.О. ТЮРИН, С.Д. АНТОНОВ

## АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕХАТРОННЫМ МНОГОЛЕПЕСТКОВЫМ ПОДШИПНИКОМ РОТОРНО–ОПОРНЫХ УЗЛОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТУРБОМАШИН

*В статье рассмотрены мехатронные многолепестковые подшипники, активное управление которыми осуществляется пьезоактуаторами. Представлено возможное конструктивное решение применения пьезоактуаторов в лепестковых подшипниках. Разработана структурно–функциональная схема экспериментальной установки для исследования мехатронных многолепестковых подшипников. Описана автоматическая система управления многолепестковым подшипником. Обоснован выбор ПИ–регулирования для активного управления мехатронным многолепестковым подшипником.*

**Ключевые слова:** мехатронный лепестковый подшипник; активное управление; пьезоактуаторы; ПИ–регулирование; высокоскоростные турбомашины.

Играющие исключительно важную роль во всех областях производства высокоскоростные турбомашины относятся к обширному классу проточных машин, процесс передачи работы у них целиком связан с потоком среды, протекающей через машину. Одним из направлений совершенствования данного типа турбомашин является повышение частот вращения роторов. Применение подшипников качения в условиях высоких скоростей и нагрузок по условиям работы ограничено предельной быстроходностью и малой долговечностью. Возможное решение проблемы заключается в применении подшипников скольжения, смазка которых осуществляется рабочими телами машин, что для проточных турбомашин приводимых в движение или сжимающих и перекачивающих различные газы, позволяет достичь максимальных частот вращения ротора, достигающих сотен тысяч оборотов в минуту. Опоры с газовой смазкой практически не ограничивают частоты вращения роторов, работают с весьма малыми потерями и нагревом, сохраняют точность положения вращающихся деталей [1]. В опорах с газодинамической смазкой при больших частотах вращения и малых нагрузках на опору возможны вибрации, при которых смазочный слой нарушается; это создает опасность соприкосновения шипа с подшипником и усиленного изнашивания опоры. Причиной возникновения вибрации является совпадение центров цилиндрического шипа и подшипника. Для устранения вибрации используют опоры с подшипниками специальной формы, искусственно увеличивают эксцентриситет шипа во время его работы или нагнетают смазочный материал [2]. Конструктивным решением данной проблемы являются подшипники с упругими опорными поверхностями, они обладают податливостью, т.е. свойством, которое конструктор иногда стремится свести к минимуму, а иногда повысить и обратить на пользу. Для лепестковых подшипников с газовой смазкой податливость элементов является необходимым условием работы, причем упругие деформации элементов могут иметь тот же порядок величины, что и толщина смазочной пленки [3,4]. В данных подшипниках происходит гарантированное смещение оси ротора относительно оси подшипника, но главное достоинство лепестковых подшипников заключается в демпфировании колебаний за счет диссипации энергии в деформируемых упругих элементах, а также за счет трения между ними. В конструкции многолепесткового газодинамического подшипника (МЛГДП) передача усилия от одной криволинейной поверхности (поверхность ротора) к другой (опорная поверхность подшипника) происходит через промежуточный смазочный слой, причем одна поверхность перемещается относительно другой [13]. Газодинамические давления действуют на упругие трущиеся поверхности и вызывают их деформации. Величины деформаций, определяются величинами и распределением давлений по поверхности, т.е. эпюрой давлений [11].

Все известные конструкции лепестковых газодинамических подшипников являются адаптивными опорами за счет податливости упругой поверхности и компоновки внахлест лепестков или применения дополнительных упругих элементов [5]. Однако существует проблема, связанная с возникновением ситуаций непредусмотренных в процессе проектирования, что приводит к нарушениям работы роторно–опорного узла и турбомашины в целом [14]. Решением данной проблемы является введение активного управления в роторно–опорные узлы. Прогрессивным направлением развития науки и техники в сфере управляемых опор роторов является применение мехатронных подшипников, в которых происходит

анализ и управление движением ротора на базе компьютерной и микропроцессорной техники. В результате внедрения мехатронных подшипников опоры роторов наделяются функциями регистрации и анализа параметров движения, а также повышается точность позиционирования и надежность всей конструкции. Качественно новые свойства мехатронных опор достигаются синергетической интеграцией составляющих элементов. В данном случае синергетическая интеграция – это не просто соединение отдельных частей в систему, а построение единого узла через конструктивное объединение и даже взаимопроникновение элементов, которые имеют, как правило, различную физическую природу, при этом происходит усиление отдельных свойств, таких как устойчивость движения ротора, надежность конструкции, а также возникновение новых свойств объекта – регистрация параметров движения и управление жесткостью опоры. Кроме того активное управление увеличивает срок службы, надежность и контроль за происходящими в роторно–опорных узлах процессами, позволяет расширить области применения многолепестковых газодинамических подшипников, в опорах роторов турбодетандеров, турбокомпрессоров, высокоскоростных бесконтактных электродвигателей, турбогенераторов и др.

Существует два основных способа реализации активного управления [12]:

- 1) использование упругих элементов с эффектом памяти формы, меняющих свою форму под действием подводимого к опоре электрического тока;
- 2) использование под основными упругими элементами специальных устройств контроля и управления.

В свете последних достижений в области пьезомеханики наиболее актуальным является использование в качестве специальных устройств пьезоэлектрических актуаторов, анализ конструкций и типов которых показал, что наиболее рациональными для данной задачи являются пакетные пьезоактуаторы с элементами в форме кольца, как широко используемые и способные осуществлять перемещения 1...50 мкм при усилении 100...1000 Н.

Предлагаемый авторами многолепестковый газодинамический подшипник с активным управлением [15] представляет собой опору скольжения (рисунок 1) и состоит из корпуса 1, выполненного в виде втулки с радиальными отверстиями 2, в которые вкручены пьезоактуаторы 3, состоящие из гайки 4 с отверстиями 5 для проводов, в которую вставлены пьезоэлементы 6 и штифты 7.

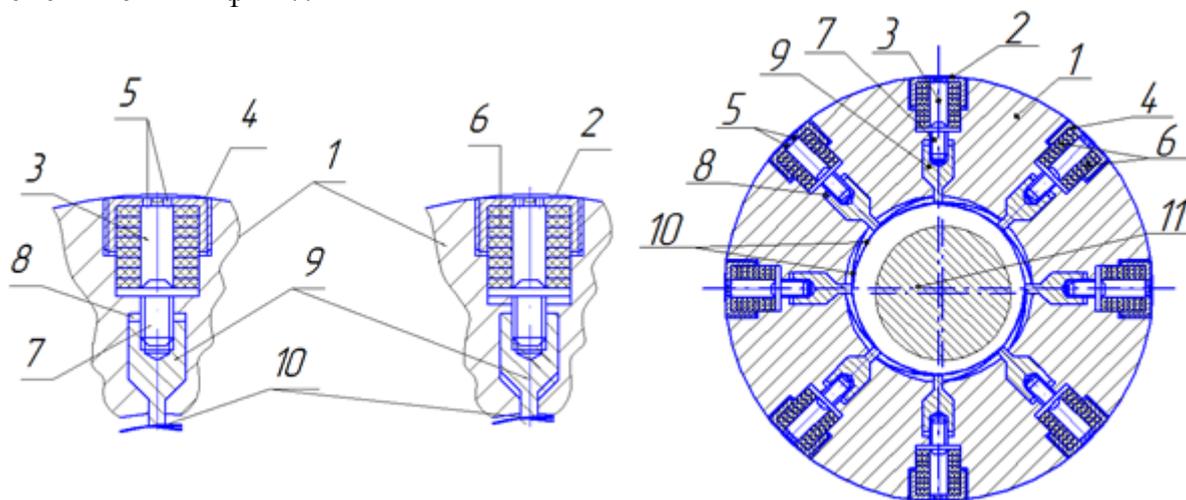


Рисунок 1 – Мехатронный многолепестковый подшипник

Втулка имеет продольные пазы 8, в которые вставлены подвижные элементы 9, являющийся в тоже время опорами тонких лепестков 10, охватывающий вал 11. При отсутствии электрического напряжения на проводах пьезоактуаторов и в сети, пьезоэлементы не увеличиваются в размерах, подвижные элементы занимают крайнее нижнее положение и не участвуют в работе подшипника, который функционирует как лепестковый газодинамический подшипник. Во время работы подвижные элементы воспринимают нагрузки, действующие на лепестки со стороны вала, и передают их через штифты на пьезоэлементы, которые под действием нагрузки выдают ток в сеть. Прогибы каждого отдельного лепестка прямо пропорциональны изменению величины силы тока в цепи, что позволяет регистрировать прогибы, а путем увеличения подводимого тока воздействовать на жесткость лепестков и всего подшипника в целом.

Для исследования многолепестковых газодинамических подшипников с активным управлением разрабатывается экспериментальная установка, структурно–функциональная схема которой, представлена на рисунке 2. Система функционирует следующим образом. ЭВМ со встроенными АЦП/ЦАП задает частоту вращения электродвигателя через модуль согласования сигналов и частотный преобразователь. Электродвигатель передает вращающееся движение на вал и при помощи обратной связи, представленной в виде датчиков частоты вращения, за вращением вала ведется непрерывный контроль с ЭВМ. Вращаясь, вал действует на газовый слой, который в свою очередь действует на лепестки, жестко связанные с пьезоактуатором. В случае изменения состояния вала сигнал поступает на модуль согласования пьезоэлементов, после этого на ЭВМ со встроенными АЦП/ЦАП, где обрабатывается. С помощью программы управления реакция на сигнал через модуль согласования пьезоэлементов передается на пьезоактуаторы, а затем на лепесток, изменяя состояние вала.

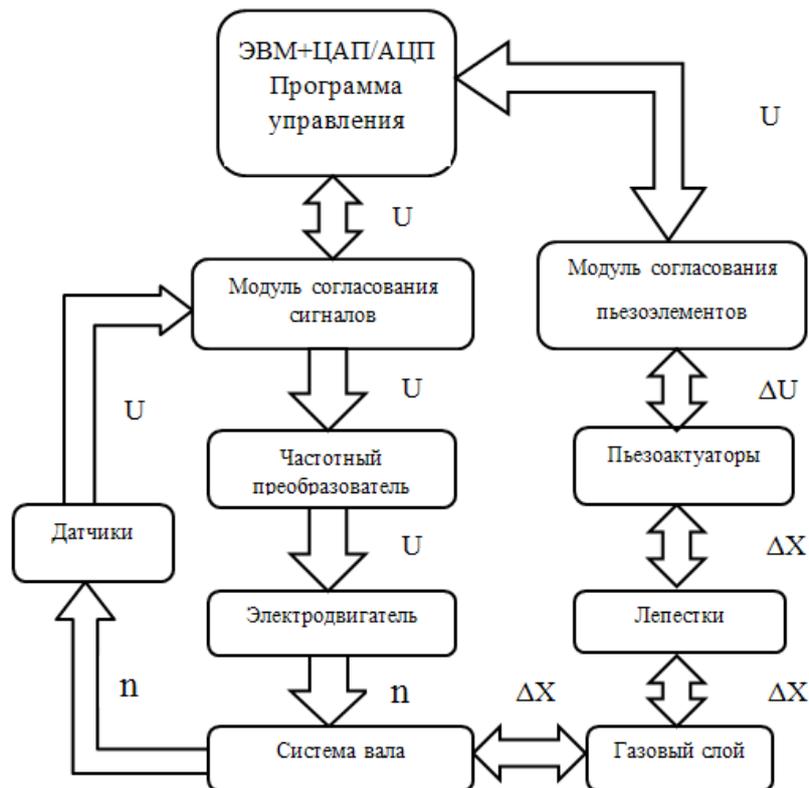


Рисунок 2 – Структурно–функциональная схема установки

На рисунке 3 изображен график зависимости удлинения пьезоактуатора  $L$ , и динамических сил ротора  $F_d$  от частоты вращения вала  $n$ . На участке АВ удлинение пьезоактуатора максимально, так как сила, действующая со стороны ротора,  $F_d$  меньше чем генерируемая сила пьезоактуатора  $F_b$ . В этом случае система управления не будет получать отклика, а следовательно не будет реагировать. Поэтому необходимо оперировать удлинением меньшим, чем максимальное –  $L_{\text{раб}}$ . На участке АВ аналогично участку АВ  $F_b > F_d$ , но граничное условие ( $F_b = F_d$ ) достигается раньше (при более низкой частоте), точки В и В. На участке ВС сила  $F_d$  больше чем сила  $F_b$  это приводит к уменьшению величины удлинения  $L$ , в цепи возникает разность между подаваемым напряжением  $U_{\text{ax}}$  и напряжением, возникающим от деформации пьезоактуатора  $U_{\text{вых}}$ . Однако система управления, варьируя подаваемым напряжением, удерживает систему в равновесном состоянии, силы  $F_d$  и  $F_b$  скомпенсированы. Последующее увеличение частоты вращения ротора приведет к уменьшению удлинения пьезоактуатора, участки СЕ и ВЕ, а затем и к достижению минимального порогового значения, участок ЕФ [8].

Исходя из конструктивных особенностей система способна продолжать работу не только в установившемся режиме, но и с последующим увеличением частоты вращения. В последнем случае многолепестковый газодинамический подшипник продолжает работу как обычная опора скольжения. Для того, чтобы система на участке ВС работала в установившемся режиме, необходимо верно подобрать закон регулирования. Для этого необходимо

оценить следующие параметры регулирования: статическая ошибка, влияние внешних возмущений и время переходного процесса.

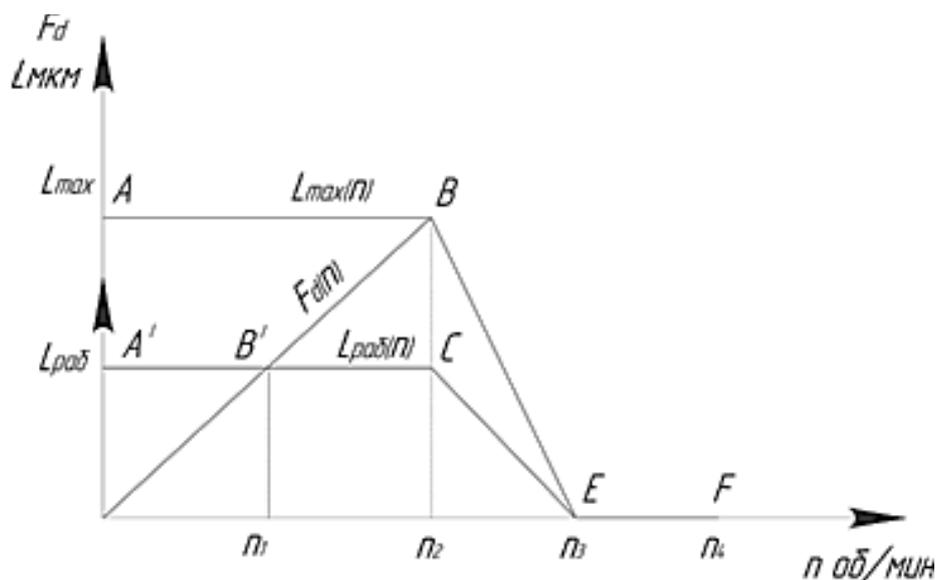


Рисунок 3 – График режимов работы

На рисунке 4 представлены критерии выбора закона регулирования.

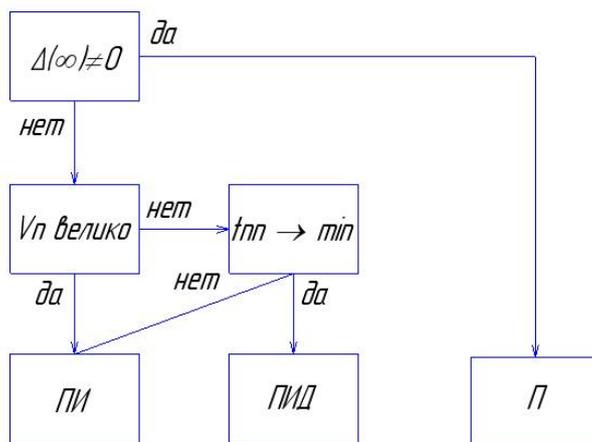


Рисунок 4 – Схема выбора закона регулирования

В первую очередь, необходимо оценить, важно ли нам получить в результате переходного процесса статическую ошибку  $\Delta(\infty)$ , равную нулю. Так как все процессы в системе происходят на микро уровне, то малейшее отклонения могут привести к нарушению работы, как опорного узла в частности, так и всей установки в целом. Следовательно, чем ближе статическая ошибка к нулевому значению, тем меньше возможность возникновения отклонений. Далее необходимо оценить влияние внешних возмущений  $V_n$  на объект управления. Объектом управления в данном случае является пьезоактуатор с прикрепленным к нему лепестком. Объект управления изолирован от внешней среды жестким корпусом подшипника и корпусом опорного узла. И при работе в нормальных условиях влияние внешних воздействий можно считать незначительными, но так как вращение вала вызывает возникновение сил действующих на систему, влияние которых оказывает значительное воздействие на систему управления, поэтому данных возмущения являются ключевыми.

Установка работает в динамическом режиме в зонах высоких частот вращения. Исходя из этого, очевидно, что время переходного процесса  $t_{nn}$  играет важную роль [9].

Основываясь на выше изложенном и на схеме рисунок 16 можно сделать вывод, что наиболее подходящим является ПИ–регулирование. Назначение ПИ–регулятора – в поддержании заданного значения  $L_{раб.}$  величины  $L$  с помощью изменения величины  $U_{ex.}$

Автоматическая система управления многолепестковым газодинамическим подшипником состоит из четырех основных элементов: ПИ–регулятор, устройство усиления, объект управления и обратной связи. Особенностью данной системы является то, что объектом управления и датчиком обратной связи является один и тот же элемент. Этим элементом является бескорпусный многослойный пьезоактуатор. Это возможно за счет уникальных биморфных свойств пьезокерамики. Схема системы управления представлена на рисунке 5. Основными параметрами, которыми характеризуется данная система, являются: функция зависимости текущего удлинения пьезоактуатора от подаваемого напряжения и динамических сил ротора (4), функция ошибки регулирования (7) и закон ПИ–регулирования (9) [10].

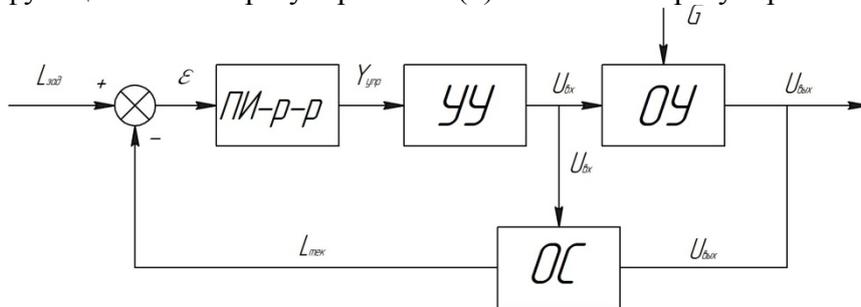


Рисунок 5 – Схема системы управления

Текущее удлинения пьезоактуатора будет получаться из разницы заданного удлинения и изменения удлинения от действия превосходящих динамических сил ротора (1).

где  $L_{\text{текущее}}$  – текущее удлинение;  
 $L_{\text{зад}}$  – первоначальное заданное значение удлинения;  
 $L_{\text{изм}}$  – значение изменения удлинения от действия динамических сил ротора.  
 Удлинения  $L_{\text{текущее}}$  и  $L_{\text{изм}}$  можно представить следующим образом:

где  $U_{\text{вх}}$  – напряжение подаваемое на актюатор;  
 $K_{\text{п}}$  – пьезомодуль в осевом направлении;  
 $n$  – количество активных слоев в одном актюаторе.

где  $K_{\text{Е}}$  – жесткость актюатора;  
 $F_{\text{д}}$  – динамическая сила ротора.

С учетом выражений (2) и (3) функция зависимости текущего удлинения пьезоактуатора от подаваемого напряжения и динамических сил ротора имеет вид:

На схеме (рисунок 5) видно, что ошибка регулирования – есть разность между заданным значением удлинения и текущем значением удлинения (5).

В результате математических преобразований функция ошибки регулирования имеет следующий вид:

Закон ПИ–регулирования в общем виде представлен выражением (8).

где  $U(t)$  – выходной сигнал;  
 $P$  – пропорциональная часть;  
 $I$  – интегральная часть;  
 $K$  – коэффициент пропорциональности;  
 $T_{\text{и}}$  – постоянная интегрирования.  
 $\varepsilon(t)$  – сигнал рассогласования, разница между сигналом обратной связи и заданием (ошибка регулирования).

Применительно к нашей системе с учетом выражения (7) закон ПИ–регулирования имеет вид:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (9)$$

Сведя основные выражения (4), (7), (9), характеризующие данную САУ в систему (10), мы получим математическую модель, которая наиболее удачно описывает систему управления МГП [6,7].

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (10)$$

Лепестковые газодинамические подшипники с активным управлением, наряду с созданием требуемой несущей способности, могут выполнять функции вибрационной диагностики путем снятия сигнала о реальном перемещении ротора в радиальном и осевом направлениях, а также способны управлять движением по заданной программе. Закономерность развития техники заключается в постепенном отказе от механических конструкций и замене их адаптивными управляемыми системами с постоянным ростом уровня управляемости. Рассматриваемая конструкция многолепесткового газодинамического подшипника является представителем нового класса устройств с активным управлением.

*Статья подготовлена в рамках выполнения проекта № 9.101.2014/К проектной части государственного задания в сфере научной деятельности «Гидродинамические эффекты в напорно-сдвиговых течениях сред сложной реологии в каналах переменной геометрии» (2014 – 2016 г.г.).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сытин, А.В. Решение комплексной задачи расчета характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Сытин. – Орел, 2008. – 200 с.
2. Гаевик, Д.Т. Подшипниковые опоры современных машин / Д.Т. Гаевик. – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
3. Леонов, В.П. Лепестковые газовые подшипники турбомашин: Метод. пособие по курсу «Турбомшины низкотемпературной техники» / В.П. Леонов, Т.И. Максимович. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 60 с.
4. Пешти, Ю.В. Газовая смазка: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / Ю. В. Пешти. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – 380 с.
5. Хешмет, Х. Анализ газового ленточного радиального подшипника / Х. Хешмет, Дж. А. Уоловит, О. Пинкус // Проблемы трения и смазки. – 1983. – № 4. – С. 124–132.
6. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: Учебное пособие / А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров, В.В. Григорьев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 131 с.
7. Джагунов, Р.Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник / Р.Г. Джагунов, А.А. Ерофеев. – СПб.: Политехника, 1994. – 608 с.
8. Шандров, Б.В. Технические средства автоматизации: Учебник для вузов / Б.В. Шандров, А.Д. Чудиков. – М.: Академия, 2007. – 646 с.
9. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / В.Я. Ротач. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
10. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; перевод с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
11. Самсонов, А.И. Научные основы проектирования подшипников с газовой смазкой для судовых турбомашин: дис. ... д-ра техн. наук / А.И. Самсонов. – Владивосток, 1997. – 273 с.
12. Сытин, А.В. Активное управление движением ротора в лепестковых газодинамических подшипниках / А.В. Сытин, В.О. Тюрин, А.С. Галичев // Теория и практика системного анализа: сборник трудов Всероссийской молодежной конференции, 1–3 октября 2012 г. – Белгород: ИД «Белгород», 2012. – С. 167–168.
13. Сытин, А.В. Применение мехатронных технологий в лепестковых газодинамических подшипниках / А.В. Сытин, В.О. Тюрин // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. Ч. 2 / редкол.: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2014. – С. 300–304.
14. Савин, Л.А. Особенности динамического анализа роторов в лепестковых подшипниках с гофрированными элементами / Л.А. Савин, А.В. Сытин, В.О. Тюрин // Динамика и виброакустика машин: сборник докладов второй международной научно-технической конференции 15–17 сентября 2014 г.: в 2 т. Т. 1. – Самара: СГАУ, 2014. – С. 197–203.
15. Заявка на пат. 2014144656 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 16 C 17/12. Многолепестковый газодинамический подшипник с активным управлением / Л.А. Савин, А.В. Сытин, В.О. Тюрин, С.Д. Антонов; заявл. 05.11.14. – 2 с.

**Сытин Антон Валерьевич**  
 ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
 Тел.: 89192046050  
 E-mail: sytin@mail.ru

**Тюрин Валентин Олегович**  
 ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел  
 Аспирант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
 Тел.: 89030294778  
 E-mail: v7a7l@mail.ru

**Антонов Сергей Дмитриевич**  
 ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел  
 Студент кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
 Тел.: 89536288935  
 E-mail: 11mh@mail.ru

A.V. SYTIN, V.O. TYURIN, S.D. ANTONOV

## ACTIVE CONTROL OF THE MECHATRONIC MULTIFOIL BEARING IN HIGH-SPEED TURBOMACHINERY

*The paper considers the mechatronic multifoil bearing which are controlled using piezoactuators. A possible design solution of piezoactuators application is presented. A structural and functional scheme was developed for the test rig for the mechatronic multifoil bearing research. A choice of PI-control is justified to actively control the mechatronic multifoil bearing.*

**Keywords:** mechatronic multifoil bearing; active control; piezoactuators; PI-control; high-speed turbomachinery.

### BIBLIOGRAPHY

1. Sytin, A.V. Resheniye kompleksnoy zadachi rascheta kharakteristik radialnykh lepestkovykh gazodinamicheskikh podshipnikov: dis. ... kand. tekhn. nauk / A.V. Sytin. – Orel, 2008. – 200 s.
2. Gayevik, D.T. Podshipnikovyye opory sovremennykh mashin / D.T. Gayevik. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 248 s.
3. Leonov, V.P. Lepestkovyye gazovyye podshipniki turbomashin: Metod. posobiye po kursu «Turbomashiny nizkotemperaturnoy tekhniki» / V.P. Leonov, T.I. Maksimovich. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2002. – 60 s.
4. Peshti, Yu.V. Gazovaya smazka: Uchebnik dlya mashinostroitelnykh spetsialnostey vuzov / Yu. V. Peshti. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1993. – 380 s.
5. Khesmet, Kh. Analiz gazovogo lentochnogo radialnogo podshipnika / Kh. Khesmet, Dzh. A. Uolovit, O. Pinkus // Problemy treniya i smazki. – 1983. – № 4. – S. 124–132.
6. Ispolnitelnyye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy: Uchebnoye posobiye / A.A. Bobtsov, V.I. Boykov, S.V. Bystrov, V.V. Grigoryev. – SPb.: SPbGU ITMO, 2011. – 131 s.
7. Dzhagupov, R.G. P'yezoelektronnyye ustroystva vychislitel'noy tekhniki, sistem kontrolya i upravleniya: Spravochnik / R.G. Dzhagupov, A.A. Yerofeev. – SPb.: Politehnika, 1994. – 608 s.
8. Shandrov, B.V. Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii: Uchebnik dlya vuzov / B.V. Shandrov, A.D. Chudakov. – M.: Akademiya, 2007. – 646 s.
9. Rotach, V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik dlya vuzov / V.Ya. Rotach. – 2-ye izd., pererab. i dop. – M.: Izd-vo MEI, 2004. – 400 s.
10. Dorf, R. Sovremennyye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop; perevod s angl. B. I. Kopylova. – M.: Laboratoriya bazovykh znaniy, 2002. – 832 s.
11. Samsonov, A.I. Nauchnyye osnovy proyektirovaniya podshipnikov s gazovoy smazkoy dlya sudovykh turbomashin: dis. ... d-ra tekhn. nauk / A.I. Samsonov. – Vladivostok, 1997. – 273 s.
12. Sytin, A.V. Aktivnoye upravleniye dvizheniyem rotora v lepestkovykh gazodinamicheskikh podshipnikakh / A.V. Sytin, V.O. Tyurin, A.S. Galichev // Teoriya i praktika sistemnogo analiza: sbornik trudov Vserossiyskoy molodezhnoy konferentsii, 1–3 oktyabrya 2012 g. – Belgorod: ID «Belgorod», 2012. – S. 167–168.
13. Sytin, A.V. Primeneniye mekhatronnykh tekhnologiy v lepestkovykh gazodinamicheskikh podshipnikakh / A.V. Sytin, V.O. Tyurin // Vibratsionnyye tekhnologii, mekhatronika i upravlyayemye mashiny: sb. nauch. st.: v 2 ch. CH. 2 / redkol.: S.F. Yatsun (otv. red.) [i dr.]. – Kursk: Yugo-Zap. gos. un-t., 2014. – S. 300–304.
14. Savin, L.A. Osobennosti dinamicheskogo analiza rotorov v lepestkovykh podshipnikakh s gofrirovannymi elementami / L.A. Savin, A.V. Sytin, V.O. Tyurin // Dinamika i vibroakustika mashin: sbornik dokladov vtoroy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii 15–17 sentyabrya 2014 g.: v 2 t. T. 1. – Samara: SGAU, 2014. – S. 197–203.
15. Zayavka na pat. 2014144656 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 F 16 C 17/12. Mnogolepestkovyy gazodinamicheskyy podshipnik s aktivnym upravleniyem / L.A. Savin, A.V. Sytin, V.O. Tyurin, S.D. Antonov; zayavl. 05.11.14. – 2 s.

**Sytin Anton Valerievich**  
 State University – ESPC, Oryol  
 PhD, docent with dept. Mechatronics and International Engineering  
 Ph.: 89192046050  
 E-mail: sytin@mail.ru

**Tyurin Valentin Olegovich**  
 State University – ESPC, Oryol  
 Post-graduate with dept. Mechatronics and International Engineering  
 Ph.: 89030294778  
 E-mail: v7a7l@mail.ru

**Antonov Sergey Dmitrievich**  
 State University – ESPC, Oryol  
 Student with dept. Mechatronics and International Engineering  
 Ph.: 89536288935  
 E-mail: 11mh@mail.ru

А.Г. ШАГОЙКА, К.В. КРАВЧЕНКО, А.В. ТИХОНЕНКО, Н.М. ЧЕКАН, Е.В. ОВЧИННИКОВ

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Исследованы структура и свойства тонкопленочных покрытий, сформированных на металлических подложках. Показано, что нанесение покрытий на базе нитрида циркония изменяет адсорбционную активность поверхностных слоев металлических подложек. Установлено, что формирование композиционных покрытий приводит к снижению коэффициента трения пары «ZrN+ФСО–ШХ15», в том числе и при воздействии СВЧ-излучения.*

**Ключевые слова:** покрытие, излучение, морфология, структура, свойства.

Современными тенденциями повышения износостойкости деталей автотракторной техники является использование антифрикционных покрытий, формируемых разными методами. Создание данных покрытий возможно различными методами и из различного агрегатного состояния вещества. Однако, при повышении износостойкости деталей машин и механизмов наибольшее предпочтение отдают вакуумным технологиям формирования антифрикционных, антиадгезионных покрытий [1–2]. Преимущество формирования плазмохимических покрытий заключается в высокой производительности процесса, возможности получения покрытий в чистых условиях, и, как следствие этого, высокое качество.

Покрытия, формируемые плазмохимическим методом, возможно получать практически из любых материалов, в том числе сплавов, при этом комбинируя технологию формирования многослойных и композиционных покрытий в едином технологическом цикле. Данный способ получения защитных и антифрикционных слоев на поверхности твердых тел характеризует высокая воспроизводимость структуры и свойств формируемых пленок. Плазмохимические технологии формирования покрытий являются экологически чистыми.

Для уменьшения количества посторонних примесей в структуре плазмохимических покрытий предложен способ снижения времени формирования слоя заданной толщины. Данный технологический подход позволяет инициировать новые плазмохимические реакции, в том числе неравновесные, возможность использования пучков заряженных частиц любого сечения [3–4]. Применение технологического приема, заключающегося в размещении в рабочей камере твердотельной мишени из распыляемого материала и подложки для нанесения пленки, при облучении мишени под углом к нормали мощным импульсным пучком позволяет получать тонкие пленки с большой импульсной скоростью роста (до 1 см/с) и сохранить стехиометрический состав распыляемой мишени. Данный метод характеризуется низкой пористостью, дефектностью и малым количеством загрязнений за счет высокой импульсной скорости роста [3–4]. Технологические особенности формирования покрытий оказывают непосредственное влияние на процесс формирования покрытия.

В настоящее время особый интерес представляют композиционные тонкопленочные покрытия различного функционального назначения, среди которых перспективное применение в различных отраслях промышленности имеют покрытия на основе фторсодержащих полимеров и олигомеров. Такие покрытия, толщина которых не превышает 5 мкм, удается получать с помощью основных технологических методик: плазмохимической из активной газовой фазы, ротационной и растворной, благодаря разработке растворимых фракций фторсодержащих олигомеров [5–8]. Несмотря на различие технологий формирования фторсодержащих покрытий (ФСП), отличающихся составом, структурой и геометрическими параметрами, существуют общие закономерности проявления механизма их антифрикционного и противозносного действия, обусловленные спецификой молекулярного и надмолекулярного строения. Низкий уровень межмолекулярного взаимодействия во фторсодержащих полимерных и олигомерных компонентах способствует низким значениям тангенциального сдвига поверхностных слоев в изделиях из композиционных материалов или в покрытиях на поверхностях трения контакта. Одновременно эта характерная особенность строения

фторсодержащих соединений обуславливает повышенный износ изделий из-за низкой способности продуктов фрикционного диспергирования к адгезионному закреплению на поверхностях трения и формированию устойчивой разделительной пленки [9–12].

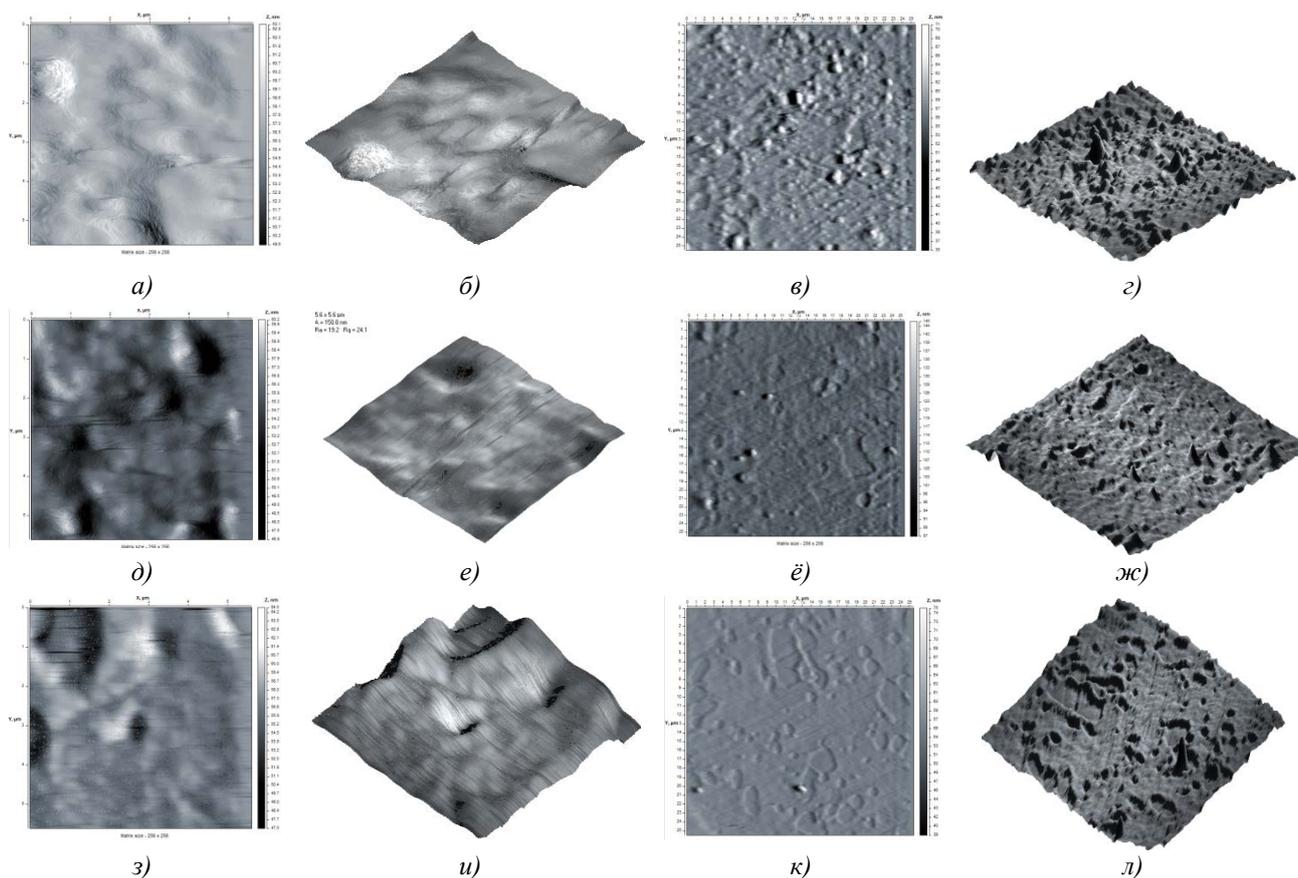
Особый интерес вызывают покрытия, сформированные по растворной технологии, не требующей специального дорогостоящего оборудования. Данные покрытия обладают комплексом уникальных эксплуатационных характеристик, т. к. молекулы олигомеров сочетают в себе высокую химическую стойкость (связи C–F), активность (химически активные концевые функциональные группы), гибкость и подвижность (наличие в структуре молекулярной цепи эфирных связей и сравнительно невысокая молекулярная масса макромолекулы). Традиционным подходом получения тонкопленочных покрытий является обработка твердой подложки в 1% – 2% растворе в хладоне–137 фторсодержащих олигомеров (ФСО), имеющих общую структурную формулу  $R_f-R_n$  ( $R_f$ –фторсодержащий радикал,  $R_n$  – концевая группа). Распространенным технологическим подходом получения покрытий является ротационная технология, позволяющая формировать слои наносимого материала различной толщины из твердой фазы. Для повышения параметров триботехнических характеристик фторсодержащие полимерные и олигомерные матрицы подвергают энергетическим воздействиям с помощью различного типа электромагнитных излучений: лазерных, ионизирующих, тепловых и др. источников [9–14]. Применение различных видов активационных факторов позволяют управлять параметрами структурных характеристик, которые определяют параметры деформационно–прочностных, триботехнических, адгезионных, теплофизических и др. служебных характеристик тонкослойных фторсодержащих покрытий.

Целью данной работы является исследование процесса структурообразования, происходящего в композиционных многослойных покрытиях при различных видах технологического воздействия.

В качестве объектов исследований были выбраны плазмохимические покрытия ZrN толщиной до 3 мкм. Для придания повышенных физико–механических характеристик композиционное покрытие подвергали воздействию СВЧ–излучения с длиной волны 12,25 см. Время воздействия варьировали от 10 с до 40 с. В качестве антифрикционных разделительных слоев применяли фторсодержащие соединения, формируемые по растворной технологии на поверхности покрытий ZrN. Толщина формируемых фторсодержащих соединений на поверхности твердой подложки составляла не более 1,5 – 2 мкм. Для исследований структуры покрытий на базе ZrN применяли методы рентгеноструктурного анализа, ИК–спектроскопии НПВО; растровых, оптической и атомно–силовой микроскопии. Поверхностную активность покрытий изучали с помощью прямотеневого метода по величине изменения краевого угла смачивания. Для определения поверхностной энергии покрытий использовали полярные и неполярные жидкости. Триботехнические испытания проводили по схеме «сфера–плоскость» при нагрузке от 20 Н до 70 Н и скорости скольжения  $v=0,1$  м/с. Микротвердость модифицированных покрытий ZrN определяли на микротвердометре ПМТ–3 при нагрузке 150 г.

Согласно, данным атомно–силовой микроскопии исходная поверхность покрытия ZrN (рисунок 1 и 2) характеризуется развитым рельефом. Наблюдается наличие глобулярных объёмов характерным размером порядка 2 мкм, а так же большого количества мелкодисперсных объёмов латеральным размером до 1 мкм.

Наличие развитой поверхности позволяет предположить высокую активность поверхностных слоев покрытий ZrN. Формирование покрытий на базе фторсодержащих соединений приводит к сглаживанию исходного рельефа (рисунок 1). Наблюдается уменьшение количества крупных глобулярных объектов и уменьшение значений их латеральных размеров до 1,5 мкм для фторсодержащих соединений марки Ф1 и до 0,9 мкм для марки Ф2. Сглаживание исходного рельефа покрытий ZrN фторсодержащими соединениями должно приводить к уменьшению активности поверхностных слоев формируемых плазмохимических покрытий и как следствие данные покрытия должны характеризоваться низкими значениями коэффициента трения и высокой износостойкостью в сравнении с исходным покрытием на базе ZrN.



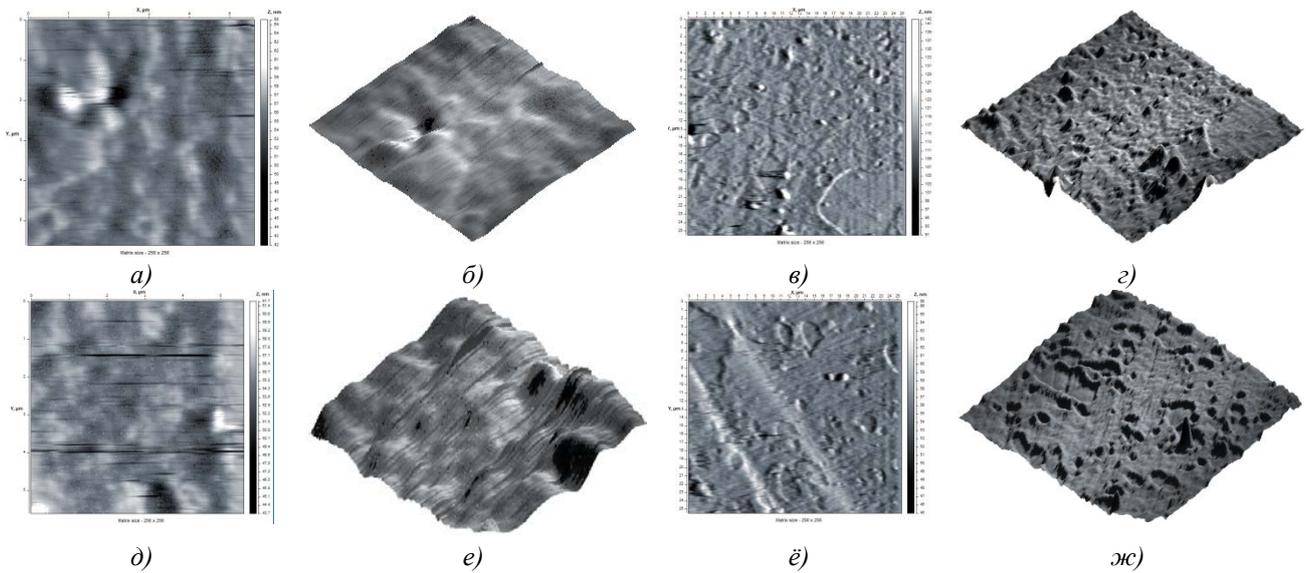
**Рисунок 1 – Морфология поверхностных слоев покрытий ZrN, модифицированных фторсодержащими соединениями:**

*а–г – исходное покрытие ZrN; д–ж – композиционное покрытие на базе ZrN, модифицированное фторсодержащим олигомером Ф1 (~1,5 мкм); з–л – композиционное покрытие на базе ZrN, модифицированное фторсодержащим олигомером Ф2 (1,5 мкм); а, б, д, е, з, и – сканирование 5x5 мкм; в, г, е, ж, к, л – сканирование 25x25 мкм; а, в, д, е, з, к – 2D-изображение; б, е, и, г, ж, л – 3D-изображение*

В морфологии покрытий ZrN, подвергнутых воздействию СВЧ-излучению, также наблюдаются существенные изменения. Воздействие СВЧ излучения на композиционные покрытия на базе ZrN и фторсодержащих соединений приводит к частичной деструкции фторсодержащих соединений с поверхности покрытия ZrN. Образуются локальные области размером  $6 \times 11$  мкм, где отсутствует покрытие ФСО. Данный эффект характерен для покрытий, сформированных из фторсодержащих соединений марок Ф1 и Ф2.

В общем случае СВЧ-излучение приводит к увеличению развитости рельефа и увеличению значений Ra, Rq что может косвенно свидетельствовать об увеличении активности поверхностного слоев композиционных покрытий (рисунок 2). Формирование данной морфологии для композиционных покрытий, подвергнутых воздействию СВЧ-излучения должно в общем случае приводить к увеличению значений коэффициента трения и уменьшению износостойкости в сравнении с покрытиями на базе ZrN, модифицированного фторсодержащими соединениями. В случае применения покрытий, имеющих «пятнистую» дефектную структуру положительный эффект будет наблюдаться в случае триботехнического контакта, сопровождающимся подводом внешней смазки. Наличие границ раздела «пленка ФСО» – покрытие ZrN будет служить барьером для удержания смазочного материала в зоне контакта, т.к. поверхность покрытия ZrN смачивается смазочным материалом в лучшей степени, чем покрытие на базе фторсодержащих соединений.

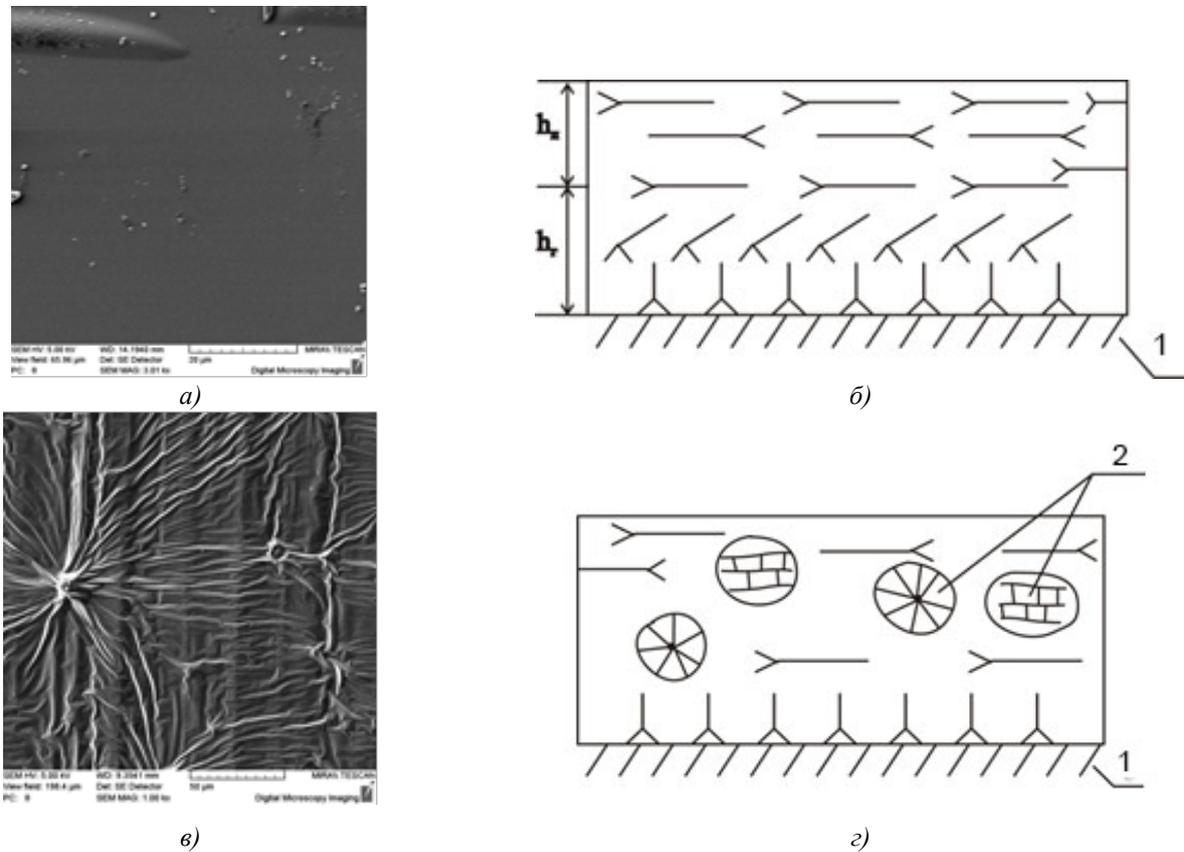
ИК-спектр НПВО соединения ZrN характеризуется наличием интенсивных полос поглощения в следующих областях спектра: 1108, 1178, 1263, 1467, 1665, 1744, 1994  $\text{см}^{-1}$ . Проведение обработки СВЧ-излучения свыше 30 с приводит к изменению расположения полос поглощения в спектре: 985, 1150, 1257, 1311, 1569, 1652, 1676  $\text{см}^{-1}$ . Согласно литературных данных [14] полосы в области 1610–1680  $\text{см}^{-1}$  можно отнести к O–O–N=O, 1500–1600  $\text{см}^{-1}$  к C–N=O, 1430–1800  $\text{см}^{-1}$  к N–N=O, 1200–1300  $\text{см}^{-1}$  к –N–NO<sub>2</sub>, полоса поглощения 1744  $\text{см}^{-1}$  к R–N=O.



**Рисунок 2 – Морфология поверхностных слоев композиционных покрытий ZrN, модифицированных СВЧ-излучением:**

*а – г – покрытие ZrN; д – ж композиционное покрытие на базе ZrN+Φ1, модифицированное СВЧ-излучением в течение 40 с; а, б, д, е – сканирование 5x5 мкм; в, г, ё, ж – сканирование 25x25 мкм; а, в, д, ё – 2D-изображение; б, е, г, ж – 3D-изображение*

Структурирующее энергетическое воздействие на пленку (например, СВЧ-излучение) обуславливает формирование в объеме армирующих фаз, образованных вследствие процессов структурирования макромолекул по механизму радикальных превращений [11–14]. Структура наночастиц пленки в этом случае включает надмолекулярные и структурированные фазы 2, армирующие покрытие и повышающие его износостойкость (рисунок 3 в, г).



**Рисунок 3 – Морфология (а, в) и схема строения (б, г) из фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» на подложке (1) из стали 45 исходных (а, б), обработанных СВЧ-излучением (в, г)**

Проведенные исследования по изучению триботехнических характеристики тонкослойных фторсодержащих покрытий показали, что в зависимости от молекулярной, надмолекулярной и фазовой структуры и состава покрытия на основе фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» или их аналогов «Эпилам» обладают различными показателями служебных характеристик и выполняют функцию ингибитора изнашивания в трибосистемах различного конструктивного исполнения. Варьируя технологические режимы обработки СВЧ-излучением фторсодержащих покрытий возможно реализация различных уровней структурирования: молекулярного; надмолекулярного; фазового; межслойного, что и определяет эксплуатационные параметры, предъявляемые трибосистеме.

Согласно полученных данных по определению микротвердости композиционных покрытий, формирование фторсодержащих слоев на поверхности подложки ZrN приводит к увеличению значений микротвердости (таблица 1).

Данный эффект обусловлен формированием хемосорбционных слоев между фторорганическими соединениями и ZrN. Воздействие СВЧ-излучения обуславливает снижение значений микротвердости поверхностных слоев исходного и композиционного покрытия. Композиционные покрытия на начальных временах воздействия СВЧ-излучения в меньшей степени уменьшают прочностные характеристики, чем покрытие ZrN.

С увеличением времени энергетического воздействия происходит деструкция фторорганических соединений с поверхности ZrN, а также возможно образование активных радикальных продуктов, которые вступая во взаимодействие с интерметаллическим покрытием будут способствовать дальнейшему уменьшению значений микротвердости композиционных покрытий.

Таблица 1 – Микротвердость покрытий ZrN, модифицированных фторсодержащими соединениями подвергнутых воздействию СВЧ-излучения.

Тип покрытия	Время воздействия СВЧ-излучения			
	0 с	10 с	20 с	40 с
ZrN, ГПа	8,0	6,68	8,58	8,39
ZrN+5 слоев Ф1, ГПа	9,85	9,5	5,07	7,78
ZrN+ 5слоев Ф2, ГПа	9,82	8,7	7,31	6,04

Формирование композиционных покрытий приводит к снижению коэффициента трения пары «ZrN+ФСО–ШХ15», в том числе и при воздействии СВЧ-излучения (рисунок 4).

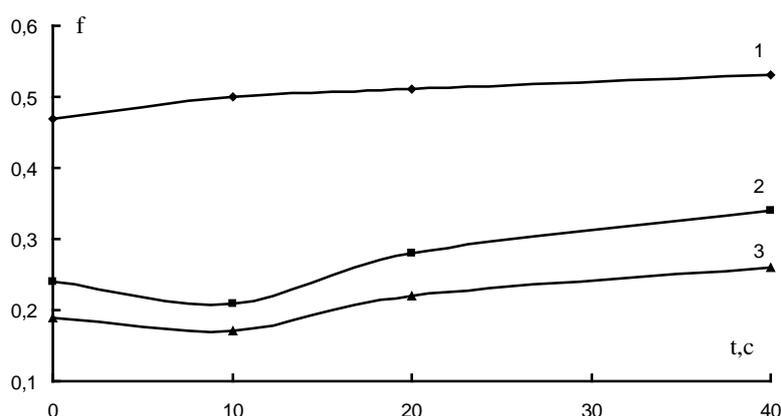


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента трения покрытия ZrN(1) и композиций на базе ZrN+фторсодержащие соединения (2, 3) от времени воздействия СВЧ-излучения: 1 – покрытие ZrN; 2 – ZrN+ФСО Ф2; 3 – ZrN +ФСО Ф1

Формирование композиционных покрытий приводит к снижению коэффициента трения пары «ZrN+ФСО–ШХ15», в том числе и при воздействии СВЧ-излучения. В ходе проведенных исследований установлено формирование композиционных покрытий на базе ZrN и

фторсодержащих олигомеров с повышенными триботехническими характеристиками. Исходные покрытия ZrN характеризуются развитой морфологией, формирование фторсодержащих слоев сглаживает исходную поверхность. Воздействие СВЧ-излучения приводит к образованию дефектной «пятнистой» структуры в композиционных покрытиях. Наблюдается уменьшение значений микротвердости композиционных покрытий, подвергнутых воздействию СВЧ-излучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайдахмедов, Р.Х. Многокомпонентные покрытия, формируемые ионно-плазменным методом / Р.Х. Сайдахмедов, М.Г. Карпман, Г.П. Фетисов. – Ташкент: Фан, 1999. – 132 с.
2. Синани, И.Л. Методы нанесения покрытий / И.Л. Синани, Е.М. Федосеева, Г.А. Береснев. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 110 с.
3. Способ плазмохимического нанесения покрытия: пат 2068029, C23C14/00, C23C14/24, C23C14/30 / Р.Ш. Тимергалиев [и др.]; заявитель Товарищество с ограниченной ответственностью «Старт-А-Техно», заявл. 28.11.1994 – 94042112/02; опубл. 20.10.1996. // «Изобретения. Полезные модели»: Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. – 1996. – № 20.
4. Струк, В.А. Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе много-тоннажно выпускаемых полимерных связующих: дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.01. / В.А. Струк. – Гомель: 1988 – 240 с.
5. Гольдаде, В.А. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем. / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий – М.: Химия, 1993. – 240 с.
6. Авдейчик, С.В. Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов: ч. 1/ С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, Ф.Г. Ловшенко. – Гродно: ГГАУ, 2007. – 320 с.
7. Авдейчик, С.В. Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов: ч. 2. / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, Ф.Г. Ловшенко. – Гродно: ГГАУ, 2008. – 399 с.
8. Применение фторопластового композита Флувис в поршневых компрессорах / П.Р. Гракович [и др.]. // Материалы. Технологии. Инструмент. – 2005. – № 3. – С. 33–36.
9. Серафимович, В.В. Влияние плазмохимической обработки углеродных волокон в среде фторорганических газов на их физико-механические свойства. / В.В. Серафимович // Поликомтриб – 2007. Тезисы докл. междунаучно-техн. конф. – Гомель: ИММС НАНБ, 2007. – С. 186–187.
10. Ловшенко, Ф.Г. Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф.Г. Ловшенко [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, Гомель. БелГУТ, 2004. – 519 с.
11. Овчинников, Е.В. Формирования тонкопленочных покрытий при воздействии технологических факторов // Е.В. Овчинников // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов / ДонНТУ. Донецк, 2013. – Выпуск 1, 2 (45). – С. 197–205.
12. Андрикевич, В.В. Технология фторсодержащих покрытий для резино-технических уплотнений / В.В. Андрикевич [и др.] // Веснік ГрДУ, сер. 6. – 2012. – № 1 (123). – С. 93–104.
13. Анищик, В.М. Многослойные наноструктурированные покрытия TiN/ZrN: структура и механические свойства / В.М. Анищик [и др.] // Перспективные материалы. – 2003. – № 4. – С. 75–78.
14. Научно-технический прогресс в машиностроении: Современные методы упрочнения деталей машин. Обзор. информ. Выпуск 9. Под ред. К.В. Фролова. – М., 1991. – 187 с.

Шагойка Александр Григорьевич  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы» г. Гродно  
аспирант инженерного факультета инновационных технологий  
E-mail: ovchin\_1967@mail.ru

**Кравченко Константин Викорович**  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно  
аспирант  
E-mail: ovchin\_1967@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

Тихоненко Александр Валерьевич  
УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы г. Гродно  
6 курс студент инженерного факультета инновационных технологий  
E-mail: ovchin\_1967@mail.ru

**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

A.G. SHAGOYKA, K.V. KRAVCHENKO, A.V. TIKHONENKO, N.M. CHEKAN, Ye.V. OVCHINNIKOV

## MODIFICATION OF MULTILAYER COMPOSITE COATINGS MICROWAVE

*The structure and properties of thin film coatings formed on metal substrates. It is shown that the coating of zirconium nitride based adsorptive activity alters the surface layers of metal substrates. The formation of the composite coating reduces the coefficient of friction pair «ZrN + FCO-SHH15», including in the microwave exposure.*

**Keywords:** cover, radiation, morphology, structure, properties.

### BIBLIOGRAPHY

1. Saydakhmedov, P.X. *Mnogokomponentnyye pokrytiya, formiruyemye ionno-plazmennym metodom* / P.X. Saydakhmedov, M.G. Karpman, G.P. Fetisov. – Tashkent: Fan, 1999. – 132 s.
2. Sinani, I.L. *Metody naneseniya pokrytiy* / I.L. Sinani, Ye.M. Fedoseyeva, G.A. Beresnev. – Perm: Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta, 2008. – 110 s.
3. *Sposob plazmokhimicheskogo naneseniya pokrytiya*: pat 2068029, C23C14/00, C23C14/24, C23C14/30 / R.SH. Timergaliyev [i dr.]; zayavitel Tovarishchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu «Start-A-Tekhn», zayavl. 28.11.1994 – 94042112/02; opubl. 20.10.1996. // «Izobreteniya. Poleznyye modeli»: Ofitsialnyy byulleten Rossiyskogo agentstva po patentam i tovarnym znakam. – 1996. – № 20.
4. Struk, V.A. *Tribokhimicheskaya kontseptsiya sozdaniya antifriktsionnykh materialov na osnove mnogotonnazhno vypuskayemykh polimernykh svyazuyushchikh*: diss. ... dokt. tekhn. nauk: 05.02.01. / V.A. Struk. – Gomel: 1988 – 240 s.
5. Goldade, V.A. *Ingibitory iznashivaniya metallopolimernykh sistem.* / V.A. Goldade, V.A. Struk, S.S. Pesetskiy – M.: Khimiya, 1993. – 240 s.
6. Avdeychik, S.V. *Tribokhimicheskiye tekhnologii funktsionalnykh kompozitsionnykh materialov*: ch. 1/ S.V. Avdeychik [i dr.]; pod red. V.A. Struka, F.G. Lovshenko. – Grodno: GGAU, 2007. – 320 s.
7. Avdeychik, S.V. *Tribokhimicheskiye tekhnologii funktsionalnykh kompozitsionnykh materialov*: ch. 2. / S.V. Avdeychik [i dr.]; pod red. V.A. Struka, F.G. Lovshenko. – Grodno: GGAU, 2008. – 399 s.
8. *Primeneniye ftoroplastovogo kompozita Fluvis v porshnevnykh kompressorakh* / P.R. Grakovich [i dr.]. // *Materialy. Tekhnologii. Instrument.* – 2005. – №3. – S. 33–36.
9. Serafimovich, V.V. *Vliyaniye plazmokhimicheskoy obrabotki uglerodnykh volokon v srede ftororganicheskikh gazov na iz fiziko-mekhanicheskiye svoystva.* / V.V. Serafimovich // *Polikomtrib – 2007. Tezisy dokl. mezhd. nauchno-tekhn. konf.* – Gomel: IMMS NANB, 2007. – S. 186–187.
10. Lovshenko, F.G. *Novyye resursoberegayushchiye tekhnologii i kompozitsionnyye materialy* / F.G. Lovshenko [i dr.]. – M.: Energoatomizdat, Gomel. BelGUT, 2004. – 519 s.
11. Ovchinnikov, Ye.V. *Formirovaniya tonkoplenochnykh pokrytiy pri vozdeystvii tekhnologicheskikh faktorov* // Ye.V. Ovchinnikov // *Progressivnyye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov / DonNTU. Donetsk, 2013. – Vypusk 1, 2 (45). – S. 197–205.*
12. Andrikevich, V.V. *Tekhnologiya ftorsoderzhashchikh pokrytiy dlya rezino-tekhnicheskikh uplotneniy* / V.V. Andrikevich [i dr.] // *Vesnik GrDU, ser. 6.* – 2012. – № 1 (123). – S. 93–104.
13. Anishchik, V.M. *Mnogosloynnyye nanostrukturirovannyye pokrytiya TiN/ZrN: struktura i mekhanicheskiye svoystva* / V.M. Anishchik [i dr.] // *Perspektivnyye materialy.* – 2003. – № 4. – S. 75–78.
14. *Nauchno-tekhnicheskyy progress v mashinostroyenii: Sovremennyye metody uprochneniya detaley mashin. Obzor. inform. Vypusk 9.* Pod red. K.V. Frolova.– M., 1991. – 187 s.

**Shagoika Alexandr Grigorievich**  
UO «Grodno State University.  
Yanka Kupala» Grodno  
postgraduate student of the Faculty  
of Engineering of innovative technologies  
E-mail: ovchin\_1967@mail.ru

Krauchanka Konstantin Victorovich  
UO «Grodno State University.  
Yanka Kupala» Grodno  
postgraduate student of the Faculty  
of Engineering of innovative technologies  
E-mail: ovchin\_1967@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

**Tihonenko Alexandr Valerievich**  
UO «Grodno State University.  
Yanka Kupala» Grodno  
6-course student of the Faculty of  
Engineering of innovative technologies  
E-mail: ovchin\_1967@mail.ru

**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

## МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 62/002:539.3(075.8)

В.А. ЛЕБЕДЕВ, В.Д. СОКОЛОВ, С.Ю. ШТЫНЬ, И.Л. ВЯЛИКОВ

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ППД НА ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ

*На основе энергетической модели процесса ППД предложен расчётно-аналитический метод оценки повышения усталостной прочности деталей, учитывающий энергетическое состояние поверхностных слоёв модифицированных в процессе их упрочнения методами ППД.*

**Ключевые слова:** *поверхностное пластическое деформирование, упрочнение, внутренняя энергия, энтальпия, долговечность, усталостная прочность.*

Одним из целевых предназначений динамических методов ППД является применение их для повышения усталостной прочности деталей машин. При упрочняющей обработке деталей методами ППД формируется качественно новый поверхностный слой, характеризующийся сглаженным микрорельефом, повышенными физико-механическими характеристиками без концентраторов напряжений и синергетически уравновешенной равномерно измельченной структурой.

В связи с тем, что в процессе упрочнения основные физико-механические характеристики качества ПС (остаточные напряжения сжатия, степень и глубина упрочненного слоя) формируются одновременно, то для практики машиностроения важно иметь закономерности комплексного влияния характеристик качества ПС на усталостную прочность деталей, работающих в условиях знакопеременного нагружения. Это позволит правильно осуществить оптимизацию технологических процессов упрочнения и прогнозировать возможности получения поверхности деталей с заранее заданным качеством и эксплуатационными свойствами. В этом плане энергетический подход является наиболее объективным.

Реальные материалы изначально содержат определенную концентрацию дефектов и ненулевую начальную энергию  $E_0$ , запасенную при технологической обработке материала. Особенно много дефектов в поверхностных слоях образуется при упрочняющей обработке деталей. При эксплуатации материалов происходит дополнительная повреждаемость, приводящая к приращению внутренней энергии  $E_{int}$ . Сумма  $E_0 + E_{int}$ , выражает собой физический остаточный ресурс материала – его способность к накоплению дефектов при пластической деформации в процессе эксплуатации. Таким образом, условие разрушения локального объема твёрдого тела в процессе эксплуатации можно представить в виде:

$$(1)$$

где  $E_{int}$  – изменение мольной внутренней энергии локального объема, кДж/моль;  
 $E_{crit}$  – критическое значение функции, контролирующей разрушение материала.

Из условия (1) следует, что когда левая часть, соответствующая повышению внутренней энергии локального объема  $E_0 + E_{int}$ , достигнет правой части  $E_{crit}$ , являющейся фундаментальной энергетической характеристикой прочности материала, произойдет его разрушение.

Основываясь на фундаментальном уравнении Гиббса в работе [1], пренебрегая упругой деформацией материалов, предложено следующее выражение для оценки изменения внутренней энергии локального объема твёрдого тела под действием комплексного влияния различных термодинамических сил: тепловых, механических, химических, диффузионных, электромагнитных и др.

$$E_{int} = E_0 + \sum_{i=1}^n \Delta E_i, \quad (2)$$

где  $T$  – абсолютная температура, К; в реальных условиях эксплуатации;

где  $T_0$  – начальная температура;  
 $\Delta T$  – повышение начальной температуры поверхностных слоёв;  
 $R = 0,008314$  кДж/К·моль;  
 $t$  = продолжительность роста внутренней энергии в процессе эксплуатации до разрушения, с;  
 $\tau$  – период тепловых колебаний атомов,  $10^{-12}$  с;  
 $\alpha$  – коэффициент формы, ;  
 $\beta$  – коэффициент аккумуляирования энергии, показывающий долю запасённой энергии относительно всей затраченной работы, по данным [2] для отожженных сталей, для упрочнённых сталей ;  
 $V_m$  – молярный объём, мм<sup>3</sup>/моль;  
 $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентное напряжение, определяемое характером силового воздействия на локальный объём (статическое, динамическое, циклическое);  
 $\dot{\epsilon}$  – средняя скорость неупругой деформации, с<sup>-1</sup> ;  
 $\dot{W}$  – величина приращения внутренней энергии, за счёт воздействия немеханических сил (химических, диффузионных, электромагнитных).

Развивая аналогию между процессами поглощения энергии кристаллической решёткой при механическом нагружении и при нагреве, в качестве основополагающей функции, контролирующей разрушение металла в условиях силовых факторов эксплуатации может быть принята функция, устанавливающая величину предельной энергии поглощаемой кристаллической решёткой при нагреве:

$$W_{\text{кр}} = W_{\text{кр}}^0 + \Delta W_{\text{кр}} \quad (3)$$

где  $W_{\text{кр}}^0$  – соответствует разности теплосодержания (энтальпии) материала в твёрдом состоянии, при температуре плавления и энтальпии при 293°К и равной  $W_{\text{кр}}^0$  ;  
 $\Delta W_{\text{кр}}$  – скрытая теплота плавления.

Таким образом, критическое значение функции, контролирующей разрушение материала, представим в виде:

$$W_{\text{кр}} = W_{\text{кр}}^0 + \Delta W_{\text{кр}} \quad (4)$$

С учётом(2) и (4) получим следующее условие разрушения локального объёма твёрдого тела в процессе эксплуатации

$$W_{\text{кр}} = W_{\text{кр}}^0 + \Delta W_{\text{кр}} \quad (5)$$

По своему содержанию условие(5) имеет обобщающий характер, достаточно полно раскрывает энергетическую и кинетическую сущность различных процессов усталостной повреждаемости и разрушения материалов в процессе их эксплуатации, отражает их феноменологичность и статистичность. Следует также отметить, что процесс ППД является одним из разновидностей процессов усталостной повреждаемости и разрушения материалов, а разработанная энергетическая модель ППД частным видом условия(5). Кроме того условие (5) позволяет решить ряд актуальных задач по прогнозированию влияния упрочнения ППД свободнодвижущимися инденторами на эксплуатационные свойства деталей, изготавливаемых из различных по марке и наименованию материалов.

Установлено, что при достижении длительности приложения нагрузки соответствующей времени  $t_{\text{кр}}$  пластическая деформация становится критической для данного состояния материала. Выразив время до разрушения  $t_{\text{кр}}$  из условия разрушения локального объёма твёрдого тела (5) и допустив, что  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{\text{кр}}$  получим в общем виде уравнение долговечности:

$$W_{\text{кр}} = W_{\text{кр}}^0 + \Delta W_{\text{кр}} \quad (6)$$

Полученное уравнение даёт возможность проводить оценку долговечности поверхностных слоёв деталей, эксплуатируемых в условиях знакопеременных нагрузок и усталостного изнашивания. Из уравнения (6) следует, что усталостная долговечность деталей зависит от:

- энергетического состояния поверхностного слоя, полученного на стадии изготовления детали;
- степени его напряжённости, обусловленной характером внешнего силового воздействия на него;
- критической величины относительной пластической деформации для соответствующих условиям эксплуатации состояния материала.

В соответствии с разработанной энергетической моделью ППД энергетическое состояние поверхностного слоя после ППД оценивается величиной  $\Delta H$ , определяемой как разность энтальпий при температуре плавления и при температуре равной 283 К. Энергетическое состояние поверхностных слоёв деталей, не подвергаемых обработке ППД при изготовлении можно оценить, воспользовавшись зависимостью (2) считая, что  $\Delta H = \Delta H_{пл} - \Delta H_{283}$ .

Степень напряжённости локального объёма поверхностного слоя зависит от условий эксплуатации деталей. Так при воздействии на деталь знакопеременных нагрузок напряжённость локального объёма поверхностного слоя определяется амплитудой циклических напряжений т.е.  $\sigma_{ампл}$ . При статическом или динамическом воздействии на поверхностный слой внешних сил его напряжённость определяется величиной напряжения возникающее в зоне локального силового контакта.

Что же касается критической величины относительной пластической деформации, то она главным образом обусловлена физико-механическими характеристиками поверхностного слоя, сформированного на стадии изготовления детали и оказывающих непосредственное влияние на изменение энергетического состояния локальных объёмов в процессе эксплуатации. В статье показано, что между плотностью, накапливаемой в поверхностном слое внутренней энергии, и твёрдостью существует тесная взаимосвязь. Если принять в качестве основной характеристики энергетического состояния поверхностного слоя его твёрдость, то критическую величину относительной пластической деформации в процессе эксплуатации можно оценить из следующих соотношений:

- для поверхностных слоёв упрочнённых ППД –  $\epsilon_{кр} = \frac{H_{кр}}{E}$  ;
- для неупрочнённых поверхностных слоёв –  $\epsilon_{кр} = \frac{H_{кр}}{E}$  ;

На основе вышеизложенных предпосылок запишем уравнения усталостной (объёмной) долговечности деталей:

- упрочнённых ППД: 
$$N = \frac{1}{C} \left( \frac{H_{кр}}{H} \right)^m \left( \frac{\sigma_{ампл}}{\sigma_{кр}} \right)^{-k} \quad ; \quad (7)$$

- неупрочнённых ППД: 
$$N = \frac{1}{C} \left( \frac{H_{кр}}{H} \right)^m \left( \frac{\sigma_{ампл}}{\sigma_{кр}} \right)^{-k} \quad . \quad (8)$$

Количественно влияние методов ППД свободнодвижущимися инденторами на усталостную прочность деталей можно оценить посредством коэффициента  $K_V$ , представляющего собой отношение пределов выносливости упрочнённых ППД  $\sigma_{кр}$  и исходных деталей  $\sigma_{кр0}$ .

Допустив, что  $\sigma_{кр} = K_V \sigma_{кр0}$ , получим, выражение для определения максимальной величины коэффициента  $K_V$  в виде:

$$K_V = \left( \frac{N_0}{N} \right)^{\frac{1}{m}} \left( \frac{\sigma_{ампл}}{\sigma_{кр0}} \right)^{\frac{k}{m}} \quad . \quad (9)$$



**Лебедев Валерий Александрович**

Донской государственный технический университет,  
г. Ростов–на–Дону  
кандидат технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. (863)2738–360  
E–mail: va.lebidev@yandex.ru

**Соколов Вячеслав Дмитриевич**

Донской государственный технический университет,  
г. Ростов–на–Дону  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. (863)2738–360  
E–mail: va.lebidev@yandex.ru

**Штын Сергей Юрьевич**

Донской государственный технический университет,  
г. Ростов–на–Дону  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. (863)2738–360  
E–mail: va.lebidev@yandex.ru

**Вяликов Иван Леонидович**

Донской государственный технический университет,  
г. Ростов–на–Дону  
кандидат технических наук,  
ст. преп. кафедры «Приборостроение»  
Тел. (863)2738–360  
E–mail: va.lebidev@yandex.ru

---

V.A. LEBEDEV, V.D. SOKOLOV, S.YU. SHTYN, I.L. VYALIKOV

**ENERGY METHOD OF EVALUATION OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION  
TO GREATER OPERATIONAL PROPERTIES OF DETAILS**

*Based on the energy model of the process of PPD proposed settlement and analytical evaluation method of increasing the fatigue strength of parts, taking into account the energy state of the surface layers modified in the process of their hardening methods PPD.*

**Keywords:** surface plastic deformation, hardening, internal energy, enthalpy, durability, fatigue strength.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Lebedev, V.A. Energeticheskiye aspekty uprochneniya detaley dinamicheskimi metodami poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya: monografiya / V.A. Lebedev – Rostov n/D: Izdatelskiy tsentr DGTU, 2007. – 156 s.
2. Ibatullin, I.D. Kinetika ustalostnoy povrezhdayemosti i razrusheniya poverkhnostnykh slojev: monografiya / I.D. Ibatullin. – Samara: Samar. gos. tekhn. un–t, 2008. – 387 s.

**Lebedev Valeriy Aleksandrovich**

Don State Technical University, Rostov–on–Don  
Ph.D., professor,  
professor of «Mechanical Engineering»  
Ph. (863) 2738–360  
E–mail: va.lebidev@yandex.ru

**Sokolov Vyacheslav Dmitriyevich**

Don State Technical University, Rostov–on–Don  
Student of «Mechanical Engineering»  
Ph. (863) 2738–360  
E–mail: va.lebidev@yandex.ru

**Shtyn Sergey Yuryevich**

Don State Technical University, Rostov–on–Don  
Student of «Mechanical Engineering»  
Ph. (863) 2738–360  
E–mail: va.lebidev@yandex.ru

**Vyalikov Ivan Leonidovich**

Don State Technical University, Rostov–on–Don  
Ph.D.,  
Art. Ven. Department of «Instrument»  
Ph. (863) 2738–360  
E–mail: va.lebidev@yandex.ru

К.С. ЛУНИН, В.Н. МИХАЙЛОВ, С.А. МОСКВИТИН

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ТРУБЫ С НЕДЕФОРМИРУЕМЫМ ПРОХОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ

*Предложен метод оценки деформаций, исходя из выборочных условий статического равновесия; рассчитанное изменение толщины стенки трубы согласуется с опубликованными результатами экспериментов.*

**Ключевые слова:** уравнение изогнутой оси, степенная функция напряжения текучести, моменты внутренних сил.

Гибка труб на оборудовании ротационного действия осуществляется перемещением зоны деформирования относительно заготовки, на которой постепенно образуется участок заданной протяженности, изогнутый на радиус  $R_0$  [1 – 4]. Возможное уменьшение высоты его проходного сечения [5, 6] предупреждается применением наполнителей и дорнов. В пределах названной зоны деформирования кривизна оси трубы  $1/R$  изменяется от нуля до  $1/R_0$  на относительно малом приращении угла наклона  $\varphi$  и прогиба  $\omega$  [7], что позволяет использовать цилиндрические координаты  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $z$ . Приравнявая напряжение  $\sigma_z$  степенной функции напряжения текучести  $\sigma_s = A\varepsilon_1^n$ , выводят формулу перемещения  $u_z = \frac{z\rho \sin \alpha}{(m+1)R} + \frac{\varepsilon_0}{m+1} \frac{z^{m+1}}{z_1^m}$ ,

где  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} \left( \frac{z}{z_1} \right)^m$ ;

$m = 1/n$ ;

$\varepsilon_0$  – относительное удлинение оси трубы.

Принятие более сложной схемы напряженного состояния требует соответствующей корректировки величины  $m$ .

Влияние длины зоны деформирования  $z_1$  на распределение поперечных деформаций существенно [7]: ее уменьшение затрудняет перемещение материала  $u_\alpha$  по периметру сечения трубы, соответственно увеличивается радиальное перемещение  $u_\rho$  и утонение  $\Delta t_{\min}$  стенки трубопровода. Целью настоящей работы является теоретический вывод зависимости  $\Delta t$  от  $z_1$  в условиях не одноосного напряженного состояния при сохранении круглой формы сечений изгибаемой трубы.

Согласно [7]  $u_\alpha = k \frac{\cos \alpha}{R} (r^2 + \rho^2) - \omega \cos \alpha$ , где  $k$  – неизвестный коэффициент, зависящий от  $z_1$ ,  $r$  – средний радиус стенки трубы. При  $\rho = r$  имеем:  $u_\rho = -\omega \sin \alpha$ , деформации

$$\varepsilon_\alpha = -2kr \frac{\sin \alpha}{R}, \quad \gamma_{\alpha z} = 2kr^2 \frac{m \cos \alpha}{R_0 z_1}, \quad \gamma_{\rho\alpha} = 0, \quad \gamma_{z\rho} = 0, \quad \text{интенсивность деформаций}$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ \varepsilon_z^2 + \varepsilon_z \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\alpha^2 + \frac{1}{4} \gamma_{\alpha z}^2 \right]^{0,5}.$$

Расчету толщины стенки предшествует подбор параметров деформированного состояния  $k$ ,  $m$  и  $\varepsilon_0$ , не противоречащих выборочным условиям статического равновесия. Обратимся к элементу изгибаемой трубы, образованному в окрестностях выхода из зоны деформирования тремя сечениями: продольным – в плоскости симметрии и двумя поперечными, отстоящими друг от друга на угол  $d\varphi$ , рисунок 1.

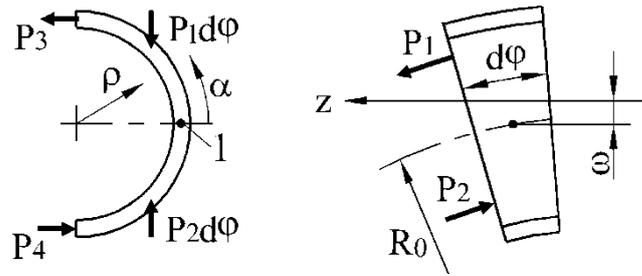


Рисунок 1 – Расчетная схема статического равновесия

Условие равновесия моментов внутренних сил относительно точки 1:

$$P_3 r + P_4 r + t_0 r^2 \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} \left[ \sigma_z(\alpha) d\varphi + \frac{\partial \tau_{\alpha z}(\alpha)}{\partial z} dz \right] [1 + \varepsilon_\rho(\alpha)] (1 - \cos \alpha) d\alpha = 0; \quad (1)$$

$$P_{3,4} = \sigma_\alpha \left( \frac{\pm \pi}{2} \right) (R_0 \pm r) t_0 \left[ 1 + \varepsilon_\rho \left( \frac{\pm \pi}{2} \right) \right] d\varphi.$$

Обозначения функций напряжений, а также деформации  $\varepsilon_\rho$  здесь содержат аргумент – переменную координату  $\alpha$  или ее фиксированное значение. В развернутой записи (1) угол  $d\varphi$  сокращается, так как  $dz = R_0 d\varphi$ .

Пренебрегая напряжением  $\sigma_\rho$ , имеем формулы напряжений:

$$\sigma_z = \frac{2\sigma_s}{3\varepsilon_i} (2\varepsilon_z + \varepsilon_\alpha); \quad \sigma_\alpha = \frac{2\sigma_s}{3\varepsilon_i} (2\varepsilon_\alpha + \varepsilon_z), \quad \tau_{\alpha z} = \frac{\sigma_s}{3\varepsilon_i} \gamma_{\alpha z},$$

где  $\varepsilon_z = r \frac{\sin \alpha}{R} + \varepsilon_0 \frac{R_0}{R}.$

Наряду с (1) должны выполняться условия:

$$rt_0 \int_0^{2\pi} \sigma_z(\alpha) [1 + \varepsilon_\rho(\alpha)] d\alpha = N; \quad Pz_1 - M_1 = 0, \quad (2)$$

где  $N$  – заданная продольная сила, в дальнейшем равная нулю;

$$P = 2rt_0 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \tau_{\alpha z}(\alpha) [1 + \varepsilon_\rho(\alpha)] \cos \alpha d\alpha - \text{поперечная сила};$$

$$M_1 = r^2 t_0 \int_0^{2\pi} \sigma_z(\alpha) [1 + \varepsilon_\rho(\alpha)] \sin \alpha d\alpha - \text{момент на границе зоны деформирования}.$$

Моментам сил  $P_3$  и  $P_4$ , направленным на рисунке 1 против часовой стрелки, противостоит разность моментов, создаваемых напряжениями  $\tau_{\alpha z}$  в поперечных сечениях, расположенных под углом  $d\varphi$ . Она учитывается вторым слагаемым в квадратных скобках условия

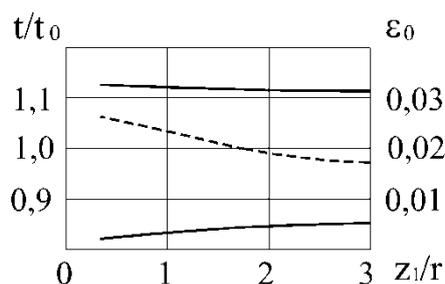
(1), где  $\frac{\partial \tau_{\alpha z}}{\partial z} \approx \frac{A}{3} \varepsilon_i^{n-1} \left( \frac{\partial \gamma_{\alpha z}}{\partial z} - \frac{\gamma_{\alpha z}}{2\varepsilon_i^2} \frac{\partial \varepsilon_i^2}{\partial z} \right).$  Равнодействующие  $P_1$  и  $P_2$  напряжений  $\sigma_z$  участ-

вуют в (1) проекциями  $P_1 d\varphi$  и  $P_2 d\varphi$ , а фактически – первым слагаемым в квадратных скобках. Его значимость мала из-за разнонаправленности названных проекций.

После определения  $k$ ,  $m$  и  $\varepsilon_0$  из условий (1, 2) рассчитываем деформации, а также экстремальные значения толщины стенки изогнутой трубы:  $t_{\min} = t_0(1 + \varepsilon_\rho(r, \pi/2))$ ,  $t_{\max} = t_0(1 + \varepsilon_\rho(r, -\pi/2))$ . Графики на рисунке 2 иллюстрируют зависимость максимальной и минимальной толщины стенки от длины зоны деформирования при  $R_0 = 4r$ .

Диапазоны подобранных параметров деформированного состояния трубы:  $0,2405 \geq k \geq 0,1945$ ;  $0,0263 \geq \varepsilon_0 \geq 0,0172$ ;  $19,8 \geq m \geq 4,36$ . Условия равновесия вводили в компьютерную программу типа MathCAD и запрашивали значения выражений (1) и (2). По мере их приближения к нулю процедура подбора заканчивалась. Исходная толщина стенки не влияла на ре-

зультаты расчетов, поскольку  $t_0$  сокращается в приближенных условиях равновесия. Влияние показателя степени  $n$  функции напряжения текучести также незначительно.



**Рисунок 2 – Экстремальные значения толщины стенки трубы и относительное удлинение оси (пунктир)**

Соотношения  $t_{max}/t_0$  и  $t_{min}/t_0$  согласуются в качественном отношении с опубликованными данными экспериментов [8, 9]. Количественное сравнение затруднено отсутствием в этих публикациях сведений, позволяющих установить длину зоны деформирования.

Приближенный характер данного решения задачи предопределяет произвольно выбранная функция перемещения  $u_a$  наряду с другими допущениями, в частности, не учитывается упругое состояние материала в окрестностях нейтральной поверхности. Вместе с тем, предлагаемый метод оценки деформаций может использоваться в теоретических исследованиях и практических расчетах гибки труб, будучи намного проще альтернативных, энергетических методов [10].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин, А.И. Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов / А.И. Гальперин. – М.: НЕДРА, 1983. – 203 с.
2. Лукьянов, В.П. Штамповка, гибка деталей для сварных сосудов, аппаратов и котлов / В.П. Лукьянов, И.И. Маткава, В.А. Бойко. – М.: Машиностроение, 2003. – 512 с.
3. Марьин, Б.Н. Газовые системы летательных аппаратов / Б.Н. Марьин, С.Б. Марьин, А. Г. Прохоров и др. Владивосток: Дальнаука, 2006. – 459 с.
4. Никитин, В.А. Проектирование станков холодной и горячей гибки труб / В.А. Никитин. – СПб.: ОАО «ЦТСС», 2011. – 236 с.
5. Билобран, Б.С. Сплюсывание тонкостенных труб при холодном пластическом изгибе / Б.С. Билобран // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 7. – С. 20–23.
6. Pan, K. On the Plastic Deformation of a Tube During Bending / K. Pan, K.A. Stelson // Journal of Engineering for Industry. – November, 1995. – Vol. 117. – Issue 4. – p.p. 494–500.
7. Вдовин, С.И. Теория и расчеты гибки труб/ С.И. Вдовин. – М.: «Машиностроение», Орел: ОрелГТУ, 2009. – 96 с.
8. Franz, W.D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen/ W.D. Franz. – Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988. – 237 s.
9. 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.
10. Вдовин, С.И. Инженерный метод вариационной оценки пластических деформаций. Ч. 1. Гибка труб / С.И. Вдовин, Т.В. Федоров. – Орел: Госуниверситет–УНПК, 2013. – 93 с.

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

**Михайлов Валерий Николаевич**  
 Орловский филиал РАНХ и ГС  
 Кандидат технических наук, доцент  
 Тел.: 8–905–167–0517  
 E-mail: vdovostu@mail.ru

**Москвитин Сергей Александрович**  
 ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные процессы и машины бесстружковой обработки материалов»  
 Тел.: 8–905–167–0517  
 E-mail: vdovostu@mail.ru

K.S. LUNIN, V.N. MIKHAYLOV, S.A. MOSKVITIN

## TECHNOLOGICAL PIPE BENDING NON-DEFORMABLE FLOW SECTION

*A method for estimating the deformation based on the sample conditions of static equilibrium; calculated change in wall thickness is consistent with published results.*

**Keywords:** *equation of the bent axis power function of yield stress, moments of internal forces.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Galperin, A.I. Mashiny i oborudovaniye dlya izgotovleniya krivolinyeynykh uchastkov truboprovodov / A.I. Galperin. – M.: NEDRA, 1983. – 203 с.
2. Lukyanov, V.P. Shtampovka, gibka detaley dlya svarynykh sosudov, apparatov i kotlov / V.P. Lukyanov, I.I. Matkava, V.A. Boyko. – M.: Mashinostroyeniye, 2003. – 512 s.
3. Marin, B.N. Gidrogazovyye sistemy letatelnykh apparatov / B.N. Marin, S.B. Marin, A. G. Prokhorov i dr. Vladivostok: Dalnauka, 2006. – 459 s.
4. Nikitin, V.A. Proyektirovaniye stankov kholodnoy i goryachey gibki trub / V.A. Nikitin. – SPb.: OAO «TSTSS», 2011. – 236 s.
5. Bilobran, B.S. Splyushchivaniye tonkostennykh trub pri kholodnom plasticheskom izgibe / B.S. Bilobran // Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo. – 1968. – № 7. – S. 20–23.
6. Pan, K. On the Plastic Deformation of a Tube During Bending / K. Pan, K.A. Stelson // Journal of Engineering for Industry. – November, 1995. – Vol. 117. – Issue 4. – p.p. 494–500.
7. Vdovin, S.I. Teoriya i raschety gibki trub/ S.I. Vdovin. – M.: «Mashinostroyeniye», Orel: OrelGTU, 2009. – 96 s.
8. Franz, W.D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen/ W.D. Franz. – Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988. – 237 s.
9. Lukyanov, V.P. Parametry kholodnoy gibki listovykh zagotovok, prutkov i trub / V.P. Lukyanov, I.I. Matkava, V.A. Boyko, D.V. Dotsenko. – M.: Mashinostroyeniye-1, 2005. – 151 s.
10. Vdovin, S.I. Inzhenernyy metod variatsionnoy otsenki plasticheskikh deformatsiy. CH. 1. Gibka trub / S.I. Vdovin, T.V. Fedorov. – Orel: Gosuniversitet-UNPK, 2013. – 93 s.

**Lunin Konstantin Sergeyeovich**

State University – ESPC

Post-graduate student of the department

«Automated processes and material handling machines»

Ph.: 8-905-167-0517

E-mail: vdovostu@mail.ru

**Mikhaylov Valeriy Nikolayevich**

Orel branch Ranh Airport and GE.

Ph.D., Associate Professor

Ph.: 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»

Ph.: 8-905-167-0517

E-mail: vdovostu@mail.ru

И.В. ОВСЯНИКОВА, А.С. ТАРАПАНОВ, А.А. МУРАВЬЕВ

## АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛЕЗВИЙНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ С ВЫСОКИМИ СКОРОСТЯМИ

*Возможности современного металлорежущего оборудования и инструмента в значительной степени опережают сложившиеся методы исследования и прогнозирования перспективных и вновь создаваемых процессов лезвийной обработки. В статье рассматривается механизм контактного взаимодействия и взаимовлияния полей инструмента и заготовки при лезвийной обработке с высокими и сверх высокими скоростями.*

**Ключевые слова:** лезвийная обработка, энергетические поля, математическая модель, высокоскоростное резание.

Создание изделий для ракетной, авиационной, автомобильной промышленности и медицины из нано– (НК) и субмикроструктурных (СМК) металлов и сплавов, обладающих уникальными физико–механическими характеристиками, обуславливает растущий интерес разработчиков принципиально нового оборудования и инструмента.

При изготовлении ответственных деталей современных машин наука и производство постоянно сталкиваются с проблемой отыскания эффективных средств технологического воздействия на поверхностный слой в процессе формообразования их рабочих поверхностей. Надежность техники тесно связана с долговечностью ответственных деталей, полностью зависит от качественного состояния их рабочих поверхностей, испытывающих нагрузки и различного рода воздействия. В зависимости от эксплуатационных условий к поверхностному слою рабочей поверхности предъявляются требования по форме и направлению микрогеометрии, структуре, фазовому составу, микротвердости, остаточным напряжениям и другим показателям качественного состояния.

Обеспечение заданных качественных показателей поверхностных слоев при формообразовании рабочих поверхностей в процессе изготовления деталей одно из важнейших направлений, которыми занимается технологическая наука.

Отсутствию экспериментальных данных и физической картины разрушения обрабатываемых материалов на высоких и сверхвысоких скоростях приводит к необходимости использования для кинематически сложных процессов формообразования комплексного метода анализа и прогнозирования перспективных и вновь создаваемых процессов лезвийной обработки [1].

Самое существенное влияние на поверхность обрабатываемой детали, инструмент и обрабатываемый материал оказывает скорость. Качественно новые возможности методов обработки могут быть достигнуты через рассмотрение процессов, происходящих на микро– и нано–уровне [2], позволят обеспечить новой информацией о процессах и явлениях в зоне обработки и создать фундамент для разработки более полной и достоверной модели процессов лезвийной обработки.

При обработке резанием в процессе стружкообразования имеет место непосредственное контактное взаимодействие двух твердых тел – инструмента и заготовки. В действительности «прямого» контакта этих тел не существует. Они отстоят друг от друга, взаимодействие тел осуществляется через взаимодействие их полей [2–3, 8].

Физический механизм контактного взаимодействия и взаимовлияния полей инструмента и заготовки подобен тому, который осуществляется между отдельными частицами или системами элементарных частиц этих тел на атомно–молекулярном уровне. Поэтому все материалы и вещества рассматриваются как квазикомпозиционные материалы, в которых связующими являются поля энергетического взаимодействия (энергетические зоны), а арматурой (наполнителем) – соответствующие элементарные частицы [3,4].

Такой подход, значительно расширяющий круг рассматриваемых явлений, позволяющий на основе анализа микро– и нанопроцессов упорядочить результаты макро–экспериментов и предсказывать результаты технологических воздействий на заготовку.

Концепция взаимодействия полей дает возможность наряду с традиционными методами изучения и совершенствования процесса резания использовать качественно новый перспективный прием для разработки эффективных методов лезвийного формообразования. Распределенные по контактным площадкам поверхностные силы вызывают в телах объемные поля напряжений. Напряжения в этом случае – внутренние удельные силы между смежными частицами материала. Поля напряжений, характеризующие силы, действующие между атомами, создают в контактирующих телах соответствующие поля деформаций. На уровне атомов или ионов, образующих структуру материала, это выражается в смещении их относительно установившихся до этого равновесных положений. Происходит упругая деформация локальных полей взаимодействующих между собой атомов и ионов тела. Эти поля как бы «сплющиваются», преодолевая ядерную силу отталкивания ионов или атомов на близких расстояниях, что и служит соответствующей компенсацией действующих напряжений. При высоких значениях напряжений происходит разрушение существующих атомно-молекулярных связей, перестройка структуры материала и образование новых связей, обеспечивающих новое равновесное состояние претерпевшего изменения материала [4].

При этом мгновенные состояния динамического равновесия обеспечивают среду построения слоистой конструкции из материала с новыми свойствами. Процессы, происходящие в зоне разрушения через взрыв, вызывают изменения, приближающие исходные свойства обрабатываемого материала к прочностным характеристикам режущего инструмента.

В микропорах материала при импульсном воздействии с параметрами взрыва происходит ударное сжатие среды, развиваются процессы, характерные для имплозии (взрыв, направленный во внутрь). Это может сопровождаться локальным импульсом чрезвычайно высокой температуры [3].

Таким образом, сущность процесса преобразования свойств материала при резании, как и во всех других известных технологических методах обработки, заключается в нарушении его текущего равновесного состояния. Единым физическим инструментом изменения сложившегося равновесия является энергия, под воздействием которой включаются физико-химические процессы, стремящиеся поддержать равновесное состояние материала в новых энергетических условиях. При этом разрушаются старые атомно-молекулярные связи и образуются новые. В результате после восстановления первоначальных параметров структура и свойства материала, претерпевшего дополнительное энергетическое воздействие, будут существенно отличаться от исходных.

Взаимодействие полей механических сопровождается температурными, химическими, диффузионными процессами и множеством других процессов и явлений, одновременное протекание которых и обеспечивает перестройку структуры материала, его послойную и зеренную дефрагментацию и разрушение, образование новых атомно-молекулярных связей.

С энергетической точки зрения процесс резания металлов относится к локализованному высокоэнергетическим. При резании приложенная извне механическая энергия локализуется в зоне контакта в местах протекания процессов деформации и разрушения и преобразуется при этом в другие виды энергии.

Основным физическим процессом, сопровождающим стружкообразование и разрушение материала при резании, является тепловыделение. Практически вся механическая работа, затрачиваемая на срезание припуска с заготовки, превращается в тепло.

При обычных скоростях резания (до 120 – 150 м/с) в зависимости от технологического метода и условий обработки стружкой отводится 25 – 85% всей выделившейся теплоты, в заготовку уходит 10 – 15%, в инструмент 2 – 8% и около 1% в окружающую среду.

Процесс превращения срезаемого слоя в стружку можно представить как процесс последовательных пластических сдвигов с некоторой долей сжатия тонких слоев обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига. При анализе рассматривается деформируемый при переходе в стружку слой, состоящим из трех потоков, разделенных по зонам очага деформации. Выделяют зону пластических деформаций (зону стружкообразования), зону контактных пластических деформаций, переходную и зону пластических деформаций в поверхностном слое детали [5, 7].

Благодаря большой скорости перемещения стружки по передней поверхности инструмента и трения задней поверхности о заготовку в зоне контактов концентрируется большое количество тепла, разогревая прирезцовый слой стружки (нано–объём за нано–время) до температуры 900 – 1400°C. Металл переходит в пластическое состояние, вследствие чего создаются условия для трения скольжения [7].

Тепло не может глубоко распространиться в материал режущего клина ввиду кратковременности нахождения стружки на передней поверхности, но на глубине нескольких сотых миллиметра, в одном или нескольких зёрнах в заготовке температура может достигать точки плавления и даже «кипения» обрабатываемого материала.

На поверхности формирующихся при затвердевании стали кристаллов (на поверхности раздела твердой и жидкой фаз) образуются в расплавленных и кипящих зёрнах заготовки пузыри СО. Кипение, при котором пар образуется в виде периодически зарождающихся и растущих пузырей, называется пузырьковым кипением. При медленном пузырьковом кипении в жидкой фазе металла (а точнее, как правило, на границах среды) появляются пузырьки, наполненные паром. За счёт интенсивного испарения жидкости внутрь пузырьков, они растут, всплывают, и пар высвобождается в паровую фазу над поверхностью [10].

В заготовке в пограничном слое жидкая фракция находится в слегка перегретом состоянии, т. е. её температура превышает номинальную температуру кипения. В обычных условиях эта разница невелика (порядка одного градуса).

«Кипение» металла похоже на последовательно сменяющие друг друга режимы конвекции некипящей жидкости, поверхностного кипения и развитого пузырькового кипения, вызывается обильным выделением газов за счет реакции между углеродом и закисью железа.

В затвердевающем сплаве всегда существуют совместно жидкий и твердый металлы. Скорость диффузии водорода при температуре плавления стали велика, и водород быстро перераспределяется между кристаллами и жидким металлом, в результате чего в жидкой фазе накапливается водород, часть которого непрерывно удаляется в виде пузырьков.

За счет термодинамических газовых процессов в кавитационном пузырьке повышаются давление и температура внутри пузырька. В нем запасается кинетическая энергия, достаточная для преодоления растущего давления. С ростом давления содержание пузырька начинает конденсироваться на внутренней стороне оболочки пузырька, поэтому давление в пузырьке снижается, оболочка уменьшается.

В последней стадии пузырек схлопывается и выделяется кинетическая энергия. Принимается, что запасенная кинетическая энергия переходит в энергию нано–взрыва.

Плотность жидкой и твердой стали занимает промежуточное положение между плотностями железа и чугуна и составляет соответственно 6500 – 6600 и 7500 – 7600 кг/м<sup>3</sup>.

С повышением скорости резания уменьшается степень деформации металла в процессе стружкообразования, что подтверждается, в частности, уменьшением усадки стружки и силы резания при скоростном точении. Уменьшение деформации в отдельных частицах стружки обуславливает уменьшение количества теплоты, образующейся в процессе резания в каждой частице. Кроме того, при высокой скорости резания частицы стружки испаряются, поэтому не соприкасаются с передней поверхностью резца. Благодаря этому при скоростном точении в режущий клин и в обрабатываемую деталь поступает меньше теплоты, чем при низкой скорости резания. Опытами многих исследователей, занимавшихся этой проблемой (А.В. Кривоухов, В.К. Семинский, В.А. Колесов и другие), хорошо подтверждается, что при высоких скоростях резания обработанная поверхность нагревается лишь незначительно или не нагревается совсем.

Таким образом, в условиях высокоскоростного точения распределение образовавшейся теплоты благоприятнее, чем при умеренных скоростях.

Несмотря на положительное значение повышения скорости обработки, условия работы режущей кромки резца при скоростном точении тяжелее, чем при менее высоких скоростях. Общее количество теплоты, которое поступит в резец за одно и то же время его работы, будет больше при высокой скорости обработки. Это объясняется тем, что в первом случае режущий клин получит теплоту из большего объема частиц стружки, чем за такое же время

при невысокой скорости.

В результате при скоростном резании режущий клин нагревается значительно больше, чем при работе с умеренной скоростью резания. Поэтому развитие скоростного резания обусловило необходимость дальнейшего повышения прочности и стойкости материалов резцов. [5–9]

Количественное выражение уравнения теплового баланса зависит от физико-химических свойств материалов заготовки и инструмента, геометрических параметров режущего инструмента, режимов резания и условий обработки.

Математическое описание условий теплообмена на граничных поверхностях зоны деформации представляет значительные трудности. Поэтому многие исследователи вводили целый ряд допущений и упрощений, значительно снижая ценность решения задачи. Конечные формулы отличались громоздкостью, содержали большое количество сложно определяемых коэффициентов и были неудобны для практического использования. [5–9]

Характер распределения температур в зоне резания хорошо согласуется с современными представлениями о поле деформаций, а наибольшие температуры возникают в области максимальных деформаций и на контактных площадках.

Установлено, что действие высокого давления (более 0,1 ГПа) на материал в сочетании с повышенными температурами может вызывать значительные изменения его структуры и свойств [5–8]. Под высоким давлением происходит увеличение плотности вещества, многие кристаллические вещества переходят в более плотные кристаллические модификации (полиморфизм), энергетически выгодными становятся структуры, известные для более тяжелых элементов той же группы. Высокие температуры ускоряют достижение равновесного, энергетически более выгодного состояния. Разные по своей физической природе электромагнитные процессы и явления, связанные с ними, протекают в зоне стружкообразования одновременно, переплетаются и представляют собой «жгут» взаимодействующих и взаимовлияющих энергетических образований, которые и формируют конечный результат обработки.

Практическое значение изменений заключается в возможности увеличения производительности труда по сравнению с нормативными режимами в 2 – 5 раз, создании новых типов станков, не имеющих аналогов в мировом станкостроении (зубообрабатывающих, токарных и других) повышающих производительность труда в 3 – 60 раз; новых способов формообразования сложных криволинейных поверхностей деталей, новых типов инструментов и материалов повышенной стойкости, получения обработанной поверхности высокого качества, лезвийной обработки закаленных сталей твердостью до HRC = 60...65, жаропрочных, нержавеющих, титановых и других трудно обрабатываемых материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарапанов, А.С. Математические основы виртуального представления и анализа процессов лезвийной обработки / А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов, В.С. Шоркин. – М.: Машиностроение. Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 23. – С 43–49.
2. Бестужева, Н.П. К исследованию нестационарных поверхностных волн в нелинейно упругих средах / Н.П. Бестужева, Г.И. Быковцев, В.Н. Дурова // Прикл. механика. – 1981. – Т. 17. – № 12. – С. 27–33.
3. Буренин, А.А. О распространении ударных возмущений в предварительно деформированной разномодульной упругой среде / А.А. Буренин, О.В. Дудко // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела: Сборник научных трудов. – Владивосток: ИМиМ ДВО РАН. – 1997. – С. 20–35.
4. Епифанов, Г.И. Физика твёрдого тела. Учебник для втузов / Г.И. Епифанов. – М.: Высшая школа, 1977. – 298 с.
5. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский М: Машиностроение, 2002. – 684 с.
6. Ярославцев, В.М. Методология совершенствования технологий промышленного производства и разработки новых методов обработки [Электронный ресурс] / В.М. Ярославцев. – М.: Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2012. – № 3. – С. 5.
7. Комаров, В.А. Повышение эффективности технологических операций на основе совершенствования обработки резанием / В.А. Комаров. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 164 с.
8. Овсяникова, И.В. Управление параметрами процесса формирования сложных поверхностей. / И.В. Овсяникова, А.С. Тарапанов, В.С. Шоркин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2012. – № 2. – С.56–60.
9. Чивилихин, С.А. Течения в наноструктурах: классические и квантовые модели / С.А. Чивилихин, В.В. Гусаров, И.Ю. Попов // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2012. – Т. 3. – № 1. – С. 7–26.

10. Строеение слитка кипящей стали [Электронный ресурс] URL: [http://emchezgia.ru/razlivka/9.1\\_slitok\\_kipyashey\\_stali.php](http://emchezgia.ru/razlivka/9.1_slitok_kipyashey_stali.php).

**Овсяникова Ирина Васильевна**  
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК  
Кандидат экономических наук,  
доцент  
Тел.: (4862) 41–98–34  
E-mail: [ovsyanikova2012@yandex.ru](mailto:ovsyanikova2012@yandex.ru)

**Тарапанов Александр Сергеевич**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» г. Орел  
Доктор технических наук,  
Профессор кафедры «Конструкторско–технологическое обеспечение машиностроительных производств»  
Тел:(4862)54–15–03  
E-mail: [tarapanov@yandex.ru](mailto:tarapanov@yandex.ru)

**Муравьев Андрей Александрович**  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» г. Орел  
Студент кафедры «Бухгалтерский учет и налогообложение»  
Тел: 8–900–484–27–30  
E-mail: [andrei-20101@yandex.ru](mailto:andrei-20101@yandex.ru)

I.V. OVSYANIKOVA, A.S. TARAPANOV, A.A. MURAVYOV

## **EMPOWERING COMPREHENSIVE METHOD OF ANALYSIS AND FORECASTING PROCESSES SHAPING WITH HIGH SPEEDS**

*The possibilities of modern metal cutting, equipment and tools are largely ahead of the established methods of research and forecasting prospective and newly created processes blade processing. The article discusses the mechanism of contact interaction and mutual fields of the tool and the workpiece when the blade treated with high and very high speed.*

**Keywords:** *blade processing, the energy field, mathematical model, high-speed cutting.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Tarapanov, A.S. Matematicheskiye osnovy virtualnogo predstavleniya i analiza protsessov lezviynoy obrabotki / A.S. Tarapanov, G.A. Kharlamov, V.S. Shorkin. – M.: Mashinostroyeniye. Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. – 2003. – № 23. – S 43–49.
2. Bestuzheva, N.P. K issledovaniyu nestatsionarnykh poverkhnostnykh voln v nelineyno uprugikh sredakh / N.P. Bestuzheva, G.I. Bykovtsev, V.N. Durova // Prikl. mekhanika. – 1981. – T.17. – № 12. – S. 27–33.
3. Burenin, A.A. O rasprostraneniі udarnykh vozmushcheniy v predvaritelno deformirovannoy raznomodulnoy uprugoy srede / A.A. Burenin, O.V. Dudko // Prikladnyye zadachi mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela: Sbornik nauchnykh trudov. – Vladivostok: IMiM DVO RAN. – 1997. – S. 20–35.
4. Yepifanov, G.I. Fizika tvordogo tela. Uchebnik dlya vtuzov / G.I. Yepifanov. – M.: Vysshaya shkola, 1977. – 298 s.
5. Suslov, A.G. Nauchnyye osnovy tekhnologii mashinostroyeniya / A.G. Suslov, A.M. Dalskiy M: Mashinostroyeniye, 2002. – 684 s.
6. Yaroslavtsev, V.M. Metodologiya sovershenstvovaniya tekhnologiy promyshlennogo proizvodstva i razrabotki novykh metodov obrabotki [Elektronnyy resurs] / V.M. Yaroslavtsev. – M.: Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno–tekhnicheskoye izdaniye. – 2012. – № 3. – S. 5.
7. Komarov, V.A. Povysheniye effektivnosti tekhnologicheskikh operatsiy na osnove sovershenstvovaniya obrabotki rezaniyem / V.A. Komarov. – M.: Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2002. – 164 s.
8. Ovsyanikova, I.V. Upravleniye parametrami protsessa formirovaniya slozhnykh poverkhnostey. / I.V. Ovsyanikova, A.S. Tarapanov, V.S. Shorkin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – № 2. – S.56–60.
9. Chivilikhin, S.A. Techeniya v nanostrukturakh: klassicheskiye i kvantovyye modeli / S.A. Chivilikhin, V.V. Gusarov, I.YU. Popov // Nanosistemy: fizika, khimiya, matematika. – 2012. – T. 3. – № 1. – C. 7–26.
10. Stroyeniye slitka kipyashchey stali [Elektronnyy resurs] URL: [http://emchezgia.ru/razlivka/9.1\\_slitok\\_kipyashey\\_stali.php](http://emchezgia.ru/razlivka/9.1_slitok_kipyashey_stali.php).

**Ovsyanikova Irina Vasilyevna**  
State University – ESPC  
PhD, Associate Professor  
Ph.: (4862) 41–98–34  
E-mail: [ovsyanikova2012@yandex.ru](mailto:ovsyanikova2012@yandex.ru)

**Tarapanov Aleksandr Sergeyevich**  
State University – ESPC  
Doctor of technical sciences, professor  
chair«Design and technological support  
for engineering industries», Orel  
Tel: (4862) 54–15–03  
E-mail: [tarapanov@yandex.ru](mailto:tarapanov@yandex.ru)

**Muravyov Andrey Aleksandrovich**  
State University – ESPC  
student, chair « accounting and taxation», Orel  
Тел: 8–900–484–27–30  
E-mail: [andrei-20101@yandex.ru](mailto:andrei-20101@yandex.ru)

Е.В. СМОЛЕНЦЕВ, Е.С. БОБРОВ

## ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

*Рассмотрены факторы, которые влияют на износ зубчатых передач и меры их предупреждения, описан алгоритм дефектации износа и технология ремонта зубчатых передач.*

*Ключевые слова:* износ зубчатых передач, дефектация износа, ремонт зубчатых передач.

Поверхности зубчатых колёс в процессе эксплуатации повреждаются вследствие контактного напряжения колёс или трения в местах их взаимодействия. Причиной возникновения повреждений являются погрешность при изготовлении зубчатых колёс, неправильная сборка или эксплуатация механизма. В соответствии с этим можно классифицировать повреждения зубчатых колёс по двум категориям.

### **1. Повреждение поверхности зубчатого колеса по причине воздействия контактного напряжения.**

1.1. Усталостное выкрашивание. Данное повреждение чаще всего встречается в закрытых зубчатых передачах с наличием большого количества смазки. Выкрашивание материала может быть ограниченным и прогрессирующим. Ограниченное усталостное выкрашивание связано с периодом приработки. В процессе приработки сглаживаются микронеровности контактных поверхностей, улучшается прилегание зубьев и следовательно ограниченное выкрашивание прекращается. Оно не является опасным и зубчатые колеса в дальнейшем можно эксплуатировать.

При прогрессивном выкрашивании страдает вся или большая часть длины зуба. При этом повышается контактное давление на еще целую часть поверхности зуба, выжимается смазка в раковины, повышается износ от абразивного действия выкрошившегося материала, усиливается смятие и заедание. Макротрещины на контактирующих поверхностях развиваются под действием касательных напряжений. Стойкость к выкрашиванию зависит от физико-химических свойств и толщины смазочного слоя. Предупредить износ можно путем повышения степени точности по нормам контакта зубьев и увеличения твердости металла при помощи термообработки.

1.2. Отслаивание поверхностного слоя. Прогрессирующее выкрашивание или питтинг может привести к отслаиванию упрочненного поверхностного слоя, которое характеризуется большими по глубине и по площади выкрошившимися ямками, которые могут распространяться по всей боковой поверхности зуба от полюса зацепления. Однако отслоение упрочненного слоя, связанное с действием глубинных контактных напряжений может возникнуть и независимо от появления питтинга. В любом случае отслоение упрочненного слоя является наиболее опасным видом усталостного поверхностного разрушения, т.к. может привести к уменьшению поперечного сечения зуба и его поломке под действием изгибающего усилия. Отслаивание является критерием работоспособности высоконапряженных зубчатых колёс, поверхностно упрочненных – цементированных, азотированных, поверхностно-закаленных. В отличие от питтинга он имеет совершенно иной механизм возникновения и развития усталостных трещин. На возникновение отслаивания основное влияние оказывают приведенные касательные напряжения, возникающие под действием контактных нагрузок и действующие на определенной глубине от поверхности. Избежать воздействия данного вида разрушения необходимо путём избежания чрезмерных воздействий и применения термообработки.

1.3. Пластические сдвиги. Данный вид деформации наблюдается у зубчатых колёс, изготовленных из мягкой стали и испытывающих большую нагрузку в процессе эксплуатации. Для избежания пластического сдвига необходимо повышение твердости поверхностного слоя зубьев.

### **2. Повреждение поверхности из-за трения.**

2.1. Абразивно–механический износ. Этому виду повреждения чаще всего подвергаются открытые или недостаточно защищённые зубчатые передачи. Между контактными поверхностями зубчатых попадают абразивные частицы извне или же продукты износа и происходит нарушение формы эвольвенты, что ведет к появлению вибрации и шума вследствие уменьшения площади контакта зубьев; увеличиваются зазоры и снижается прочности зубьев. В качестве мер по предупреждению абразивного износа применяют специальные масла в зависимости от условий эксплуатации зубчатых передач, используют зубчатые колёса с повышенной твердостью поверхностного слоя.

2.2 Заедание. К заеданию склонны высоконагруженные и высокоскоростные передачи. В зоне контакта передач имеется высокая температура. Защитная масляная пленка в критический момент разрывается, вследствие чего имеет место соприкосновение металлов участков взаимодействия. С ростом температуры происходит своеобразное сваривание частиц с их последующим отрывом от поверхности и появлением наростов. В результате происходит крошечный удар, который является причиной заедания. Во избежание этого рекомендуется использование специальных противозадирных масел с повышенной вязкостью и химически активными добавками и их охлаждение.

Прежде чем отправить механизм в ремонт, его необходимо осмотреть для проверки состояния и ремонтпригодности, а также комплектности.

Перед разборкой передачи её техническое состояние требуется изучить в соответствии с ГОСТом или ТУ, что поможет точнее оценить характер и степень повреждения и составить перечень работ по ремонту.

Необходимо сказать, что зубчатые колеса относятся к трудноснимающимся деталям, поскольку их сборка производится по неподвижным насадкам. Как следствие этого, практически невозможно при разборке сохранить начальную точность гнезда и вала.

Если избежать разборки невозможно, ее выполняют, как правило, с помощью прессов или гидравлических съемников. В таком случае необходимо изготавливать или восстанавливать детали так, чтобы сохранились первоначальные установочные базы.

При разборке нужно рассчитать силы запрессовки механизма.

Силу, необходимую для запрессовки (или распрессовки) деталей, определяют по формуле (1)

$$P = \frac{a \left( \frac{D}{d} + 0,3 \right) i t}{\frac{D}{d} + 6,35} \quad (1)$$

где P – сила запрессовки (распрессовки), т;  
 D – внутренний диаметр ступицы насаживаемой детали, мм;  
 d – наружный диаметр насаживаемой детали, мм;  
 i – натяг, мм;  
 t – длина ступицы насаживаемой детали, мм;  
 a – коэффициент, принимаемый для стали равным 7,5; для чугуна – 4,3.

При сборке охватывающие детали, как правило, нагревают до 75 – 450 °С. Нагрев производят в воде, масле, расплавленном свинце, при этом нельзя допускать окисления сопрягаемых поверхностей. Обычно стараются избегать нагрева открытым пламенем, так как оно может стать причиной возникновения больших внутренних напряжений в металле.

Оценить температуру нагрева t охватывающей детали, необходимую для разборки соединения, можно по эмпирической формуле (2):

$$t = \frac{2i}{ad} + t_1 \quad (2)$$

где d – диаметр сопряжения, мм;  
 a – коэффициент линейного расширения (сжатия);  
 t<sub>1</sub> – температура охватываемой детали.

На практике, обычно, при напрессовке (сборке) для получения посадочного натяга расчетную величину температуры нагрева охватывающей детали увеличивают в два раза, что позволяет значительно облегчить сборку.

В процессе ремонта должна быть составлена ведомость дефектов, которая играет роль исходного технического и финансового документа. То, насколько правильно и подробно

составлена ведомость дефектов, может существенно повлиять на технологический процесс ремонта механизма. Поэтому заполнение этого документа накладывает определенную ответственность, и обычно ведомость составляет технолог по ремонту оборудования при участии бригадира ремонтной бригады, мастера ремонтного цеха и представителей ОТК.

Дефектация – это операция, требующая большого внимания. Она производится после того, как детали промыты, просушены и укомплектованы. Сначала проводят осмотр каждой детали, затем проверяют ее размеры соответствующим проверочным или измерительным инструментом. В отдельных случаях (это касается и зубчатых передач), проверяют взаимодействие данной детали с другими, сопряженными с ней.

В ведомости дефектов необходимо подробно перечислить дефекты как всего механизма в целом, так и каждой детали в отдельности, нуждающейся в восстановлении и упрочнении.

Детали, которые проходят дефектацию, можно разделить на следующие группы:

- 1) пригодные для дальнейшей эксплуатации;
- 2) подлежащие ремонту или восстановлению;
- 3) негодные к ремонту, подлежащие замене.

Ремонту экономически целесообразно подвергать трудоемкие в изготовлении детали, при условии, что восстановление их обойдется значительно дешевле изготовления или приобретения новых.

Детали, относящиеся ко второй группе должны обладать запасом прочности, что позволит в процессе ремонта восстанавливать или заменять размеры сопрягаемых поверхностей (по системе ремонтных размеров). При этом их долговечность не должна снизиться (а желательно даже повыситься). Кроме того, в процессе ремонта эксплуатационные качества элементов и механизма в целом должны сохраниться или улучшиться.

К третьей группе относятся те детали, уменьшение размеров которых в результате износа мешает нормальной работе механизма или приводит к интенсивному изнашиванию, которое, как следствие, вызовет выход механизма из строя.

Для упрощения процесса дефектации используются заранее заготовленные типовые ведомости дефектов, что позволяет значительно сократить время на оформление и увеличить возможность (может вероятность) выявления всех дефектов.

Использование комбинированных методов обработки позволяет внести изменения в типовой процесс ремонта зубчатых колес редукторов.

В некоторых случаях можно избежать разборки редуктора и операций, связанных с ней (сборки, комплектации, восстановления баз). В таком случае можно будет избежать неточности, возникающей при напрессовке колес во время сборки, а также возможной потери установочных баз. Исключение вышеуказанных операций будет возможно при условии, что зубчатые колеса можно очистить и измерить без разборки узла. Основными ограничениями будут масса и габариты редуктора, а также возможности измерительного инструмента.

С учетом всего вышесказанного, можно составить алгоритм проектирования технологического процесса ремонта зубчатых колес комбинированным методом (рисунок 1).

Технология ремонта зубчатых колес редукторов методом комбинированной доводки будет состоять из следующих этапов:

1. Осмотр редуктора
2. Очистка от грязи, пыли и масла
3. Приемка редуктора в ремонт
4. Разборка редуктора. При этом в качестве оборудования используется пресс, слесарный инструмент.
5. Промывка деталей в промывочном растворе, например ОП7, при температуре 60 °С.
6. Дефектация деталей на специальных стендах.
7. Выбор зубчатых колес для восстановления.
8. Восстановление установочных баз с использованием специальных станков. Операция выполняется на токарно-винторезных, фрезерных, сверлильных станках. Биение по начальной окружности после обработки должно составлять не более 0,01 мкм.
9. Комплектация деталей на сборку.
10. Сборка редуктора. В качестве оборудования используется пресс.
11. Доводка зубчатых колес. Осуществляется по предложенной технологии комбини-

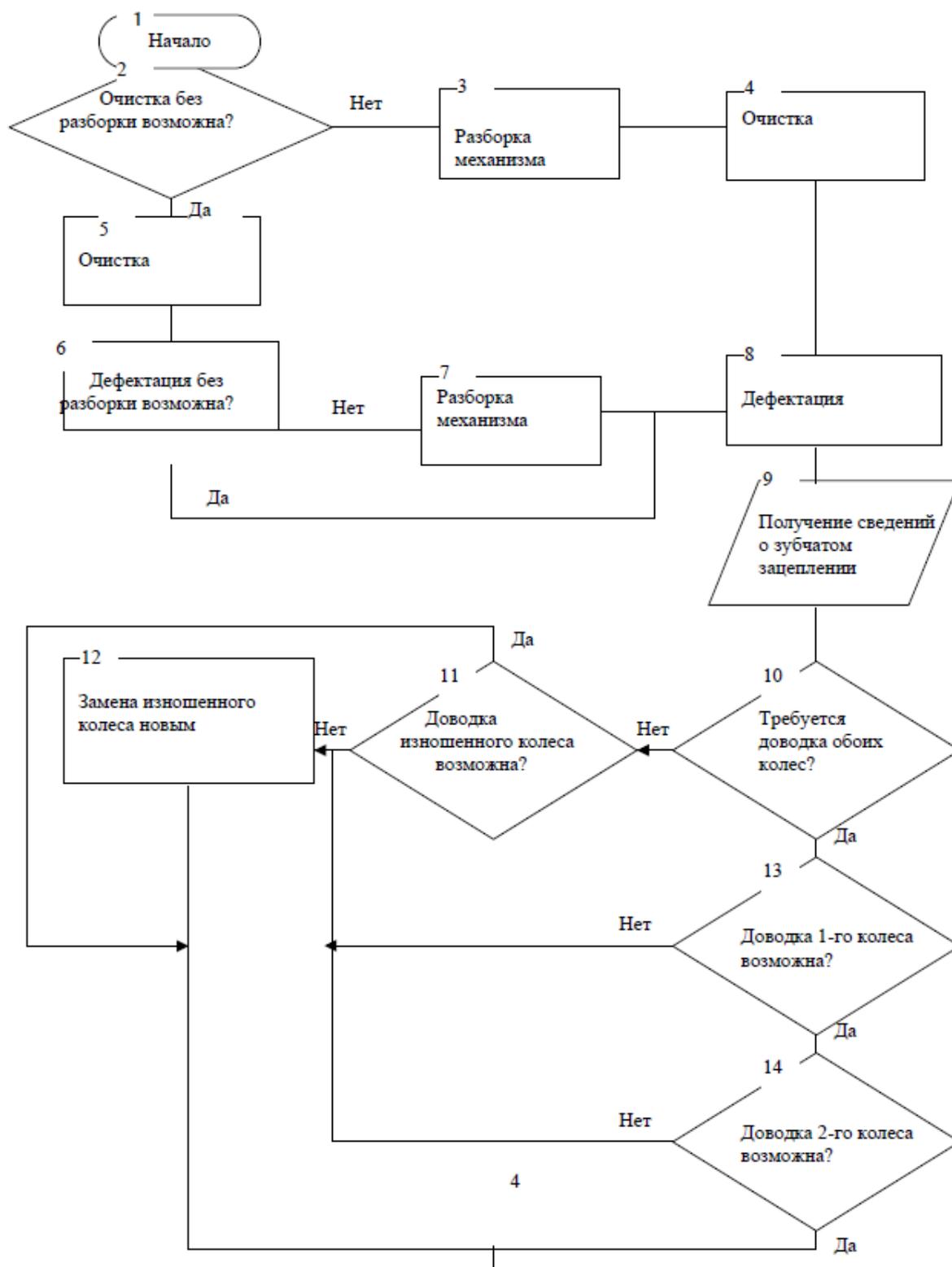
рованным методом на специальном оборудовании. В качестве электролита используется водный раствор хлористого натрия (с добавлением ингибитора коррозии) или станочная эмульсия. Межэлектродный зазор при обработке равен толщине оксидной пленки на поверхности зубьев (для расчетов принимается 8–10 мкм). Скорость вращения колес (около 0,5 м/с) должна обеспечивать вынос продуктов из зоны обработки.

12. Обкатка узла. Операция проводится до получения плавного хода зацепления.

13. Контроль профиля зубьев на специальных приборах.

14. Испытание узла проводится на испытательном стенде. При этом в любом угловом положении зубчатой пары момент трения должен составлять не более 0,4 Н·м.

15. Оформление документации.



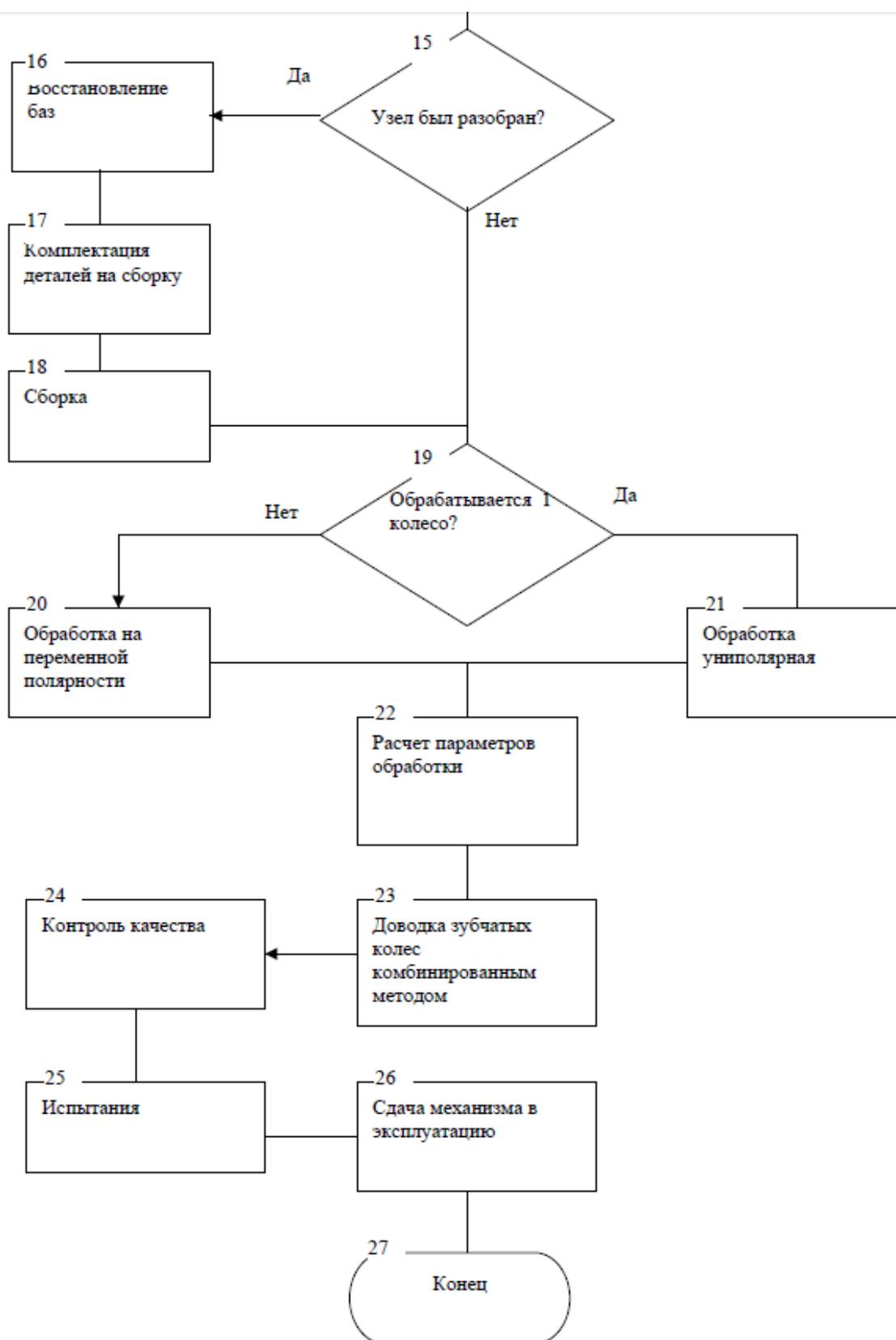


Рисунок 1 – Алгоритм проектирования процесса комбинированной доводки зубчатых колес при восстановлении профиля зуба

Комбинированная обработка позволяет исправить погрешности, допущенные на этапе сборки, так как на тех участках, где нарушена точность будет происходить изменение давления зубьев друг на друга, и произойдет повышенный сьем материала, т.е. снизится погрешность профиля.

Собирают отремонтированный механизм, руководствуясь требованиями сборочных чертежей, с целью обеспечить точность взаимного расположения всех его сборочных единиц и нормальное функционирование всех элементов. Перед этим грязь с деталей должна быть удалена, а обработанные в процессе ремонта поверхности промыты.

Испытания отремонтированных и отрегулированных механизмов проводятся в целях уточнения их пригодности для дальнейшей эксплуатации. Внешний осмотр и испытания позволяют более достоверно оценить техническое состояние отремонтированного механизма.

Испытывают отремонтированные механизмы, как на холостом ходу, так и в работе под нагрузкой (ГОСТ 7599–82). Нагрузка производится там, где они установлены, или на специальном стенде.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленцев, В.П. Технология электрических методов обработки: Учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев, В.И. Гунин. – Воронеж: ВГУ, 2001 – 310 с.
2. Смоленцев, В.П., Оптимизация технологических процессов обработки зубчатых колес с использованием базы данных / В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, Н.М. Бородин // Нетрадиционные технологии в технике, экономике и социальной сфере: Межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж. – 2000. – Вып. 2. – С. 25.
3. Смоленцев, Е.В. Доводка профиля зубчатых передач комбинированными методами / Е.В. Смоленцев, А.В. Писарев и др. // Современные проблемы и методология проектирования и производства силовых зубчатых колес. – Тула: Изд-во ТГУ. – 2000. – С. 314–317.
4. Смоленцев, Е.В. Режимы комбинированной доводки зубчатых колес. / Е.В. Смоленцев // Нетрадиционные технологии машиностроения и приборостроения. – Воронеж: изд-во ВГУ. – 2001. – Вып. 4. – С. 75–83.

#### Смоленцев Евгений Владиславович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
Доктор технических наук, зам. зав. кафедрой «Технология машиностроения»  
E-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

#### Бобров Евгений Сергеевич

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
E-mail: evgeny71job@gmail.com

---

E.V. SMOLENTSEV, E.S. BOBROV

## TECHNOLOGY OF REPAIR OF GEARINGS BY THE COMBINED METHODS

*Factors which influence wear of gearings and a measure of their prevention are considered, the algorithm of fault detection of wear and technology of a repair of gearings is described.*

**Keywords:** wear of gearings, fault detection, repair gearings.

### BIBLIOGRAPHY

1. Smolentsev, V.P. Tekhnologiya elektricheskikh metodov obrabotki: Ucheb. posobiye / V.P. Smolentsev, A.V. Kuzovkin, A.I. Boldyrev, V.I. Gunin. – Voronezh: VGU, 2001 – 310 s.
2. Smolentsev, V.P., Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov obrabotki zubchatykh koles s ispolzovaniyem bazy dannykh / V.P. Smolentsev, Ye.V. Smolentsev, N.M. Borodkin // Netraditsionnyye tekhnologii v tekhnike, ekonomike i sotsialnoy sfere: Mezhvuz. sb. nauch. tr. – Voronezh. – 2000. – Vyp. 2. – S. 25.
3. Smolentsev, Ye.V. Dovodka profilya zubchatykh peredach kombinirovannymi metodami / Ye.V. Smolentsev, A.V. Pisarev i dr. // Sovremennyye problemy i metodologiya proyektirovaniya i proizvodstva silovykh zubchatykh koles. – Tula: Izd-vo TGU. – 2000. – S. 314–317.
4. Smolentsev, Ye.V. Rezhimy kombinirovannoy dovodki zubchatykh koles. / Ye.V. Smolentsev // Netraditsionnyye tekhnologii mashinostroyeniya i priborostroyeniya. – Voronezh: izd-vo VGU, 2001. – Vyp. 4. – S. 75–83.

#### Smolentsev Evgeny Vladislavovich

Voronezh State Technical University, Voronezh  
Doctor of technical sciences, assistant manager of department «Technology of engineering»  
E-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

#### Bobrov Evgeny Sergeevich

Voronezh State Technical University, Voronezh  
Postgraduate of department «Technology of engineering»  
E-mail: evgeny71job@gmail.com

В.А. ГОЛЕНКОВ, С.Ю. РАДЧЕНКО, Д.О. ДОРОХОВ, И.М. ГРЯДУНОВ

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ВТУЛОК ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСНОГО ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПО ТРЕБУЕМЫМ ПАРАМЕТРАМ ИЗДЕЛИЙ

*В статье рассмотрена методика выбора параметров технологического процесса упрочняющей обработки многоцикловым пластическим деформированием в условиях комплексного локального нагружения. Предложены пути использования методики и дальнейшего её совершенствования.*

**Ключевые слова:** проектирование, технологический процесс, пластическое деформирование, комплексное локальное нагружение, механические параметры.

Современная экономика ставит более жёсткие требования к продукции машиностроительной отрасли. Изделия, как правило, работают в условиях повышенных температур, значительных знакопеременных и импульсных нагрузок и сильного трения. В некоторых случаях к этим факторам добавляется также агрессивная среда эксплуатации. Всё это приводит к необходимости разработки новых способов повышения эксплуатационных параметров деталей машин. С одной стороны, для решения поставленной задачи можно увеличивать габариты изделия, с другой – пойти по пути использования более прочного и износостойкого материала, однако и в первом, и во втором случае в значительной степени возрастает себестоимость производства. Примером таких изделий служат детали типа втулок – изделия, к которым предъявляются специальные требования по антифрикционным свойствам и которые, как правило, эксплуатируются в крайне тяжёлых условиях.

В связи с этим наиболее эффективным является применение того или иного способа упрочняющей обработки. В работах [1–3] рассмотрены достоинства и недостатки наиболее распространённых способов, а так же сделан вывод, что наиболее перспективным является применение способа [4–11], основанного на методе валковой штамповки [12–15]. Способ предназначен для упрочнения внутренней поверхности полых осесимметричных деталей, примером которых могут служить вкладыши подшипников скольжения.

Рассматриваемый способ апробирован на практике и имеются данные для разработки методики проектирования технологических процессов упрочняющей обработки в зависимости от требуемых характеристик получаемых изделий.

Как правило, проектирование многофакторных процессов обработки металлов давлением, в частности, технологий с комплексным локальным нагружением очага деформации, предполагает два варианта определения необходимых технологических параметров обработки в зависимости от требуемых свойств получаемого изделия:

1. Математическое моделирование процесса упрочняющей обработки [16–18] с целью установления интересующих откликов системы на заложенные параметры обработки (рисунок 1);
2. Использование предварительно подготовленных номограмм [16–21], применяемых для определения параметров обработки по требуемым выходным характеристикам.

В первом случае в модель вносятся исходные данные:

- сведения об обрабатываемом материале: кривая упрочнения, модуль сдвига, коэффициент трения;
- предполагаемые параметры обработки: глубина внедрения  $h_{вн}$ , шаг осевой подачи  $S$ , количество проходов  $n$ ;
- целевые показатели (опционально): приводится информация о параметрах, на которые необходимо выйти в процессе моделирования – максимальная степень упрочнения (в качестве которого выбран параметр микротвёрдости  $HV$ ) и глубина зоны упрочнения  $h$ ;

- геометрия инструмента: указываются геометрические параметры обрабатывающего инструмента;
- геометрия заготовки: приводится информация о геометрических характеристиках обрабатываемой заготовки;
- граничные условия: задаются граничные условия для инструмента и обрабатываемого изделия.

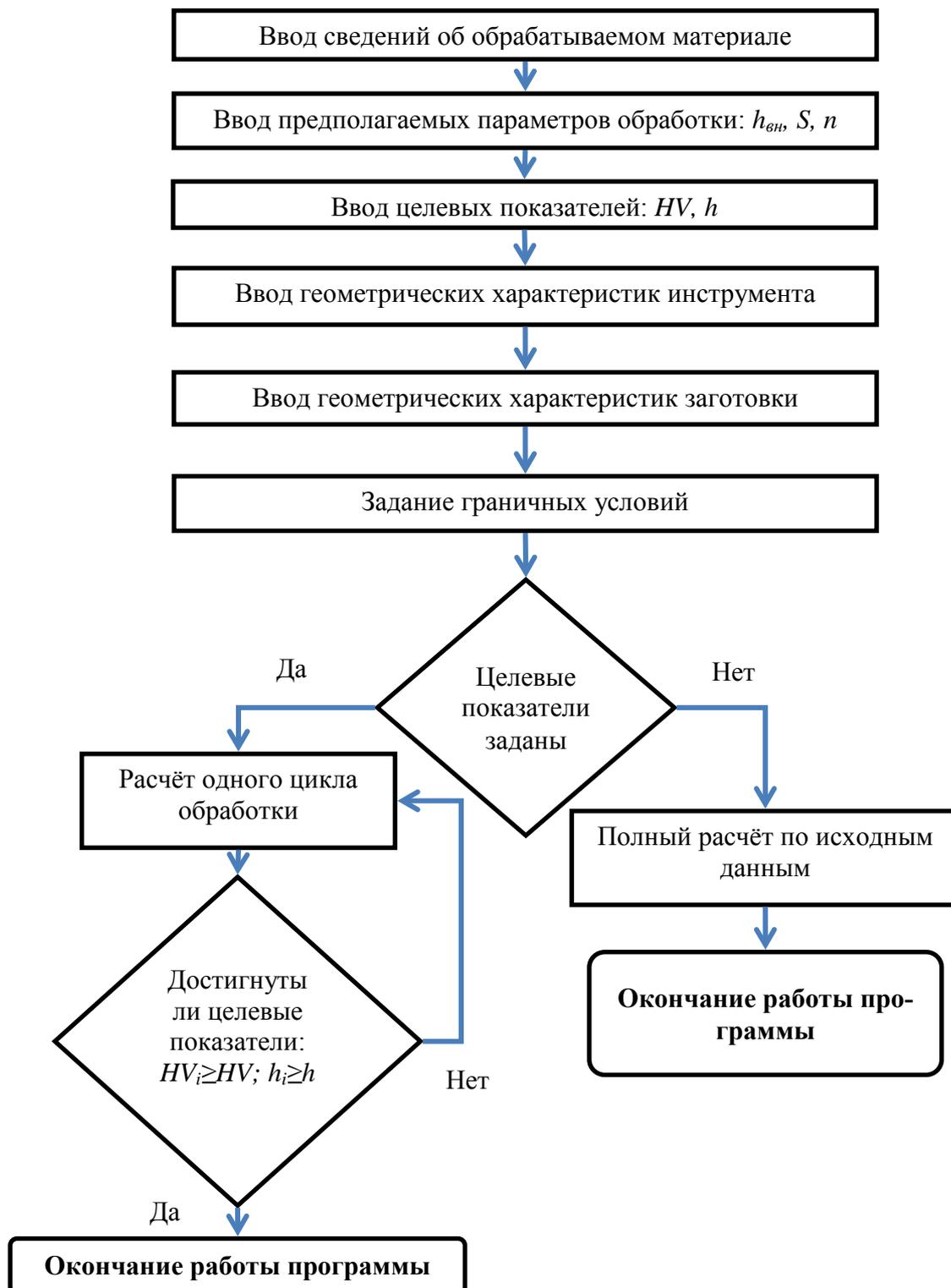


Рисунок 1 – Алгоритм определения параметров многоциклового упрочняющей обработки пластическим деформированием в условиях комплексного локального нагружения очага деформации с применением математического моделирования

После этого наступает стадия выполнения расчётов в соответствии с выбранной математической моделью и исходными данными. Для выполнения математической обработки вводимых исходных данных выбран пакет прикладных программ (ППП) «ШТАМП» [1, 16–18], разработанный авторским коллективом ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

На этапе обчёта модели возможны два варианта:

- полный просчёт модели в соответствии с указанными параметрами обработки;
- останов модели по достижении требуемых целевых показателей (если таковые были заданы). В этом случае модель возвращает параметры обработки, необходимые для достижения целевых показателей.

Авторским коллективом выполнялись экспериментальные и теоретические исследования рассматриваемого способа [22–24], по результатам которых установлена положительная динамика эволюции механических свойств обрабатываемых материалов. Данные, полученные в ходе исследований, позволяют составить предварительно подготовленные номограммы, которыми можно воспользоваться для определения параметров обработки в зависимости от требуемых выходных свойств изделия. Рассмотрим этот вариант подробнее. На рисунке 2 представлена номограмма, составленная для исходных не варьируемых параметров:  $h = 0.2 \text{ мм}$ ,  $d = 50 \text{ мм}$  при варьировании количества циклов обработки  $n = 1..30$  и шага продольной подачи  $S = 0.5, 0.7, 1.0 \text{ мм}$ .

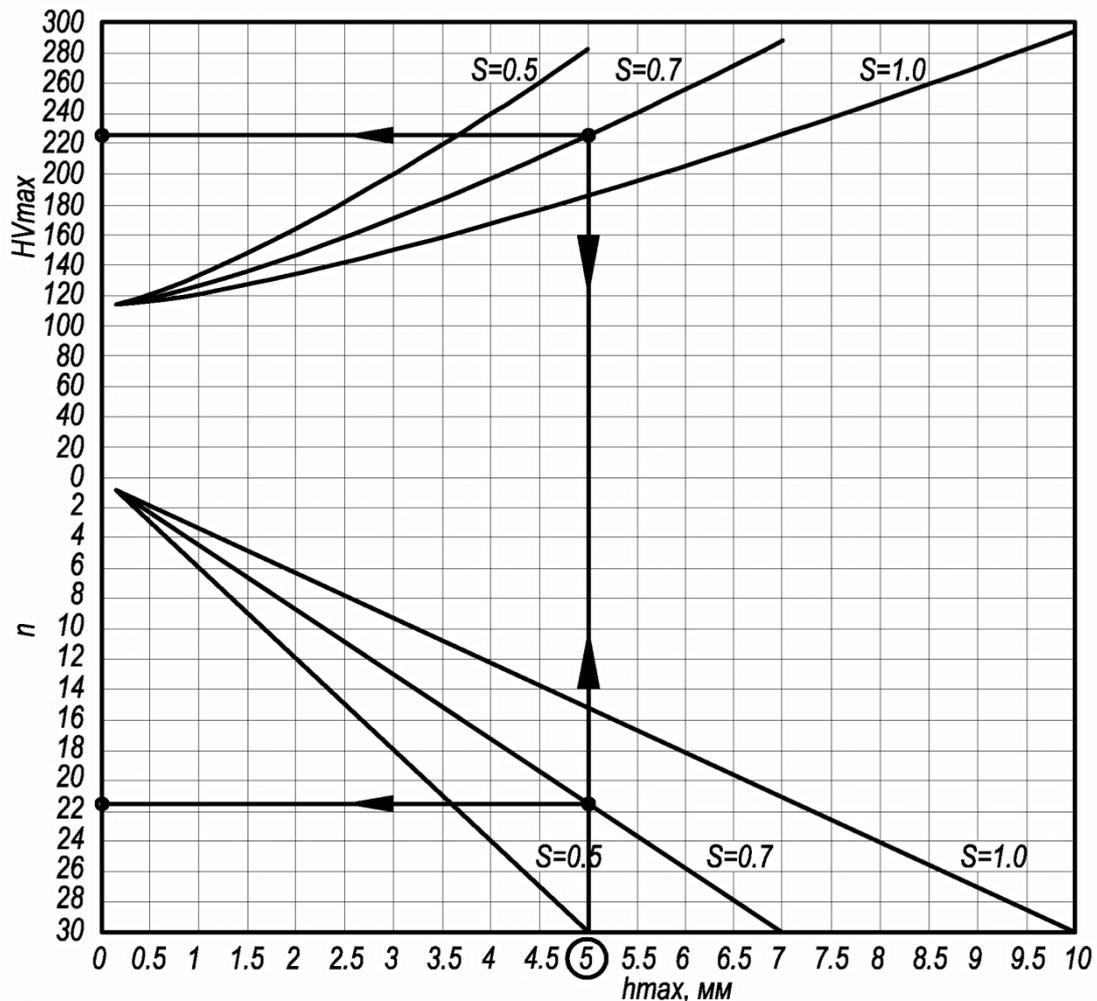


Рисунок 2 – Номограмма определения технологических параметров упрочняющей обработки по заданным характеристикам получаемого изделия

Номограммой следует пользоваться следующим образом:

1. Вначале необходимо выбрать требуемую максимальную глубину упрочнения  $h$ , мм (ось абсцисс). Например, зададимся  $h_{max} = 5 \text{ мм}$ ;

2. Затем, отталкиваясь от выбранной глубины  $h$ , поднимаемся вертикально вверх до пересечения с графиками степеней упрочнения и выбираем максимальную степень упрочнения (положительное направление оси ординат), одновременно с этим определяется и шаг продольной подачи  $S$  обрабатывающего инструмента. Например, примем  $HV_{max} = 230$ , тогда  $S = 0.7\text{ мм}$  соответственно;

3. От полученной точки спускаемся вертикально вниз до пересечения с графиком количества циклов обработки (отрицательное направление оси ординат), соответствующим шагу, для которого был составлен график степени упрочнения из предыдущего шага, тем самым определяя требуемое количество циклов обработки. Для рассматриваемого примера  $n = 21$ .

Результатом выполнения описанных шагов являются следующие параметры обработки:

- глубина внедрения  $h$ , мм;
- осевая подача инструмента  $S$ , мм;
- количество циклов обработки  $n$ , необходимых для достижения требуемых показателей;
- максимальная глубина упрочнённой зоны  $h_{max}$ , мм;
- максимальная микротвердость поверхностного слоя  $HV_{max}$ .

Для выбора исходных геометрических параметров заготовки необходимо к требуемому номинальному диаметру изделия добавить припуск на последующую механическую обработку согласно рекомендациям общего машиностроения. Т.к. обрабатывается внутренняя поверхность полого осесимметричного изделия, то исходный диаметр необходимо уменьшить на эту величину.

Таким образом, можно заключить, что для рассматриваемой перспективной технологии упрочнения полых осесимметричных деталей, примером которых могут являться вкладыши подшипников скольжения, возможны два варианта проектирования технологического процесса: выполнение расчётов в пакетах прикладных программ с применением математической модели [1, 16–18] или использование предварительно подготовленных номограмм, применяемых для определения параметров обработки в зависимости от требуемых выходных параметров изделия: глубины внедрения  $h$ , мм; осевой подачи инструмента  $S$ , мм и количества циклов обработки  $n$ , необходимых для достижения требуемых показателей: максимальной глубины упрочнённой зоны  $h_{max}$ , мм и максимального значения параметра микротвердости поверхностного слоя  $HV_{max}$ .

С точки зрения практического применения в машиностроительной отрасли наиболее перспективным является второй вариант, т.к. его применение в значительной степени экономит время, затрачиваемое технологом на подготовку производства. В перспективе же планируется расширение перечня номограмм на другие материалы и формы инструмента, для чего будет использовано математическое моделирование рассмотренного процесса с применением ППП «ШТАМП» и последующим экспериментальным подтверждением полученных результатов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания для ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» № 602 «Создание научно-технологических основ упрочнения комплексным локальным деформированием деталей узлов и агрегатов автомобильного транспорта». Исследования проводились с применением оборудования Орловского регионального Центра коллективного пользования контрольно-измерительным и испытательным оборудованием, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голенков, В.А. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, Г.П. Короткий. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», Орел: Госуниверситет–УНПК, 2013. – 122 с.
2. Голенков, В.А. Классификация процессов комплексного локального деформирования / В.А. Голенков С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядун // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 6. – С. 85–89.
3. Голенков, В.А. Анализ видов упрочняющей обработки пластическим деформированием / В.А. Голенков С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядун // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 1. – С. 59–62.
4. Голенков, В.А. Перспективы применения технологии «валковая штамповка» для получения градиентных субмикро- и наноструктурных материалов / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов. // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Вып. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2008. – С. 123–128.

5. Голенков, В.А. Формирование градиентных субмикро– и наноструктурных состояний комплексным локальным нагружением очага деформации / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 3. – С. 54–56.
6. Голенков, В.А. Создание градиентных структур на основе метода валковой штамповки / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, О.В. Дорофеев, Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ. – 2009. – № 3/275 (561). – С.42–46.
7. Голенков, В.А. Научно-технологическая обработка давлением с комплексным локальным нагружением очага деформации / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов // Научно-технологические проблемы машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 31–37.
8. Дорохов, Д.О. Управляемое формирование механических свойств в изделиях методом комплексного локального деформирования / Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ. – Орел, ОрелГТУ. – 2011. – № 4(288). – С 31–37
9. Голенков, В.А. К вопросу о повышении эксплуатационных характеристик полых осесимметричных деталей машин методами интенсивной пластической деформации/ Голенков В.А., Радченко С.Ю., Дорохов Д.О., Грядун И.М. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 6. – С. 71–77.
10. Голенков, В.А. Создание градиентных наноструктур в осесимметричных изделиях / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядун // Наноинженерия. – 2012. – № 5. – С. 18–22.
11. Грядун, И.М. Упрочнение деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения: автореферат дисс.... кандидата технических наук: 05.02.09 / Грядун Игорь Михайлович; ФГБОУ ВПО Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс. – Орел, 2013.
12. Пат. 2340423 РФ, В 24 В 39/04. Способ получения металлических втулок / В.А. Голенков, В.Г. Малинин, С.Ю. Радченко, Г.П. Короткий, Д.О. Дорохов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». № 2007110990/02; заявл. 26.03.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 13.
13. Пат. 2387514 РФ, В21D 51/02. Способ получения металлических втулок с градиентной субмикро– и нанокристаллической структурой / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». № 2008146756/02; заявл. 26.11.2008; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.
14. Пат. 2389580 РФ, В21D 51/02. Способ получения металлических втулок с градиентной субмикро– и нанокристаллическим состоянием материала / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». № 2008146754/02; заявл. 26.11.2008; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.
15. Пат. 2462327 РФ, МПК В21Н1/22. Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочнённой структурой / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, И.М. Грядун; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». №2010153917/02; заявл. 27.12.2010; опубл. 27.09.2012, Бюл. №27.
16. Голенков, В.А. Математическое моделирование упрочняющей валковой штамповки / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОрелГТУ. – 2009. – № 4/276(575). – С.54–58.
17. Голенков, В.А. Математическая модель упрочняющей обработки внутренней поверхности деталей типа втулок интенсивной пластической деформацией в условиях комплексного локального нагружения очага деформации / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядун, П.Г. Морев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 5. – С. 40–47.
18. Голенков, В.А. Постановка задачи оптимизации геометрии инструмента при комплексном локальном деформировании / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, А.А. Кисловский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 3(305). – С. 86–91.
19. Голенков, В.А. Разработка конструкции экспериментальной установки для получения изделий с градиентными субмикро– и наноструктурными состояниями вещества на основе валковой штамповки / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 2/270(545). – С. 53–55.
20. Голенков, В.А. Применение комплексного локального нагружения при формировании градиентных механических свойств / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, О.В. Дорофеев, Д.О. Дорохов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 10. – С. 22–25.
21. Радченко, С.Ю. Экспериментальное исследование упрочняющей обработки внутренней поверхности вкладышей подшипников скольжения в условиях комплексного локального нагружения очага деформации / С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядун // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 3 (42). – С. 67–76.
22. Голенков, В.А. Методика исследования влияния геометрии формообразующего инструмента на упрочнение деталей машин методами комплексного локального деформирования / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, А.А. Кисловский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 2. – С. 97–104.
23. Radchenko, S.Yu. The volumetric surface hardening of hollow axisymmetric parts by roll stamping method / S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2015. – Vol. 50. – Iss. 1. – p.p. 104–112.
24. Радченко, С.Ю. Новые технологические схемы упрочняющей обработки вкладышей подшипников скольжения в условиях комплексного локального нагружения очага деформации / С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядун // Мир транспорта и технологических машин. – 2014. – № 4 (47). – С. 47–54.

**Голенков Вячеслав Александрович**  
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел  
доктор технических наук, профессор, президент  
университета  
Тел. (4862) 420024,  
E-mail: admin@ostu.ru

**Радченко Сергей Юрьевич**  
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел  
доктор технических наук, профессор, проректор  
Тел. (4862) 437125  
E-mail: radsu@rambler.ru

**Дорохов Даниил Олегович**  
Мценский филиал ФГБОУ ВПО Госуниверситет –  
УНПК, г. Мценск  
кандидат технических наук, доцент  
Тел. (48646) 25689  
E-mail: ddostu@mail.ru

**Грядунов Игорь Михайлович**  
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орел  
кандидат технических наук, доцент  
Тел. (4862) 419841  
E-mail: fry14@yandex.ru

---

V.A. GOLENKOV, S.YU. RADCHENKO, D.O. DOROKHOV, I.M. GRYADUNOV

## THE TECHNOLOGICAL PROCESS DESIGN METHOD OF BUSH TYPE PARTS HARDENING BY PLASTIC DEFORMATION IN COMPLEX LOCAL LOADING CONDITIONS ON REQUIRED PARTS PARAMETERS

*In the article the method of parameters of hardening processing by high-cycle plastic deformation in complex local loading conditions technological process selection has been considered. The ways of method application and its further development have been offered.*

**Keywords:** *design, technological process, plastic deformation, complex local loading, mechanical parameters.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Golenkov, V.A. Nauchnyye osnovy uprochneniya kompleksnym lokalnym deformirovaniyem / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, G.P. Korotkiy. – M.: ООО «Izdatelstvo Mashinostroyeniye», Orel: Gosuniversitet–UNPK, 2013. – 122 s.
2. Golenkov, V.A. Klassifikatsiya protsessov kompleksnogo lokalnogo deformirovaniya / V.A. Golenkov S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2010. – № 6. – S. 85–89.
3. Golenkov, V.A. Analiz vidov uprochnyayushchey obrabotki plasticheskim deformirovaniyem / V.A. Golenkov S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 1. – S. 59–62.
4. Golenkov, V.A. Perspektivy primeneniya tekhnologii «valkovaya shtampovka» dlya polucheniya gradiyentnykh submikro– i nanostrukturnykh materialov / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov. // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki. Vyp. 2. – Tula: Izd-vo TulGU. – 2008. – S. 123–128.
5. Golenkov, V.A. Formirovaniye gradiyentnykh submikro– i nanostrukturnykh sostoyaniy kompleksnym lokalnym nagruzheniyem ochaga deformatsii / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. – 2009. – № 3. – S. 54–56.
6. Golenkov, V.A. Sozdaniye gradiyentnykh struktur na osnove metoda valkovoy shtampovki / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, O.V. Dorofeyev, D.O. Dorokhov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OrelGTU. – 2009. – № 3/275 (561). – S.42–46.
7. Golenkov, V.A. Naukoyemkaya tekhnologiya obrabotki davleniyem s kompleksnym lokalnym nagruzheniyem ochaga deformatsii / V.A. Golenkov S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2011. – № 3. – S. 31–37.
8. Dorokhov, D.O. Upravlyayemoye formirovaniye mekhanicheskikh svoystv v izdeliyakh metodom kompleksnogo lokalnogo deformirovaniya / D.O. Dorokhov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OrelGTU. – Orel, OrelGTU. – 2011. – № 4(288). – S 31–37.
9. Golenkov, V.A. K voprosu o povyshenii ekspluatatsionnykh kharakteristik polykh osesimmetrichnykh detaley mashin metodami intensivnoy plasticheskoy deformatsii/ Golenkov V.A., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2012. – № 6. – S. 71–77.
10. Golenkov, V.A. Sozdaniye gradiyentnykh nanostruktur v osesimmetrichnykh izdeliyakh / V.A. Golenkov S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov // Nanoinzheneriya. – 2012. – № 5. – S. 18–22.

11. Gryadunov, I.M. Uprochneniye detaley tipa vtulok intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey v usloviyakh kompleksnogo lokalnogo nagruzheniya: avtoreferat diss.... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.02.09 / Gryadunov Igor Mikhaylovich; FGBOU Gosudarstvennyy universitet – uchebno–nauchno–proizvodstvennyy kompleks. – Orel, 2013.
12. Pat. 2340423 RF, B 24 B 39/04. Sposob polucheniya metallicheskih vtulok / V.A. Golenkov, V.G. Malinin, S.Yu. Radchenko, G.P. Korotkiy, D.O. Dorokhov; zayavitel i patentoobladatel GOU «OrelGTU». № 2007110990/02; zayavl. 26.03.2007; opubl. 10.12.2008, Byul. № 13.
13. Pat. 2387514 RF, B21D 51/02. Sposob polucheniya metallicheskih vtulok s gradiyentnoy submikro– i nanokristallicheskoy strukturoy / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov; zayavitel i patentoobladatel GOU «OrelGTU». № 2008146756/02; zayavl. 26.11.2008; opubl. 27.04.2010, Byul. № 12.
14. Pat. 2389580 RF, B21D 51/02. Sposob polucheniya metallicheskih vtulok s gradiyentnoy submikro– i nanokristallicheskim sostoyaniyem materiala / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov; zayavitel i patentoobladatel GOU «OrelGTU». № 2008146754/02; zayavl. 26.11.2008; opubl. 20.05.2010, Byul. № 14.
15. Pat. 2462327 RF, MPK B21H1/22. Sposob polucheniya metallicheskih vtulok s gradiyentno–uprochnonnoy strukturoy / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, I.M. Gryadunov; zayavitel i patentoobladatel GOU «OrelGTU». №2010153917/02; zayavl. 27.12.2010; opubl. 27.09.2012, Byul. №27.
16. Golenkov, V.A. Matematicheskoye modelirovaniye uprochnyayushchey valkovoy shtampovki / V.A. Golenkov, S.YU. Radchenko, D.O. Dorokhov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OrelGTU. – 2009. – № 4/276(575). – S.54–58.
17. Golenkov, V.A. Matematicheskaya model uprochnyayushchey obrabotki vnutrenney poverkhnosti detaley tipa vtulok intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey v usloviyakh kompleksnogo lokalnogo nagruzheniya ochaga deformatsii / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov, P.G. Morev // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 5. – S. 40–47.
18. Golenkov, V.A. Postanovka zadachi optimizatsii geometrii instrumenta pri kompleksnom lokalnom deformirovanii / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, A.A. Kislovskiy // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 3(305). – S. 86–91.
19. Golenkov, V.A. Razrabotka konstruksii eksperimentalnoy ustanovki dlya polucheniya izdeliy s gradiyentnymi submikro– i nanostrukturnymi sostoyaniyami veshchestva na osnove valkovoy shtampovki /V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2008. – № 2/270(545). – S. 53–55.
20. Golenkov, V.A. Primeneniye kompleksnogo lokalnogo nagruzheniya pri formirovanii gradiyentnykh mekhanicheskikh svoystv / V.A. Golenkov, S.Yu. Radchenko, O.V. Dorofeyev, D.O. Dorokhov // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii. – 2009. – № 10. – S. 22–25.
21. Radchenko, S.Yu. Eksperimentalnoye issledovaniye uprochnyayushchey obrabotki vnutrenney poverkhnosti vkladyshey podshipnikov skolzheniya v usloviyakh kompleksnogo lokalnogo nagruzheniya ochaga deformatsii / S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. – 2013. – № 3 (42). – S. 67–76.
22. Golenkov, V.A. Metodika issledovaniya vliyaniya geometrii formoobrazuyushchego instrumenta na uprochneniye detaley mashin metodami kompleksnogo lokalnogo deformirovaniya / V.A. Golenkov, S.YU. Radchenko, D.O. Dorokhov, A.A. Kislovskiy // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 2. – S. 97–104.
23. Radchenko, S.Yu. The volumetric surface hardening of hollow axisymmetric parts by roll stamping method / S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2015. – Vol. 50. – Iss. 1. – p.p. 104–112.
24. Radchenko, S.Yu. Novyye tekhnologicheskiye skhemy uprochnyayushchey obrabotki vkladyshey podshipnikov skolzheniya v usloviyakh kompleksnogo lokalnogo nagruzheniya ochaga deformatsii / S.Yu. Radchenko, D.O. Dorokhov, I.M. Gryadunov // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. – 2014. – № 4 (47). – S. 47–54.

**Golenkov Vyacheslav Aleksandrovich**

State University – ESPC, Orel  
Dr., prof., president of university  
Ph.: (4862) 420024,  
E–mail: admin@ostu.ru

**Radchenko Sergey Jurevich**

State University – ESPC, Orel  
Dr., prof., pro–rector  
Ph.: (4862) 437125  
E–mail: radsu@rambler.ru

**Dorokhov Daniil Olegovich**

Mtsensk branch of State University – ESPC, Mtsensk  
Ph.D, docent  
Ph.: (48646) 25689  
E–mail: ddostu@mail.ru

**Gryadunov Igor Mihailovich**

State University – ESPC, Orel  
Ph.D, docent  
Ph.: (4862) 419841  
E–mail: fry14@yandex.ru

В.М. КОРНЕЕВА, С.С. КОРНЕЕВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ РЕЗАНИЯ

Разработана математическая модель расчета силовых нагрузок, действующих на режущий инструмент при сверхскоростном резании металлов. В основу положена модель стружкообразования обработки со сверхвысокими скоростями, в которой процесс протекания пластической деформации в зонах первичной и вторичной деформаций представлен линиями скольжения двойной кривизны. Рассмотрены две расчетные схемы, отличные друг от друга формой начальной границы стружкообразования, что связано с изменением роли изгиба в процессе формирования стружки в зависимости от условий обработки. Используя положения теории пластичности, рассмотрено изменение нагруженного состояния в зоне стружкообразования. Показано, что при обработке со сверхвысокими скоростями помимо сил, затрачиваемых на преодоление пластических деформаций в зоне стружкообразования и на преодоление трения на передней поверхности, необходимо учитывать влияние силы инерции, источником которой является изменение количества движения системы, которая может составлять до 90% от усилия резания. Предложенная математическая модель позволяет проводить не только расчеты нагрузок, действующих на режущий инструмент, но и дает возможность получить картину стружкообразования для конкретных условий обработки.

**Ключевые слова:** сверхвысокие скорости резания, модель процесса стружкообразования, пластические деформации, сила резания.

Для исследования силового нагружения режущего инструмента при обработке со сверхвысокими скоростями была разработана модель процесса стружкообразования. Использован известный из теории пластичности метод линий скольжения, позволяющий наиболее полно отразить физические особенности протекающих процессов в зонах первичной и вторичной деформаций.

За основу при построении линий скольжения пластического деформирования при сверхскоростной обработке была использована модель стружкообразования при обычных скоростях, предложенная Н.Н. Зоревым, достоверность которой подтвердили многочисленные экспериментальные исследования. При этом учитывались высокие скорости деформации, степени деформации и температура, которые сопровождают процесс сверхскоростного резания и оказывают значительное влияние на сопротивление пластической деформации. В отличие от обработки со сверхвысокими скоростями вследствие эффекта запаздывания текучести зона стружкообразования будет сужаться. Зона вторичных деформаций также будет сужаться, что обусловлено высокими контактными температурами, способствующими снижению сил трения (рисунок 1).

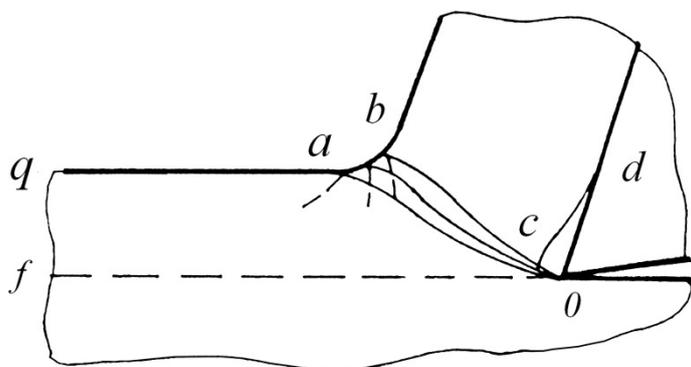


Рисунок 1 – Модель стружкообразования при обработке со сверхвысокими скоростями резания



Из рисунка 2 видно, что угол  $\mathcal{G}$  состоит из угла  $\delta_{ba}$ , и  $\delta_{a0}$ , тогда выражение (2) примет вид:

$$\sigma_0 = -m_d K (1 \pm 2\delta_{ba} + 2\delta_{a0}).$$

По мере удаления от начальной границы зона стружкообразования при повороте линии скольжения на угол  $\varepsilon$  в окрестности точки  $O$  происходит увеличение среднего напряжения сжатия вдоль линии  $\eta$  на величину  $2K\varepsilon$ . Учитывая это, среднее напряжение сжатия в точке  $O$  определяется из выражения:

$$\sigma_0 = -m_d K (1 \pm 2\delta_{ba} + 2\delta_{a0} + 2\varepsilon). \quad (3)$$

Но в точке  $O$  напряжение сжатия можно определить из условия равновесия на контакте:

$$\sigma_0 = q_0 + m_k \sin \chi, \quad (4)$$

где  $m_k$  – коэффициент, показывающий во сколько раз постоянная предела текучести на контакте меньше постоянной предела текучести при статических испытаниях ( $m_k = K_k/K$ );

$q_0$  – максимальное контактное нагружение.

Приравняв уравнения (3) и (4) и проведя соответствующие преобразования, получим:

$$\frac{q_0}{K} - m_k K \sin 2\chi - m_d (1 \pm 2\delta_{ba} + 2\delta_{a0} + 2\varepsilon) = 0. \quad (5)$$

Определим напряжения сжатия в произвольных точках  $a_1$  и  $b_1$  на начальной границе зоны стружкообразования:

$$\begin{aligned} \sigma_{b1} - \sigma_b &= \pm 2m_d K \mathcal{G}; \\ \sigma_{b1} &= -m_d K (1 \pm 2\delta'_{bb1}); \\ \sigma_{a1} - \sigma_b &= \pm 2m_d K \mathcal{G}; \\ \sigma_{a1} &= -m_d K (1 \pm 2\delta_{ba} + 2\delta_{aa1}). \end{aligned}$$

Составим уравнение равновесия для корня стружки как сумму проекций всех сил на ось  $x$  для первой схемы (рисунок 2, а) и, подставив значения  $\sigma_{b1}$  и  $\sigma_{a1}$ , после соответствующих преобразований получим:

$$\begin{aligned} m_d \{ \bar{R}_1 + (1 + 2\delta_{ba}) \cos \delta_{ba} (\bar{R}_2 - \bar{R}_1) + \sin \delta_{ba} (\bar{R}_1 - \bar{R}_2) + \\ + [ \sin (\delta_{ba} + \delta_{a0}) - (1 + 2\delta_{ba} + 2\delta_{a0}) \cos (\delta_{ba} + \delta_{a0}) ] \bar{R}_2 \} + \\ + \bar{N} \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) - \bar{F} \sin \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения решаем в относительных величинах, где:

$$\bar{R}_1 = R / a', \quad \bar{R}_2 = R_2 / a', \quad \bar{N} = N / Ka', \quad \bar{F} = F / Ka'.$$

Для второй расчетной схемы (рисунок 2, б) после преобразования получим:

$$\begin{aligned} -m_d \{ \bar{R}_1 - (\bar{R}_1 + \bar{R}_2) [ (1 - 2\delta_{ba}) \cos \delta_{ba} + \sin \delta_{ba} ] + \\ + \bar{R}_2 [ (1 + 2\delta_{a0} - 2\delta_{ba}) \cos (\delta_{ba} + \delta_{a0}) - \sin (\delta_{a0} - \delta_{ba}) ] \} + \\ + \bar{N} \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) - \bar{F} \sin \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) = 0. \end{aligned} \quad (6a)$$

Сумма проекций всех сил на ось  $y$  для первой схемы после преобразования будет иметь вид:

$$\begin{aligned} m_d \{ (\bar{R}_1 - \bar{R}_2) [ (1 + 2\delta_{ba}) \sin \delta_{ba} + \cos \delta_{ba} ] + \bar{R}_2 [ (1 + \\ + 2\delta_{ba} + 2\delta_{a0}) \sin (\delta_{ba} + \delta_{a0}) + \cos (\delta_{ba} + \delta_{a0}) ] - \bar{R}_1 \} - \\ - \bar{N} \sin \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) - \bar{F} \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Для второй расчетной схемы:

$$m_d \left\{ (\bar{R}_1 - \bar{R}_2) [(1 - 2\delta_{ba}) \sin \delta_{ba} - \cos \delta_{ba}] + \bar{R}_2 [(1 - 2\delta_{ba} + 2\delta_{a0}) \sin (\delta_{a0} - \delta_{ba}) + \cos (\delta_{a0} - \delta_{ba})] - \bar{R}_1 \right\} - \bar{N} \sin \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) - \bar{F} \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) = 0. \quad (7a)$$

Составим уравнения суммы моментов относительно точки  $O_2$ . Перенесем силы  $\sigma_{b1} R_1 d\vartheta$  и  $m_d K R_1 d\vartheta$  в точку  $O_1$  и определим их проекции на направление, перпендикулярное  $O_1 O_2$ . Силу  $N$  переносим в точку  $O$ . Из геометрических соображений устанавливаем, что угол между  $OO_2$  и передней гранью инструмента равен  $\varepsilon - \chi$ , после преобразований будем иметь:

$$m_d \left\{ \bar{R}_1 (\bar{R}_1 - \bar{R}_2) [1 + 2\delta_{ba} - \sin \delta_{ba} - \cos \delta_{ba}] - \bar{R}_1^2 \delta_{ba} - \bar{R}_2^2 \delta_{a0} \right\} - \frac{\bar{N}l}{n+2} + \bar{R}_2 [\bar{N} \cos (\varepsilon - \chi) + \bar{F} \cos (\varepsilon - \chi)] = 0. \quad (8)$$

Для второй расчетной схемы:

$$m_d \left[ \bar{R}_1^2 \delta_{ba} + \bar{R}_1 (\bar{R}_1 - \bar{R}_2) (1 - 2\delta_{ba} + \sin \delta_{ba} - \cos \delta_{ba}) - \bar{R}_2^2 \delta_{a0} \right] - \frac{\bar{N}l}{n+2} + \bar{R}_2 [\bar{N} \cos (\varepsilon - \chi) + \bar{F} \cos (\varepsilon - \chi)] = 0. \quad (8a)$$

В полученных четырех уравнениях: в уравнении равновесия напряжений в точке  $O$  (4) и в уравнениях равновесия стружки (6), (7), (8) имеем 7 неизвестных:  $R_1, R_2, q_0, \delta_{ba}, \delta_{a0}, \varepsilon, l$ , т.е. имеем статически неопределенный тип задачи. Поэтому недостающие уравнения составляем, используя геометрические отношения. Определим проекцию начальной границы очага пластической деформации на направление, перпендикулярное линии среза, равное толщине срезаемого слоя  $a'$ , и проведя соответствующие преобразования, получим:

Для первой расчетной схемы:

$$\bar{R}_1 \left[ \sin \left( \frac{\pi}{4} + \delta_{ba} \right) - \sin \frac{\pi}{4} \right] + \bar{R}_2 \left[ \sin \left( \frac{\pi}{4} + \delta_{ba} + \delta_{a0} \right) - \sin \left( \frac{\pi}{4} + \delta_{ba} \right) \right] - 1 = 0. \quad (9)$$

Для второй расчетной схемы:

$$\bar{R}_1 \left[ \sin \frac{\pi}{4} - \sin \left( \frac{\pi}{4} - \delta_{ba} \right) \right] + \bar{R}_2 \left[ \sin \left( \frac{\pi}{4} - \delta_{ba} + \delta_{a0} \right) - \sin \left( \frac{\pi}{4} - \delta_{ba} \right) \right] - 1 = 0. \quad (10)$$

Проектируя начальную границу очага пластической деформации  $oab$  на направление резания и предварительно условно приняв, что линия  $oab$  выходит на свободную границу в точку  $b_2$  под углом  $\pi/4$ , имеем, что проекция линии  $oab$  будет равна  $\frac{a_c}{\cos \gamma} - a' \operatorname{tg} \gamma$ :

для первой расчетной схемы:

$$\bar{R}_1 \left[ \sin \frac{\pi}{4} - \sin \left( \frac{\pi}{4} - \delta_{ba} \right) \right] + \bar{R}_2 \left[ \sin \left( \frac{\pi}{4} - \delta_{ba} \right) - \sin \left( \frac{\pi}{4} - \delta_{ba} - \delta_{a0} \right) \right] - \frac{\bar{a}_c}{\cos \gamma} + \operatorname{tg} \gamma = 0, \quad (11)$$

где  $a_c$  – толщина стружки;

$\bar{a}_c$  – соответствует коэффициенту утолщения стружки  $K_a$ ;

для второй расчетной схемы:

$$\bar{R}_1 \left[ \sin \left( \frac{\pi}{4} + \delta_{ba} \right) - \sin \frac{\pi}{4} \right] + \bar{R}_2 \left[ \sin \left( \frac{\pi}{4} + \delta_{ba} \right) - \sin \left( \frac{\pi}{4} + \delta_{ba} - \delta_{a0} \right) \right] - \frac{\bar{a}_c}{\cos \gamma} + \operatorname{tg} \gamma = 0. \quad (12)$$

Проследив изменение угла наклона касательной к линии скольжения  $baO$  от точки  $b$  до точки  $O$ , запишем последнее уравнение. В точке  $b$  угол между касательной к линии

скольжения и направлением, перпендикулярным к линии среза, равен  $3\pi/4$ . Этот угол изменяется на величину  $\pm\delta_{ba} - \delta_{a0}$  и в точке  $O$  равен:

$$\frac{3\pi}{4} \mp \delta_{ba} - \delta_{a0}. \quad (13)$$

С другой стороны этот угол равен в точке  $O$ :

$$\frac{\pi}{2} + \chi - \varepsilon + \gamma. \quad (14)$$

Приравнивая выражения (11) и (12), получим:

$$\frac{\pi}{4} - \gamma - \chi + \varepsilon \mp \delta_{ba} - \delta_{a0} = 0. \quad (15)$$

Таким образом, имея систему уравнений (5 – 15), можно определить все неизвестные. Для расчета по заданной математической модели необходимо иметь значения коэффициентов утолщения стружки, которые определяются экспериментально.

На основе выше описанной математической модели разработана программа с использованием итерационного процесса.

Используя полученные расчеты, можно перейти к определению сил резания.

Сила резания является суммой сил, действующих на передней и задней поверхностях инструмента. Силы, действующие на задней поверхности, участия в процессе стружкообразования не принимают и по величине значительно меньше сил, действующих на передней поверхности [3]. Поэтому при определении силы резания можно рекомендовать не учитывать влияние сил, действующих на задней поверхности.

Сила, действующая на передней поверхности [4], определяется величиной силы, затрачиваемой на преодоление пластических деформаций в зоне стружкообразования, и силы, затрачиваемой, на преодоление трения на передней поверхности:

$$P_n = N \cos \gamma + F \sin \gamma. \quad (16)$$

Но при обработке резанием со сверхвысокими скоростями необходимо учитывать влияние силы инерции  $P_{ин}$ , источником которой является изменение количества движения системы, которая может составлять 90% от усилия резания [5]. Сила инерции будет равна:

$$P_{ин} = \frac{\rho V^2 \cos \gamma \cdot b \cdot a' \cdot ctg \beta}{K_L}, \quad (17)$$

где  $\beta$  – угол сдвига.

Поэтому сила резания представится суммой составляющих, определенных по формулам (16), (17):

$$P = N \cos \gamma + F \sin \gamma + \frac{\rho V^2 \cos \gamma \cdot b \cdot a' \cdot ctg \beta}{K_L}.$$

Выше описанная математическая модель позволяет проводить не только расчеты нагрузок, действующих на режущий инструмент, но и, используя полученные в результате расчета параметры  $R_1, R_2, q_0, \delta_{ba}, \delta_{a0}, \varepsilon, l$ , дает возможность получить картину стружкообразования для конкретных условий обработки.

Сравнение значений сил резания, полученных в экспериментальных исследованиях, с расчетными значениями показало удовлетворительную их сходимость. Это подтверждает правильность и приемлемость разработанной математической модели и модели процесса стружкообразования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимощенко, В.А. Чистовая обработка толстолистовых заготовок / В.А. Тимощенко, А.В. Тока. – Кишинёв: Штиинца, 1984. – 68 с.
2. Томлёнов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томлёнов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

3. Розенберг, А.М. Элементы теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.И. Ерёмин. – М.: Mashgiz, 1956. – 320 с.
4. Развитие науки о резании металлов. Колл. авт. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
5. Полосаткин, Г.Д. Изучение процесса резания при сверхвысоких скоростях / Г.Д. Полосаткин, М.П. Калашникова // Физика металлов и металловедение. – 1960. – Т. 10. – Вып. 3. – С. 425–435.

**Корнеева Вера Михайловна**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
д.т.н., профессор кафедры  
«Метрологии и взаимозаменяемости»  
Тел. +7(916)8713508  
E-mail: v\_korneeva@list.ru

**Корнеев Сергей Сергеевич**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
к.т.н., доцент кафедры  
«Технологии ракетно-космического машиностроения»  
Тел. +7(916)2547337  
E-mail: corneev.sergei2014@yandex.ru

V.M. KORNEEVA, S.S. KORNEEV

## THEORETICAL ESTIMATION OF POWER OF LOADING CUTTING TOOL AT VERY HIGH CUTTING SPEEDS

*Mathematical model calculation of power loads acting on the cutting tool for cutting metal bullet. It is based on the model of chip processing with super-high speed, in which the process of plastic deformation in the areas of primary and secondary deformation of sliding double curvature lines is presented. Two payment schemes, different form the initial border of chip, which is related to the changing role of the bend in the process of building the chips depending on the conditions of processing. Using the theory of plasticity, considered changing the loaded condition of the chip. It is shown, that at processing with super-high speeds in addition to the force required to overcome the plastic deformation in the area of chip and friction on the front surface, you must consider the effects of inertial forces, the source of which is the change in the number of traffic system, which can be up to 90% of the cutting forces. The proposed mathematical model allows not only the calculation of loads on the cutting tool, but also provides an opportunity to get a picture of the chip to handle.*

**Keywords:** super-high speed machining, process model, plastic deformations, chip-cutting force.

## BIBLIOGRAPHY

1. Timoshchenko, V.A. Chistovaya obrabotka tolstolistovykh zagotovok / V.A. Timoshchenko, A.V. Toka. – Kishinov: Shtiintsa, 1984. – 68 s.
2. Tomlonov, A.D. Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov / A.D. Tomlonov. – M.: Metallurgiya, 1972. – 408 s.
3. Rozenberg, A.M. Elementy teorii protsessa rezaniya metallov / A.M. Rozenberg, A.I. Yeromin. – M.: Mashgiz, 1956. – 320 s.
4. Razvitiye nauki o rezanii metallov. Koll. avt. – M.: Mashinostroyeniye, 1967. – 416 s.
5. Polosatkin, G.D. Izucheniye protsessa rezaniya pri sverkhvysokikh skorostyakh / G.D. Polosatkin, M.P. Kalashnikova // Fizika metallov i metallovedeniye. – 1960. – Т. 10. – Вып. 3. – С. 425–435.

**Korneeva Vera Mikhailovna**  
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
D.t.s., professor of chair «Metrology and interchangeability»  
Ph.: +7(916)8713508  
E-mail: v\_korneeva@list.ru

**Korneev Sergey Sergeevich**  
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
Ph. d., associate professor of chair «Roket and Space Technology of mechanical engineering»  
Ph.: +7(916)2547337  
E-mail: corneev.sergei2014@yandex.ru

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.787:621.91

А.В. ЖИДКОВ, М.П. ЖИЛЬЦОВ, Р.В. ЛОГВИНОВ, В.В. МИШИН

### **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ПАРЫ ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ТРИБОИСПЫТАНИЙ**

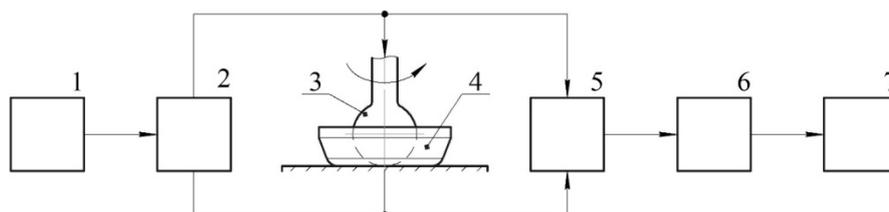
*В статье рассмотрены структура и принцип действия испытательной установки для экспериментальных исследований параметров процессов, происходящих в зоне контакта сферических поверхностей. Устройство предназначено для изучения процессов, протекающих в работающем трибосопряжении в условиях работы, приближенных к реальным. Его использование позволяет проводить испытания взаимодействующих сферических поверхностей, основанных на теоретических исследованиях математической модели сопротивления трущейся шаровой опоры.*

**Ключевые слова:** *трибодиагностика, трибомониторинг, испытания, граничные слои, сферические поверхности, испытательные машины, смазка, электрорезистивный метод, трение, трибосопряжение, износ, устройство.*

Взаимодействующие посредством трения металлические сферические детали встречаются в различных областях технического производства: в металлообразующих операциях; в медицине; в автомобильной, аэрокосмической и железнодорожной промышленности; робототехнике и ряде других отраслей [1–6].

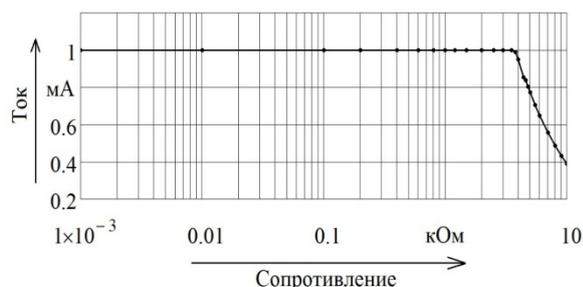
Основной причиной понижения эффективности и разрушения трибосопряжений является процесс износа в зоне контакта. Трение является одним из главных составляющих факторов, существенно влияющих на износ и энергетическую диссипацию трущихся поверхностей. Одним из способов уменьшения износа и предотвращения разрушения взаимодействующих сферических деталей является уменьшение коэффициента трения путем добавления в зону контакта смазочного материала, однако этот процесс должен быть управляемым и контролируемым [3]. Контроль процесса трения, износа и наличия смазочного слоя осуществляется с помощью специализированных лабораторных испытательных машин, позволяющих непосредственно или косвенно оценивать параметры процесса взаимодействия трущихся тел (вибрационные, тепловые и пр. способы контроля состояния трибосопряжений). Однако методы, применяемые в данных испытательных машинах, в большинстве случаев не позволяют практически безынерционно получать измерительную информацию непосредственно из зоны трения.

Для решения задачи исследования процессов, протекающих в зоне трибоконтakta сферических поверхностей, разработано устройство диагностирования, основанное на электропараметрическом методе, позволяющем исходя из анализа электрического сопротивления [4, 5] взаимодействующих сферических деталей получить информацию о состоянии зоны трения. Принцип применяемого метода получения диагностической информации основан на прохождении постоянного диагностического микротока через пару трения типа «металл–металл» с последующими снятием, обработкой и исследованием электрического сигнала, свидетельствующего о процессах, происходящих в зоне трения контакта. Исходя из характера взаимодействия трущихся поверхностей и анализа аналогов, разработано диагностическое устройство (рисунок 1), позволяющее получать сигналы из зоны трения в частотном диапазоне до 150 кГц при изменении активного электрического сопротивления в области 0...1 кОм.

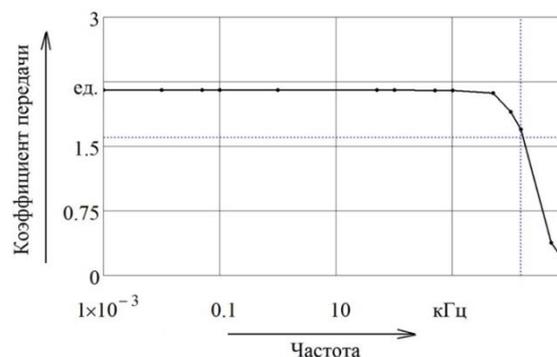


**Рисунок 1 – Структурная схема устройства диагностирования:**  
 1 – источник тока; 2 – мост Уитстона; 3 – сферическая головка; 4 – чашка;  
 5 – инструментальный усилитель; 6 – фильтр низких частот;  
 7 – устройство обработки и отображения сигнала

Согласно рисунку 1, источник тока 1 воздействует на измерительный мост Уитстона 2 стабильным диагностическим током с регулируемой амплитудой от 10 мкА до 1 мА. Пример токовой характеристики для значения 1 мА и ЛАЧХ источника тока представлены рисунках 2,3, внешний вид источника тока приведены на рисунке 4. Как видно из диаграмм, источник тока позволяет стабилизировать значение тока при изменении сопротивления нагрузки до 4 кОм. Частотная характеристика источника тока позволяет его применение в диапазоне до 400 кГц. Для обеспечения устойчивой работы и помехозащищенности, источник тока размещен в массивном экранирующем корпусе с гальванической развязкой по основным питающим цепям.



**Рисунок 2 – Статическая характеристика источника тока**



**Рисунок 3 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика источника тока**



**Рисунок 4 – Внешний вид источника тока**

Блоком для непосредственного получения сигнала с трибообъекта являются измерительный мост Уитстона 2 (рисунок 1) и инструментальный усилитель 5. Технические характеристики инструментального усилителя и его внешний вид представлены на рисунках 5, 6.

На представленной ЛАЧХ инструментального усилителя (рисунок 5) видно, что коэффициент усиления инструментального усилителя остается стабильным до частоты 12 МГц, и позволяет при необходимости исследовать сигнал с пары трения сферической поверхности области высоких частот.

Устройство обработки и отображения сигнала 7 (рисунок 1) представляет собой цифровой осциллограф Siglent SDS1102CML с частотой дискретизации 1 ГГц, полосой пропускания 100 МГц, внутренней памятью 2 МБ, и встроенным фильтром низких частот до 10 МГц.

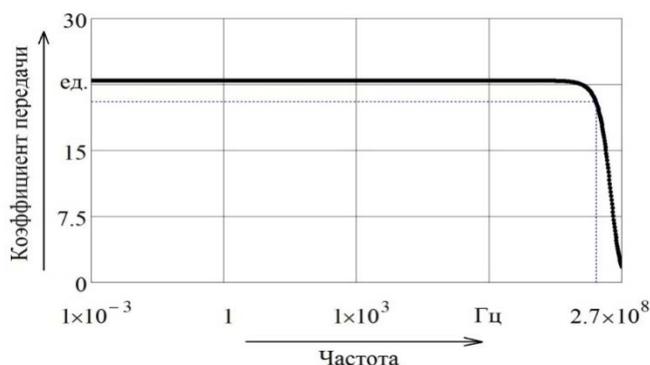


Рисунок 5 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика инструментального усилителя



Рисунок 6 – Внешний вид инструментального усилителя

С помощью представленного устройства, в ходе предварительных экспериментальных исследований были получены типовые сигналы с объекта испытания (ОИ), который представляет собой палец шаровой опоры 3, находящийся в трибосопряжении с корпусом опоры 4. ОИ закреплен в сверлильном патроне, которому сообщается момент вращения от двигателя, а также создается осевая нагрузка, при этом корпус неподвижно закреплен. Таким образом имитируются условия работы реальной сферической опоры.

После проведения первичных испытаний, были получены типовые сигналы с деформированной и недеформированной шаровой опоры со смазочным материалом марки «Литол». Соответствующие типовые сигналы представлены на рисунке 7 (единицы измерения: амплитуда сигнала – В, время – с).

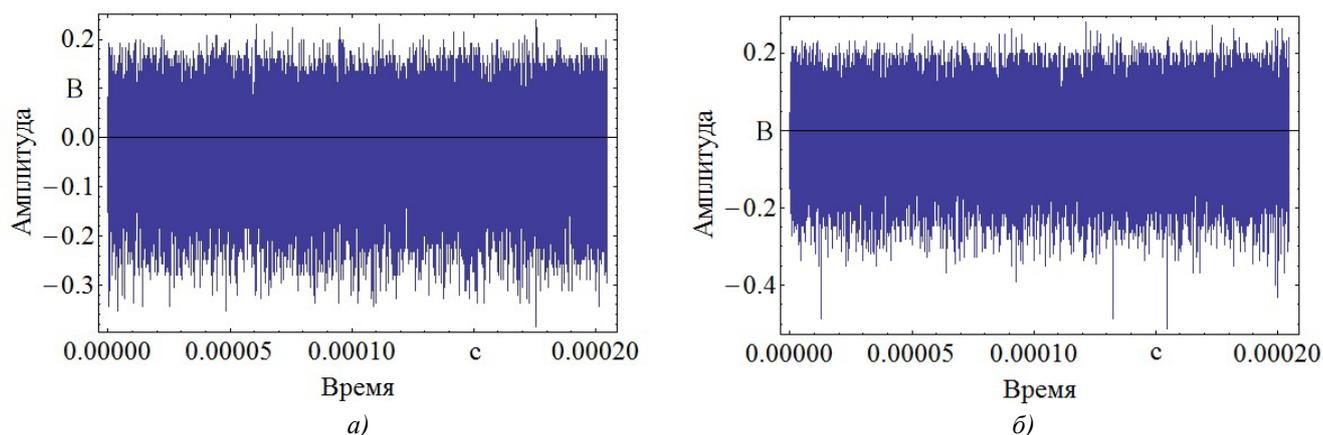
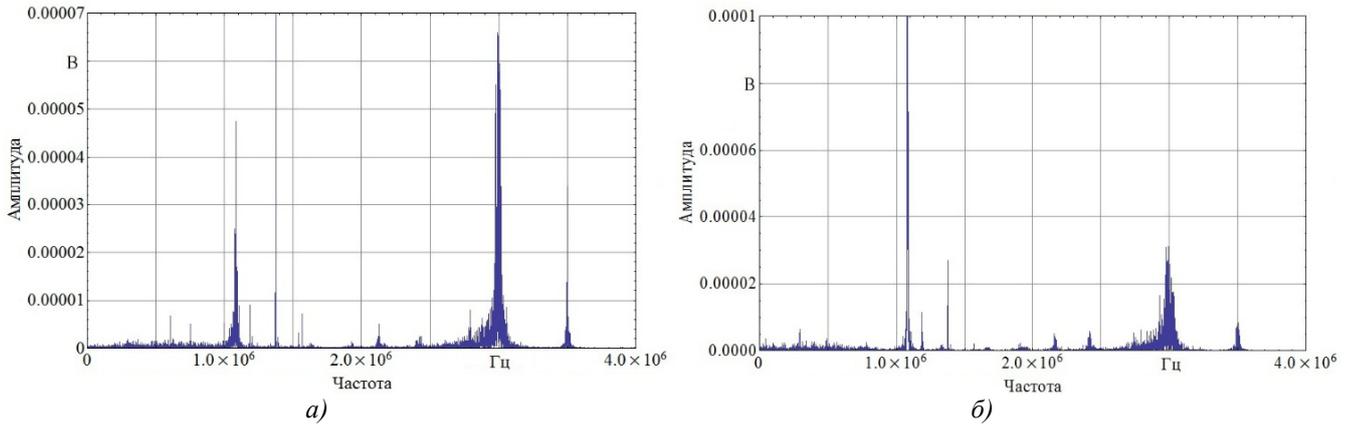


Рисунок 7 – Типовой сигнал с деформированной опоры: а – для нормальной опоры, б – для деформированной опоры

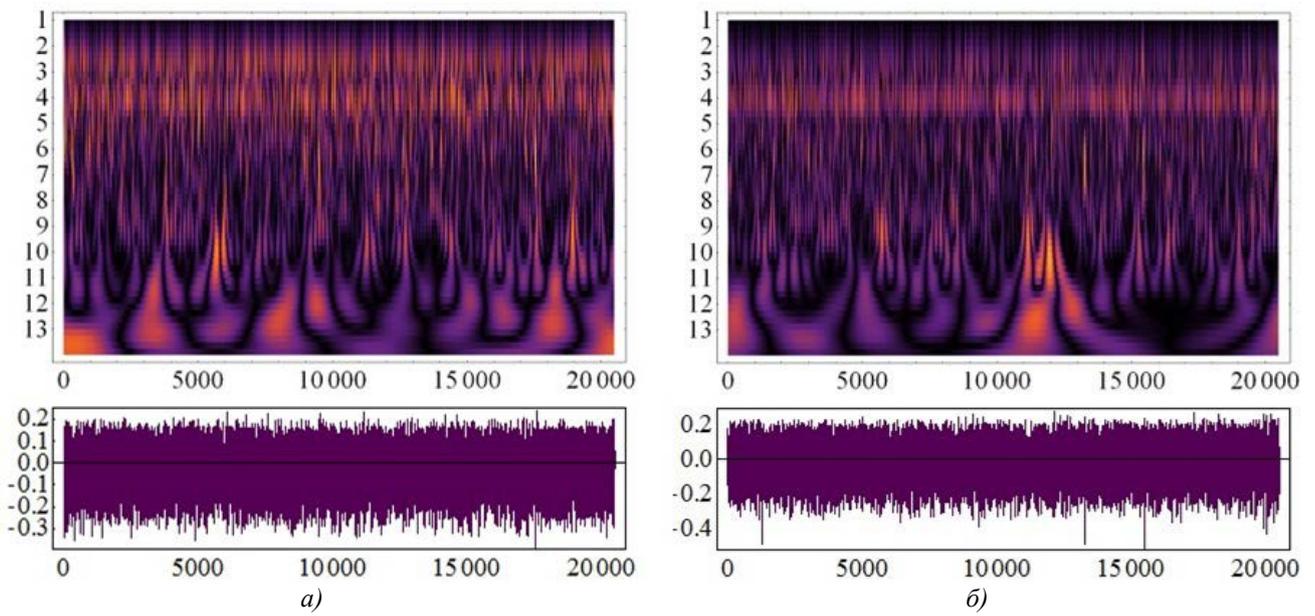
В результате статистической обработки сигналов и данных были также получены средние значения типовых сигналов  $U_{cp}$  и СКО –  $S$ :

Таким образом, среднее сопротивление недеформированной и деформированной пары трения соответственно равно

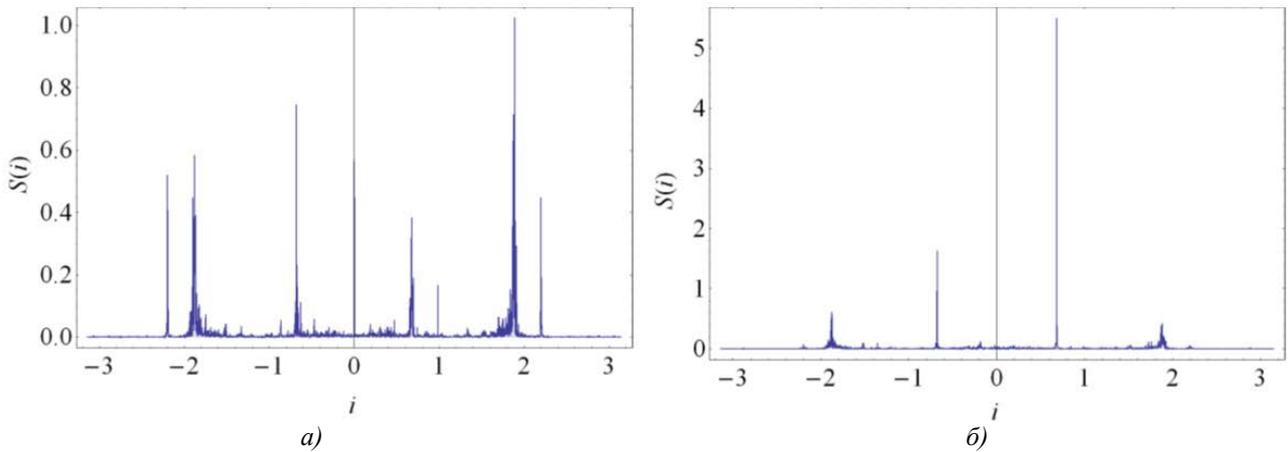
и  
Сигналы, получаемые в ходе экспериментальных исследований, были обработаны с помощью специализированной программы Wolfram Mathematica 9.0и были построены соответствующие нормальной и деформированной опоре спектрограммы (рисунок 8),вейвлетскейлограммы (рисунок 9), спектральная плотность мощности сигнала (рисунок 10, единицы измерения:  $S$  – условное распределение энергии,  $i$  – индекс частоты), корреляционные функции, полученных сигналов (рисунок 11, единицы измерения:  $R[N]$  – амплитуда,  $N$  – номер отсчета), а также произведена вейвлет декомпозиция сигнала для деформированной и недеформированной опоры (рисунок 12).



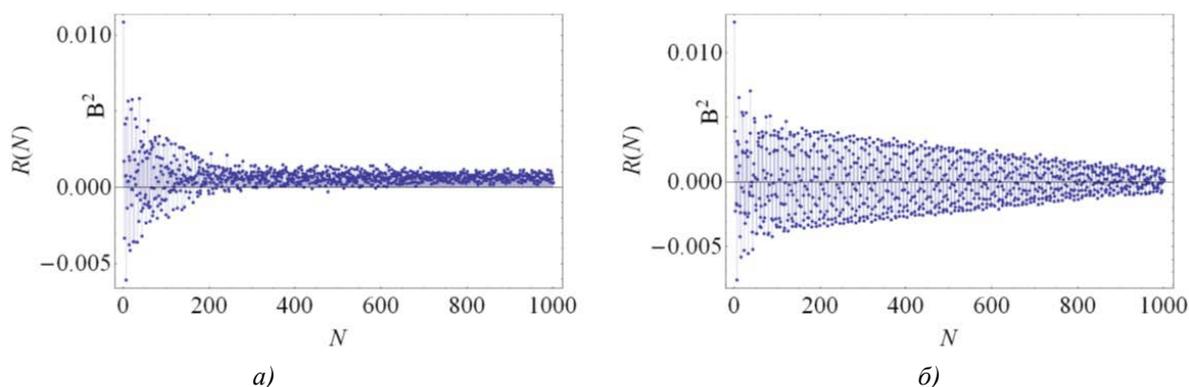
**Рисунок 8 – БПФ спектрограмма недеформированной опоры**  
*а – для нормальной опоры, б – для деформированной опоры*



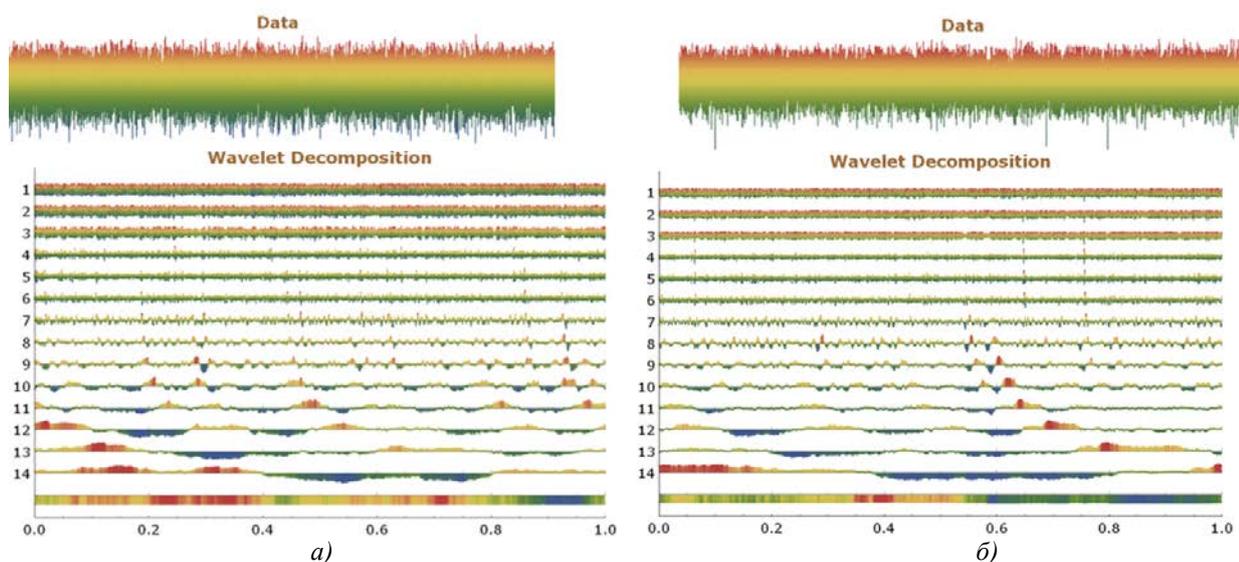
**Рисунок 9 – Вейвлетскейлограмма деформированной опоры**  
*а – для нормальной опоры, б – для деформированной опоры*



**Рисунок 10– Спектральная плотность мощности недеформированной опоры**  
*а – для нормальной опоры, б – для деформированной опоры*



**Рисунок 11 – Корреляционная функция недеформированной опоры**  
*а – для нормальной опоры, б – для деформированной опоры*



**Рисунок 12 – Вейвлет декомпозиция сигнала**  
*а – для нормальной опоры, б – для деформированной опоры*

Сопоставляя спектральные оценки сигналов (рисунки 8, 10) можно отметить, что спектральный состав сигналов нормальной и деформированной опор имеют характерные отличия, выраженные в изменении баланса спектральных составляющих в общей спектральной картине, что так же выражено в корреляционных функциях (рисунок 11). Особенно отчетливо различие наблюдается в диаграмме спектральной плотности (рисунок 10). Вейвлет анализ, в отличие от обычного спектрального, позволяет рассмотреть сигнал одновременно как в частотной области, так и временной. Сопоставляя скейлограммы (рисунок 9), можно отметить, что топология скейлограмм сильно зависит от наличия деформации в зоне трения сферической пары трения, что позволяет использовать скейлограмму в качестве инструмента для принятия диагностического решения. Этот вывод так же подтверждается декомпозицией сигнала, представленной на рисунке 12.

На основании проведенных оценочных экспериментальных исследований подтверждена работоспособность созданного устройства диагностирования и обоснована возможность использования электрорезистивного метода для испытания и исследования объектов со сферическими поверхностями трения с парой трения типа металл–металл.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браун, Э.Д. Современная трибология: Итоги и перспективы / Э.Д. Браун, И.А. Буяновский, Н.А. Воронин и др., Под ред. К.В. Фролова. – М.: ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. Сферические подшипники скольжения [Электронный ресурс] / ЗАО «Альберис». – Режим доступа: [http://www.podshipnick.ru/sfericheskie\\_podshipniki\\_skolzhenija.shtml](http://www.podshipnick.ru/sfericheskie_podshipniki_skolzhenija.shtml), свободный. – Загл. экрана, (дата обращения: 13.05.2015).
3. Stachowiak, Gwidon W. Batchelor Engineering Tribology / Gwidon W. Stachowiak, W. Andrew. – 3rdEd. – Burlington: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2005. – 802 с.

4. Подмастерьев, К.В. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 томах. / К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Со-  
снин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий; Под ред. В.В. Клюева. Т.  
5: книга 2: Электрический контроль. – М.: Издательский дом «Спектр», 2009. – 732 с.

5. Мышкин, Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович, – Долгопрудный:  
«Интеллект», 2008. – 560 с.

6. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения. –  
М.: Машиностроение–1, 2001. – 376 с.

**Жидков Алексей Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл  
Аспирант кафедры ПМиС  
научный сотрудник НОЦ «Диатрансприбор»  
Тел.: +79536222332  
E-mail: alexeyzhidkov1991@mail.ru

**Жильцов Михаил Петрович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл  
научный сотрудник НОЦ «Диатрансприбор»  
Тел.: +79536291236  
E-mail: mik2015zh@yandex.ru

**Мишин Владислав Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл  
Исполнительный директор НОЦ «Диатрансприбор»  
Кандидат технических наук, профессор  
Тел.: +79536133879  
E-mail: zam\_fdo@mail.ru

**Логвинов Роман Васильевич**

ОФ РАНХиГС, г. Орёл  
старший преподаватель  
E-mail: Diodemius@yandex.ru

A.V. ZHIDKOV, M.P. ZHILTSOV, R.V. LOGVINOV, V.V. MISHIN

## DEVICE FOR DIAGNOSING A SPHERICAL FRICTION PAIR DURING TRIBOTESTING

*The article describes the structure and function of the test bench parameters for experimental studies of the processes occurring in the contact area of the spherical surfaces. The instrumental base is designed for the study of processes occurring in the friction units operating in working conditions close to reality. Its use allows testing of interacting spherical surfaces, based on theoretical mathematical model of resistance to the ball joint.*

**Keywords:** tribodiagnostics, tribomonitoring, testing, boundary layers, spherical surfaces, test devices, lubrication, electroresistive method, friction, tribocoupling, wear, device.

### BIBLIOGRAPHY

1. Braun, E.D. Sovremennaya tribologiya: Itogi i perspektivy / E.D. Braun, I.A. Buyanovskiy, N.A. Voronin i dr., Pod red. K.V. Frolova. – М.: LKI, 2008. – 480 s.

2. Sfericheskiye podshipniki skolzheniya [Elektronnyy resurs] / ZAO «Alberis». – Rezhim dostupa: [http://www.podshipnick.ru/sfericheskiye\\_podshipniki\\_skolzheniya.shtml](http://www.podshipnick.ru/sfericheskiye_podshipniki_skolzheniya.shtml), svobodnyy. – Zagl. ekrana, (data obrashcheniya: 13.05.2015).

3. Stachowiak, Gwidon W. Batchelor Engineering Tribology / Gwidon W. Stachowiak, W. Andrew. – 3rdEd. – Burlington: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2005. – 802 s.

4. Podmaster'ev, K.V. Nerazrushayushchiy kontrol: Spravochnik: v 8 tomakh. / K.V. Podmaster'ev, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf, T.I. Nogacheva, Ye.V. Pakholkin, L.A. Bondareva, V.F. Muzhitskiy; Pod red. V.V. Klyuyeva. Т. 5: kniga 2: Elektricheskiy kontrol. – М.: Izdatelskiy dom «Spektr», 2009. – 732 s.

5. Myshkin, N.K. Elektricheskiye kontakty / N.K. Myshkin, V.V. Konchits, M. Braunovich, – Dolgoprudnyy: «Intellect», 2008. – 560 s.

6. Podmaster'ev, K.V. Elektroparametricheskiye metody kompleksnogo diagnostirovaniya opor kacheniya. – М.: Mashinostroyeniye–1, 2001. – 376 s.

**Zhidkov Alexey Vladimirovich**

State University – ESPC, Orel  
Postgraduate at the Department of PMIS of specialty «De-  
vices and methods of control environment, substances,  
materials and products»  
Phone: +79536222332  
E-mail: alexeyzhidkov54@yandex.ru

**Zhiltsov Mihail Petrovich**

State University – ESPC, Orel  
Research Officer of Research and Education Center  
«Diatranspribor»  
Phone: +79536291236  
E-mail: mik2015zh@yandex.ru

**Mishin Vladislav Vladimirovich**

CTS, professor  
State University – ESPC, Orel  
Phone: +79536133879  
E-mail: zam\_fdo@mail.ru

**Logvinov Roman Vasilyevich**

OF RANHiGS, Orel  
Senior Lecturer  
E-mail: Diodemius@yandex.ru

А.И. НЕЗНАНОВ, В.Н. ЕСИПОВ

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НЕРОВНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С МАЯТНИКОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

*Получена математическая модель маятниковой подсистемы гидроакустического датчика уровня железнодорожного пути, в котором маятниковая пластина полностью погружена в однородную вязкую жидкость, приведены результаты экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** датчик, математическая модель, маятник.

От исправного технического состояния железнодорожного пути зависят безопасность и бесперебойность движения составов, динамические нагрузки на их ходовые части. Исправление геометрических параметров полотна осуществляют путевые машины типа ВПО, ВПР, ДСП и др. Важным элементом автоматической системы выправки железнодорожного пути, устанавливаемой на путевых машинах, является датчик неровности, который определяет положение железнодорожного полотна в системе координат, связанной с Землей, и замыкает цепь обратной связи.

Анализ условий эксплуатации показывает, что полезный сигнал, несущий информацию об углах отклонения машины по уровню, является низкочастотным, как правило, не превышающим по частоте 0,5 Гц. В целях повышения производительности путевых машин планируется увеличить частотный диапазон до 1 Гц. Также на датчик воздействует вибрация, вызванная рабочими органами путевой машины.

В настоящее время базовым прибором, которым комплектуются выправочно-подбивные машины является прибор ELT 133.00 фирмы «Plasser&Theurer» (Австрия). Основными недостатками указанного прибора являются большие габариты (350x145x415 мм) и масса (30 кг), погрешность АЧХ 25% и фазовое запаздывание 45° на частоте 0,5 Гц. В Тульском государственном университете были разработаны средства измерения, воспроизводящие принцип построения указанного прибора на отечественной элементной базе, характеристики которых были аналогичны австрийскому прибору. Таким образом, разработка датчиков негоризонтальности на опережающем техническом уровне является весьма актуальной задачей [1].

Одним из путей улучшения технических характеристик датчиков уровня является использование механических маятников, помещенных в полость, полностью заполненную жидкостью. Съём информации о неровности пути, которая соответствует угловому рассогласованию между маятником и корпусом, решается с помощью ультразвуковых методов измерения.

В результате проведения исследований разработаны принципы построения гидроакустических датчиков контроля уровня негоризонтальности (рисунок 1), их макетные образцы и проведены экспериментальные исследования, которые показывают перспективность данного направления [2]. Информативным параметром таких датчиков является амплитуда электрического выходного сигнала.

Для оценки ожидаемых динамических характеристик подобных датчиков необходимо иметь математические модели этих характеристик.

Динамические характеристики рассматриваемого датчика определяются динамическими характеристиками его акустической и механической подсистем. Однако, учитывая, что динамические характеристики акустической подсистемы съема информации в основном определяются временем прохождения ультразвуковой волной расстояния от маятниковой пластины до пьезоприемника, которое для практически интересного варианта реализации рассматриваемого датчика не превышает значения  $1,5 \cdot 10^{-5}$  с, и учитывая, что частота угловых колебаний основания, на которое установлен датчик не превышает 1 Гц, можно сделать вывод, что динамические характеристики датчика определяются только характеристиками механической подсистемы. Таким образом, задача исследования сводится к разработке и анализу модели движения маятникового чувствительного элемента датчика, установленного на основании, которое совершает угловые колебания и подвержено воздействию линейной вибрации. Определим положение маятниковых элементов (рисунок 2).

Неподвижная (инерциальная) система координат  $O_0X_0Y_0$  ориентирована так, что начало отсчета (точка  $O_0$ ) находится в середине оси колесной пары, ось  $O_0X_0$  направлена горизонтально, а ось  $O_0Y_0$  направлена по линии местной вертикали.

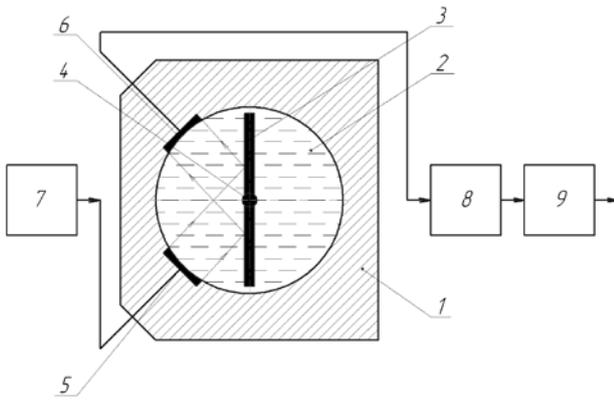


Рисунок 1 – Обобщенная принципиальная схема датчика:

1 – корпус; 2 – цилиндрическая камера, заполненная жидкостью; 3 – маятниковая пластина; 4 – подвес; 5 – излучатель ультразвука; 6 – приемник ультразвука; 7 – генератор; 8 – согласующее устройство; 9 – амплитудный детектор

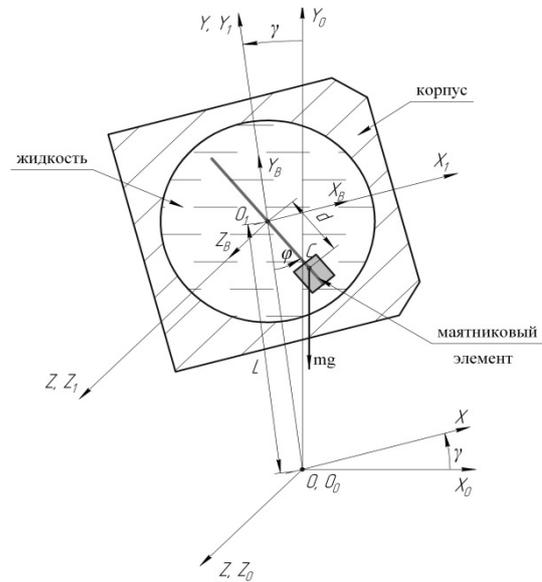


Рисунок 2 – Системы координат, определяющие положение маятникового элемента датчика

Система координат  $OXY$  связана с тележкой, положение которой относительно системы координат  $O_0X_0Y_0$  определяется углом  $\gamma$ . Система координат  $O_1X_1Y_1$  связана с корпусом датчика. Ее начало (точка  $O_1$ ) является проекцией оси подвеса маятника на плоскость  $XU$ . Оси  $OX$  и  $O_1X_1$ ,  $OY$  и  $O_1Y_1$  соответственно параллельны. Расстояние от оси подвеса маятника (точки  $O_1$ ) до точки  $O$  соответствует высоте установки корпуса датчика и равно  $L$ . Расстояние между точкой  $O_1$  и центром тяжести маятника  $C$  равно  $d$ . Положение маятника в системе координат  $OXY$  определяется углом  $\varphi$  между осью  $OY$  и линией  $O_1C$ . Ось подвеса маятника подвержена линейной вибрации, которая определяется виброперемещениями  $x_B$  и  $y_B$ , которые соответственно направлены вдоль осей  $OX_1$  и  $OY_1$ .

Воспользовавшись уравнением Лагранжа второго рода получим уравнение движения маятника по координате  $\varphi$ :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_{\varphi}, \quad (1)$$

где  $T$  – кинетическая энергия маятника;

$Q_{\varphi}$  – обобщенная сила, имеющая размерность момента.

Полная кинетическая энергия  $T$  маятникового элемента датчика включает кинетическую энергию маятника и кинетическую энергию присоединенной жидкости, которая движется вместе с маятниковым механическим элементом как единое целое:

$$T = T_M + T_J.$$

Кинетическая энергия маятника может быть определена по формуле:

$$T_M = \frac{1}{2} m (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2),$$

где  $(x_0, y_0)$  – координаты точки  $C$  в системе  $O_0X_0Y_0$ , которые соответственно равны:

$$\begin{cases} x_0 = d \sin(\varphi + \gamma) - L \sin \gamma + x_B \cos \gamma - y_B \sin \gamma; \\ y_0 = L \cos \gamma - d \cos(\varphi + \gamma) + x_B \sin \gamma + y_B \cos \gamma. \end{cases}$$

Кинетическая энергия жидкости равна:

$$T_J = \frac{J \cdot \dot{\varphi}^2}{2},$$

где  $J$  – присоединенный момент инерции жидкости.

Обобщенная сила маятника равна частной производной потенциальной энергии маятника по соответствующей обобщенной координате, взятой с обратным знаком:

$$Q_M = -\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi},$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия маятника.

Рассматриваемый маятник обладает потенциальной энергией, равной:

$$\Pi = mgd \left[ \frac{L + R_k}{d} \cos \gamma - \cos(\varphi + \gamma) \right] + \Pi_{\text{пд}},$$

где  $m$  – масса маятникового чувствительного элемента;

$g$  – ускорение свободного падения;

$R_k$  – радиус колеса тележки;

$\Pi_{\text{пд}}$  – потенциальная энергия подвеса маятника, обусловленная силой упругости, возникающей при закручивании подвеса в виде торсиона.

Потенциальная энергия подвеса маятника определяется выражением:

$$\Pi_{\text{пд}} = \frac{1}{2} K \cdot (\varphi + \gamma)^2 = \frac{1}{2} K \cdot (\varphi^2 + 2 \cdot \varphi \cdot \gamma + \gamma^2),$$

где  $K$  – жесткость торсионного подвеса при закручивании.

Таким образом, обобщенная сила маятника равна:

$$Q_M = -mgd \cdot \sin(\varphi + \gamma) - K\gamma - K\varphi.$$

Обобщенная сила, обусловленная силами вязкого трения маятникового элемента о демпфирующую жидкость, заполняющую цилиндрическую камеру датчика определяется выражением:

$$Q = -b\dot{\varphi},$$

где  $b$  – абсолютный коэффициент демпфирования маятника [1].

Полная обобщенная сила системы равна:

$$Q_\varphi = -mgd \cdot \sin(\varphi + \gamma) - K\gamma - K\varphi - b\dot{\varphi}.$$

Подставляя указанные выражения в (1) и учитывая, что углы  $\varphi$  и  $\gamma$  малые, находим уравнение движения маятникового элемента при одновременном воздействии на датчик полезного сигнала и вибрации:

$$\begin{aligned} (md^2 + J)\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + md(g - L\dot{\gamma}^2 + \ddot{y}_B + x_B\ddot{\gamma} + 2\dot{x}_B\dot{\gamma} - y_B\dot{\gamma}^2)\varphi + K\varphi = \\ = md((L-d)\ddot{\gamma} - g\gamma - \ddot{x}_B + y_B\ddot{\gamma} + 2\dot{y}_B\dot{\gamma} + x_B\dot{\gamma}^2) - K\gamma. \end{aligned} \quad (2)$$

Для получения выражений для динамических характеристик датчика, характеризующих качество отработки им полезного сигнала, обусловленного гармоническими колебаниями площадки, на которую установлен датчик, положим в (2) ( $x_B = y_B = 0, \gamma \neq 0$ ):

$$(md^2 + J)\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + md(g - L\dot{\gamma}^2)\varphi + K\varphi = md((L-d)\ddot{\gamma} - g\gamma) - K\gamma. \quad (3)$$

Из выражения (3) могут быть получены выражения для коэффициента динамичности и фазового запаздывания датчика:

$$V = \frac{1 + \frac{md(L-d)}{md^2 + J}\eta^2}{\sqrt{\left[1 - \eta^2 \left(1 + \frac{mdL}{2(md^2 + J)}\gamma_0^2\right)\right]^2 + 4D^2\eta^2}}, \quad (4)$$

$$\psi = -\arctg \left( \frac{2D\eta}{1 - \eta^2 \left[1 + \frac{mdL}{2(md^2 + J)}\gamma_0^2\right]} \right) \quad (5)$$

где  $\eta = \omega/\omega_0$  – относительная безразмерная частота;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{mdg + K}{md^2 + J}}$  – собственная частота недемпфированных колебаний маятника в жидкости;

$D = \frac{b}{2(md^2 + J)\omega_0}$  – относительный коэффициент демпфирования;

$\gamma_0$  – амплитуда угловых колебаний основания, на котором установлен датчик.

Исследования проводились для датчика массой 1 кг (120x64x64 мм) с цилиндрической камерой диаметром 30 мм, заполняемой различными жидкостями: трансформаторным маслом, моторным маслом и касторовым маслом при температуре 25 °С. Маятниковая пластина имеет геометрические размеры 40x23x1 мм, масса груза равна  $m=14$  г, смещение центра масс относительно оси подвеса составляет  $d=8$  мм. Присоединенные моменты инерции жидкости для указанной пластины определены экспериментально и равны соответственно  $5,25 \cdot 10^{-7}$  кг·м<sup>2</sup>,  $8,05 \cdot 10^{-7}$  кг·м<sup>2</sup> и  $8,8 \cdot 10^{-7}$  кг·м<sup>2</sup> для трансформаторного, моторного и касторового масел. Экспериментальные значения относительного коэффициента демпфирования  $D$  для перечисленных выше масел соответственно равны: 0,063, 0,291, 0,543.

Теоретические и экспериментальные характеристики для описанных выше вариантов заполнения датчика при высоте его выставки относительно колеблющейся площадки  $L=12,5$  см, т.е. при соотношении  $L/d=15,6$ , представлены на рисунке 3.

Анализируя приведенные данные можно сделать вывод о достаточной адекватности выражений (4) и (5), поскольку максимальное отклонение теоретических и экспериментальных значений не превышает 5% от соответствующих значений. Также можно сделать вывод о существенной зависимости характеристик от вязкости масла. При этом, с ростом вязкости масла амплитудная характеристика все более приближается к идеальной, т.е. равной единице во всем диапазоне частот, однако фазовое запаздывание с ростом вязкости масла увеличивается.

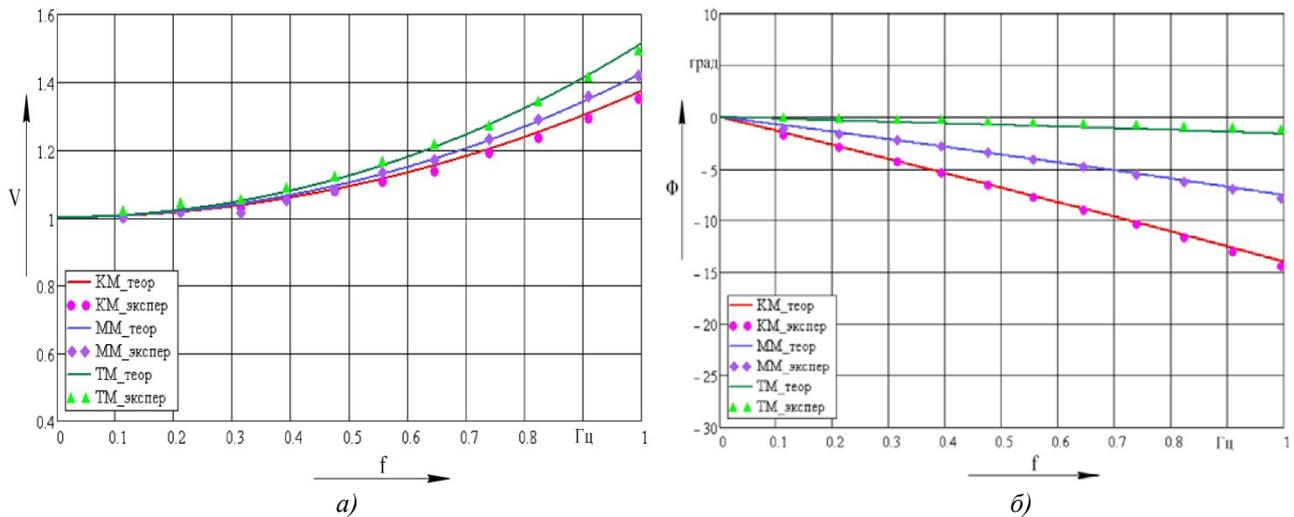


Рисунок 3 – Теоретические и экспериментальные АЧХ (а) и ФЧХ (б) датчика для различных жидкостей в акустической камере:

ТМ – трансформаторное масло; ММ – моторное масло (SAE 20W-50); КМ – касторовое масло

Теоретические характеристики для некоторых других вариантов установки датчика, т.е. для других значений соотношения  $L/d$ , приведены на рисунке 4. При этом положительным значениям  $L/d$  соответствуют случаи, когда ось подвеса маятника располагается выше оси колебаний площадки, на которую установлен датчик, а отрицательным значениям  $L/d$  соответствуют случаи, когда ось подвеса маятника располагается ниже оси колебаний площадки. Указанные характеристики рассчитаны для случая заполнения датчика моторным маслом.

Видно, что амплитудная характеристика датчика существенно зависит от значения соотношения  $L/d$ , а фазовая характеристика практически не зависит от него.

Таким образом, при проектировании датчика необходимо найти оптимальное соотношение геометрических параметров маятника и вязкости масла для обеспечения оптимальных характеристик датчика.

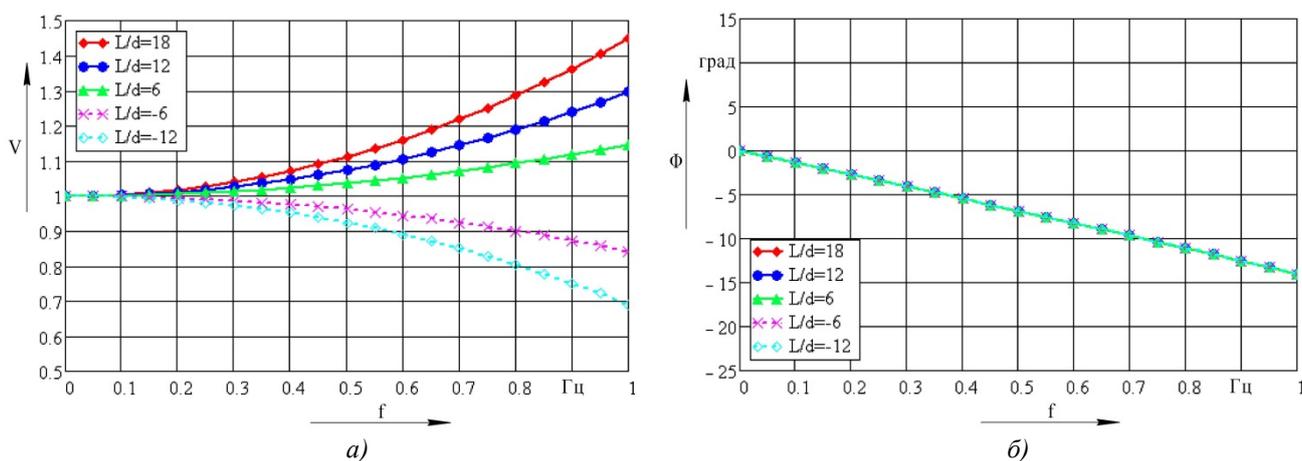


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента динамичности (а) и фазового запаздывания (б) датчика от частоты колебаний основания для различных высот его установки

Приведенные теоретические и экспериментальные значения показывают, что датчик, в котором маятниковая пластина помещена в камеру, полностью заполненную однородной вязкой жидкостью, существенно превосходит по динамическим характеристикам, а также по массо-габаритным параметрам известный прибор ELT 133.00 фирмы «Plasser&Theurer».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распопов, В.Я. Датчики уровня систем управления железнодорожных машин / В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов. – Тула: ТулГУ, 2000.
2. Есипов, В.Н. Математическое моделирование гидроакустических датчиков негоризонтальности / В.Н. Есипов, А.В. Есипов // Датчики и системы. – 2004. – № 1. – С. 15–17.

**Незнанов Александр Иванович**  
 ФГБОУ ВПО Госуниверситет–УНПК  
 Ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
 E-mail: orelkir18@gmail.com

**Есипов Виталий Николаевич**  
 ФГБОУ ВПО Госуниверситет–УНПК  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры  
 «Приборостроение, метрология и сертификация»  
 Тел. 8(960)656–62–62  
 E-mail: orelkir18@gmail.com

A.I. NEZANOV, V.N. ESIPOV

## DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE HYDROACOUSTIC SENSOR OF A LEVEL OF RAILWAYS WHICH HAS THE PENDULAR SENSITIVE ELEMENT

*The mathematical model of a pendular subsystem of the hydroacoustic sensor of a level of railways, in which the pendular plate is completely shipped in a homogeneous viscous liquid, is presented, results of experimental researches are given.*

**Keywords:** sensor, mathematical model, pendulum.

### BIBLIOGRAPHY

1. Raspopov, V.Ya. Datchiki urovnya sistem upravleniya zheleznodorozhnykh mashin / V.Ya. Raspopov, YU.V. Ivanov. – Tula: TulGU, 2000.
2. Yesipov, V.N. Matematicheskoye modelirovaniye gidroakusticheskikh datchikov negorizontálnosti / V.N. Yesipov, A.V. Yesipov // Datchiki i sistemy. – 2004. – № 1. – S. 15–17.

**Neznanov Alexander Ivanovich**  
 State University – ESPC, Orel  
 Assistant, Department of «Instruments, metrology and certification»  
 E-mail: orelkir18@gmail.com

**Esipov Vitaliy Nikolaevich**  
 State University – ESPC  
 Cand. Tech Sci., Ass. Professor, Department of «Instruments, metrology and certification»  
 Ph. 8(960)656–62–62  
 E-mail: orelkir18@gmail.com

**КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.391

И.Г. КАРПОВ, Ю.Т. ЗЫРЯНОВ

**МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПИРСОНА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕПЕННЫХ, ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ  
И ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ**

*Предложена модификация распределений Пирсона для аппроксимации законов распределения экспериментальных данных, которая позволяет получить более широкий класс законов распределений, чем существующая система распределений Пирсона. Разработана методика идентификации параметров модифицированных распределений Пирсона с использованием степенных, экспоненциальных и логарифмических моментов.*

**Ключевые слова:** уравнения Пирсона, система распределений Пирсона, модифицированные распределения Пирсона, степенные моменты, экспоненциальные моменты, логарифмические моменты.

На всех этапах создания, испытаний и эксплуатации сложных технических систем (СТС) необходимы контроль и диагностика отказов, что позволяет решить проблему их надежности. По мере возрастания выполняемых функций и совершенствования элементной базы интеллектуальный уровень электронной аппаратуры управления СТС стал высоким. В настоящее время создаются электронные системы, выполняющие задачи контроля и управления техническим состоянием СТС. В связи с этим проектирование современных СТС должно предусматривать создание методов и средств контроля и диагностики с целью обеспечения требуемой надежности. Важное место в общей проблеме построения эффективных и надежных СТС, а также их испытаний занимает задача идентификации изменения контролируемых параметров по моделям реальных законов распределения и аппроксимации экспериментальных данных. Знание текущей информации на основе обработки экспериментальных данных позволяет оценить состояние системы и осуществить достоверный контроль и своевременную диагностику возможных отказов. При решении таких задач в теории надежности СТС нашли широкое применение более десятка непрерывных законов распределения. В качестве моделей реальных законов распределения непрерывных случайных величин (СВ) часто используют распределения Пирсона, удовлетворяющие дифференциальному уравнению [1–5]:

$$\frac{d p(x)}{d x} = \frac{a_1 x - a_0}{b_2 x^2 + b_1 x + b_0} p(x), \quad (1)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – параметры распределения  $p(x)$ .

В зависимости от значений отдельных параметров в качестве решения уравнения (1) получают 12 типов кривых. Эти кривые часто используют для аппроксимации экспериментальных распределений [4, 5]. Однако в настоящее время система плотностей распределения вероятностей (ПРВ), введенная К. Пирсоном еще в 1894 году, является до некоторой степени устаревшей [6]. Особенно это проявляется при использовании в качестве моделей реальных односторонних законов распределения СВ. На сегодняшний день очень часто на практике применяют целый ряд законов распределений, таких как распределения Релея, Накагами, Вейбулла, обобщенное экспоненциальное, обобщенное гамма – распределение, которые нельзя получить в виде частных случаев из системы распределений Пирсона [5,7,8].

**Основные цели работы** – 1) осуществить модификацию уравнения Пирсона (1), которая позволит получить более широкий класс законов распределений, чем система распределений Пирсона; дальнейшее развитие статьи [2].

2) разработать методику идентификации параметров модифицированных распределений Пирсона с использованием степенных моментов, экспоненциальных моментов и логарифмических моментов.

**1. Односторонние модифицированные распределения Пирсона.**

Модификация дифференциального уравнения Пирсона (1) заключается в следующем. Во-первых, параметр  $b_0$  в (1) заменяется на параметр  $c$ , характеризующий собой показатель степени переменной  $x$ , причем  $c > 0$ . Во-вторых, предполагается, что соответствующее распределение  $p(x)$  является односторонним, то есть существует только на положительной части оси  $x$ . Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{dp(x)}{dx} = \frac{a_0 + a_1 x^c}{b_1 x + b_2 x^{c+1}} p(x) \tag{2}$$

либо:

$$\frac{d}{dx} \ln(p(x)) = \frac{a_0 + a_1 x^c}{b_1 x + b_2 x^{c+1}} \tag{3}$$

Впервые модифицированное уравнение Пирсона (2) было рассмотрено в работе [9]. Как показано в [10], параметры  $a_i$  и  $b_i$  модифицированного уравнения Пирсона определяются выражениями:

$$\begin{aligned} b_2 &= 0,5(K_2 - 1); & b_1 &= (1 + K_2 - 2K_1 K_2) m_{1c} / 2K_1; \\ a_1 &= -(3c + 1)b_2 - c; & a_0 &= c K_2 m_{1c} - b_1, \end{aligned} \tag{4}$$

где  $m_s = M \{x^s\}$  – начальный момент  $s$ -го порядка, в том числе и дробного;

$$K_1 = \frac{m_{1c}^2}{m_{2c}}; \quad K_2 = \frac{m_{1c} m_{3c} - m_{2c}^2}{m_{2c} (m_{2c} - m_{1c}^2)} \tag{5}$$

Решение уравнения (2) либо уравнения (3) можно записать следующим образом:

$$p(x) = K_n \exp[\varphi(x)], \quad \varphi(x) = \int \frac{a_0 + a_1 x^c}{b_1 x + b_2 x^{c+1}} dx, \tag{6}$$

где  $K_n$  – коэффициент нормировки.

Очевидно, что характер кривой  $\varphi(x)$ , а следовательно и ПРВ  $p(x)$ , может быть различным в зависимости от величины параметров  $b_1$  и  $b_2$ . При этом возможны шесть типов распределений, области существования которых представлены на рисунке 1 в плоскости переменных  $K_1$  и  $K_2$ , определяемых выражениями (5) при  $c = 1$ . Рассмотрим подробнее указанные шесть типов распределений.

**I тип распределения.** Распределение этого типа имеет место, когда параметр  $b_1 > 0$ , а параметр  $b_2 < 0$ . Выражение для ПРВ имеет вид:

$$p(x) = \frac{c x^{\alpha c - 1}}{B(\alpha, \nu) \chi^{\alpha c}} \left(1 - \frac{x^c}{\chi^c}\right)^{\nu - 1}, \quad 0 < x < \chi, \tag{7}$$

где  $\alpha > 0, \nu > 0, c > 0$  – параметры формы;  
 $\chi > 0$  – параметр масштаба;  
 $B(a, b)$  – бета-функция.

Частными случаями данного распределения являются степенной закон при  $c = 1$  и  $v = 1$ ; бета-распределение при  $c = 1$ . Предельным случаем (7) является логарифмическое нормальное распределение при  $\alpha \rightarrow \infty$ ,  $v \rightarrow \infty$  и  $c \rightarrow 0$ .

Используя ПРВ (7) и соотношение [10]:

$$m_s = \int_0^{\infty} x^s p(x) dx, \tag{8}$$

можно получить начальные моменты  $s$ -го порядка для распределения (7):

$$m_s = \frac{\chi^s \Gamma(\alpha + s/c) \Gamma(\alpha + v)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\alpha + v + s/c)}.$$

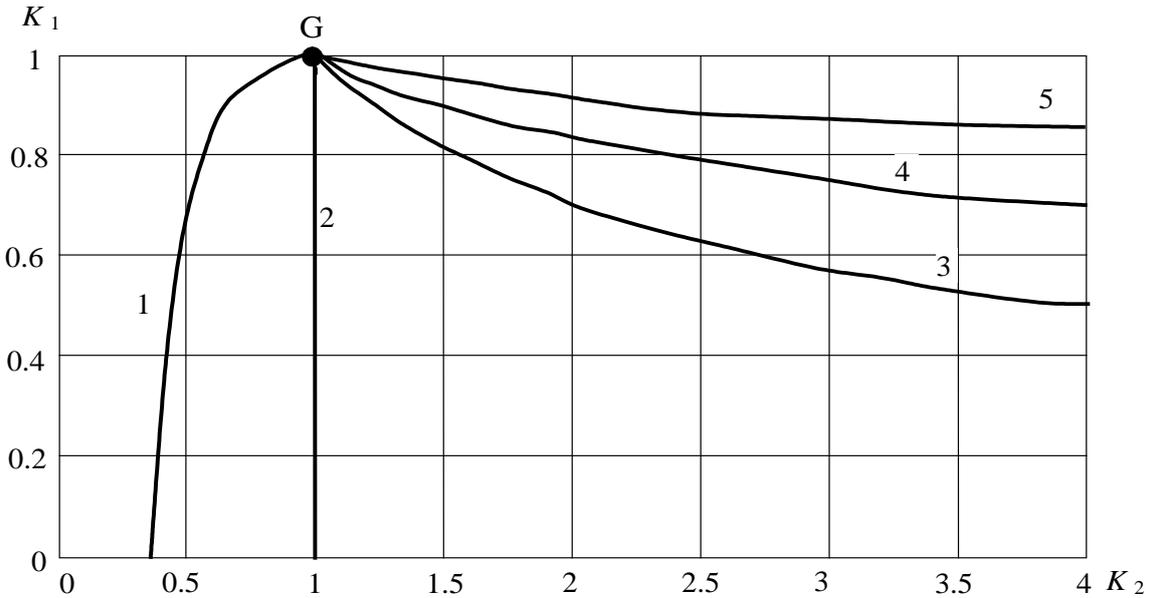


Рисунок 1 – Диаграмма односторонних законов распределения

На рисунке 1 область существования распределения I типа и его частных случаев расположена слева от кривой 3, характеризующей собой область существования логарифмического нормального распределения. Кривая 1 характеризует область существования степенного закона, а точка G – гауссовского распределения. Область существования бета-распределения расположена слева от кривой 2, характеризующей собой область существования гамма-распределения.

**II тип распределения.** В данном случае параметр  $b_1 \neq 0$ , а параметр  $b_2 = 0$ . При этом ПРВ имеет вид:

$$p(x) = \frac{c x^{\alpha c - 1}}{\Gamma(\alpha) \beta^{\alpha c}} \exp\left(-\frac{x^c}{\beta^c}\right), \quad 0 < x < \infty, \tag{9}$$

где  $\alpha > 0$ ,  $c > 0$  – параметры формы;  
 $\beta > 0$  – параметр масштаба;  
 $\Gamma(z)$  – гамма-функция.

Данное распределение называют обобщенным гамма-распределением [8]. Его частными случаями являются: распределение Релея при  $\alpha = 1$ ,  $\beta = \sqrt{2} \sigma$  и  $c = 2$ ; экспоненциальное распределение при  $\alpha = 1$  и  $c = 1$ ; гамма-распределение при  $\alpha = v + 1$  и  $c = 1$ ; распределение хи-квадрат при  $\alpha = 0,5n$ ,  $c = 1$  и  $\beta = 2$ ; распределение Накагами при  $\alpha = m$ ,  $\beta = \sqrt{\Omega/m}$  и  $c = 2$ ; распределение Вейбулла при  $\alpha = 1$  и  $\beta^{-c} = \lambda$ . Предельными случаями (9) являются степенной закон при  $\alpha \rightarrow 0$  и  $c \rightarrow \infty$ ; логарифмическое нормальное распределение при  $\alpha \rightarrow \infty$  и  $c \rightarrow 0$ . Само обобщенное гамма-распределение является предельным случаем ПРВ (7) при  $v \rightarrow \infty$ .

Подставив (9) в (8) и проинтегрировав, получим начальные моменты  $s$  – го порядка:

$$m_s = \beta^s \frac{\Gamma(\alpha + s/c)}{\Gamma(\alpha)}. \quad (10)$$

Следует отметить важное свойство моментов, присущее распределению (9) и представленное в виде равенства:

$$\frac{m_{(n+1)c} m_{1c} - m_{nc} m_{2c}}{(n-1)m_{nc}(m_{2c} - m_{1c}^2)} = 1, \quad (11)$$

где  $n \geq 2$ .

Это свойство доказывается подстановкой выражения (10) в (11) для соответствующих начальных моментов.

На рисунке 1 область существования распределения II типа расположена между кривыми 1 и 3. Прямая 2 соответствует области существования гамма-распределения.

**III тип распределения.** В этом случае параметр  $b_1 > 0$  и параметр  $b_2 > 0$ . Подставив (3) в (6) и проинтегрировав [12], в результате получим ПРВ:

$$p(x) = \frac{c x^{\alpha c - 1}}{B(\alpha, \nu) \lambda^{\alpha c} \left(1 + \frac{x^c}{\lambda^c}\right)^{\alpha + \nu}}, \quad 0 < x < \infty, \quad (12)$$

где  $\nu > 0, 0 < \alpha < \nu, c > 0$  – параметры формы;  
 $\lambda > 0$  – параметр масштаба.

Частными случаями данной ПРВ являются: бета-распределение II рода при  $c = 1$ ;  $F$ -распределение при  $\alpha = 0,5n_1, \nu = 0,5n_2, c = 1$  и  $\lambda = n_2/n_1$ . Предельным случаем распределения (12) является обобщенное гамма-распределение (9) при  $\nu \rightarrow \infty$  и  $\lambda = \beta$ .

После подстановки (12) в (8) и интегрирования получим начальные моменты  $s$ – го порядка:

$$m_s = \frac{\lambda^s \Gamma(\alpha + s/c) \Gamma(\nu - s/c)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\nu)}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что для ПРВ (12) существуют только те начальные моменты, порядок  $s$  которых удовлетворяет условию  $s < \nu c$ . На рисунке 1 область существования распределения III расположена между кривой 1 и кривой 5. Она перекрывается значительно с областью существования распределения I и включает в себя полностью область существования распределения II.

**IV тип распределения.** Распределение этого типа имеет место, когда параметр  $b_1 = 0$ , а параметр  $b_2 \neq 0$ . ПРВ имеет вид:

$$p(x) = \frac{c \beta^{\alpha c}}{\Gamma(\alpha) x^{\alpha c + 1}} \exp\left(-\frac{\beta^c}{x^c}\right), \quad 0 < x < \infty. \quad (14)$$

где  $\alpha > 0, c > 0$  – параметры формы;  
 $\beta > 0$  – параметр масштаба.

Частными случаями (14) при  $c = 1$  является V тип распределения по классификации Пирсона, а при  $c \rightarrow \infty$  – распределение Парето. Подставив (14) в (8) и проинтегрировав, получим начальные моменты  $s$ – го порядка:

$$m_s = \beta^s \Gamma(\alpha - s/c) / \Gamma(\alpha). \quad (15)$$

Из (15) следует, что для ПРВ (14) существуют только те начальные моменты, порядок  $s$  которых удовлетворяет условию  $s < \alpha c$ . На рисунке 1 область существования распределения IV типа расположена между кривыми 3 и 5. Кривая 5 характеризует область существования распределения Парето.

**V тип распределения.** В этом случае параметры  $b_1 < 0, b_2 > 0$ . ПРВ имеет вид:

$$p(x) = \frac{c \chi^{\alpha c}}{B(\alpha, \nu) x^{\alpha c + 1}} \left(1 - \frac{\chi^c}{x^c}\right)^{\nu - 1}, \quad \chi < x < \infty. \quad (16)$$

Частным случаем ПРВ (16) является распределение Парето при  $\nu = 1, c = 1$ . При  $\nu \rightarrow \infty$  распределение (16) преобразуется в распределение (14).

Подставив ПРВ (16) в (8) и проинтегрировав, получим начальные моменты  $s$ -го порядка:

$$m_s = \frac{\chi^s \Gamma(\alpha - s/c) \Gamma(\alpha + \nu)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\alpha + \nu - s/c)}. \quad (17)$$

Из (17) следует, что для ПРВ (16) существуют только те начальные прямые моменты, порядок  $s$  которых удовлетворяет условию  $s < \alpha c$ . На рисунке 1 область существования распределения V типа расположена справа от кривой 3.

**VI тип распределения.** В этом случае параметр  $b_1 < 0$  и параметр  $b_2 < 0$ . Подставив (3) в (6) и проинтегрировав [12], в результате получим ПРВ:

$$p(x) = \frac{c \lambda^{\alpha c}}{B(\alpha, \nu) x^{\alpha c + 1} \left(1 + \frac{\lambda^c}{x^c}\right)^{\alpha + \nu}}, \quad 0 < x < \infty, \quad (18)$$

где  $\nu > 0, 0 < \alpha < \nu, c > 0$  – параметры формы;  
 $\lambda > 0$  – параметр масштаба.

Предельным случаем распределения (18) является распределение (14) при  $\nu \rightarrow \infty$  и  $\lambda = \beta$ . После подстановки (18) в (8) и интегрирования получим начальные моменты  $s$ -го порядка:

$$m_s = \frac{\lambda^s \Gamma(\alpha - s/c) \Gamma(\nu + s/c)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\nu)}. \quad (19)$$

Из (19) следует, что для ПРВ (18) существуют только те начальные моменты, порядок  $s$  которых удовлетворяет условию  $s < \alpha c$ . На рисунке 1 область существования распределения VI расположена между кривой 1 и кривой 5. Она перекрывается значительно с областью существования распределения V и включает в себя полностью область существования распределения IV.

Для модифицированных распределений Пирсона (7), (9) и (12) характерны два свойства:

1) свойство моментов, определяемое равенством:

$$\frac{m_{3c}}{m_{4c}} \cdot \frac{3m_{2c}m_{3c} - m_{1c}(4m_{1c}m_{3c} - m_{2c}^2)}{4m_{2c}^2 - m_{1c}(3m_{1c}m_{2c} + m_{3c})} = 1. \quad (20)$$

2) для распределения (7) выполняется условие  $K_2 < 1$ , для распределения (9) –  $K_2 = 1$  и для распределения (12) –  $K_2 > 1$ .

Указанные свойства остаются справедливыми также для распределений (14), (16) и (18), если в соотношения (5) и (20) вместо прямых степенных моментов подставить обратные моменты. При этом для распределения (14) по-прежнему выполняется условие  $K_2 < 1$ , для распределения (16) –  $K_2 = 1$  и для распределения (18) –  $K_2 > 1$ . Рассмотренные свойства можно использовать для идентификации модифицированных распределений Пирсона.

Рассмотрим теперь предельные распределения для модифицированных распределений Пирсона, когда параметр  $c \rightarrow 0$ . Так как степенная функция связана с логарифмической функцией с помощью неравенства [13]:

$$\ln(x) \leq n(x^{1/n} - 1),$$

которое переходит в равенство при  $n \rightarrow \infty$ , то можно положить в подынтегральном выражении (6)  $x^c = c \ln(x) + 1$ . В результате вместо (6) получим:

$$p(x) = K_n \exp[\varphi(x)], \quad \varphi(x) = \int \frac{a_0 + a_1 \ln(x)}{b_1 x + b_2 x \ln(x)} dx. \quad (21)$$

**VII тип распределения (логарифмическое нормальное распределение).** В данном случае параметр  $b_1 \neq 0$ , а параметр  $b_2 = 0$ . Выражение для ПРВ имеет вид:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (22)$$

где  $\mu > 0$ ,  $\sigma > 0$  – параметры распределения.

Для распределения (22) существуют все прямые и обратные степенные моменты. Поэтому параметры ПРВ определяются первым начальным и вторым центральным логарифмическими моментами:

$$\mu = l_1, \quad \sigma = \sqrt{L_2}. \quad (23)$$

Область существования ПРВ (22) представлена на рисунке 1 кривой 5.

**VIII тип распределения.** Распределение этого типа имеет место, когда параметр  $b_1 > 0$ , а параметр  $b_2 < 0$ . ПРВ с учетом (21) имеет вид:

$$p(x) = \frac{\beta^\nu x^{\beta-1}}{\Gamma(\nu)\chi^\beta} \left(\ln\left(\frac{\chi}{x}\right)\right)^{\nu-1}, \quad 0 < x < \chi; \quad (24)$$

где  $\nu > 0$ ,  $\beta > 0$  – параметры формы;

$\chi > 0$  – параметр масштаба.

Подставив ПРВ (24) в соотношение (8) и проинтегрировав [12], получим начальные моменты  $s$  – го порядка

$$m_s = (\beta/(\beta + s))^\nu \chi^s. \quad (25)$$

На рисунке 1 область существования распределения VIII типа расположена слева от кривой 5.

**IX тип распределения.** В этом случае параметры  $b_1 < 0$ , а параметр  $b_2 > 0$ . ПРВ с учетом (21) имеет вид

$$p(x) = \frac{\beta^\nu \chi^\beta}{\Gamma(\nu)x^{\beta+1}} \left(\ln\left(\frac{x}{\chi}\right)\right)^{\nu-1}, \quad \chi < x < \infty, \quad (26)$$

где  $\nu > 0$ ,  $\beta > 0$  – параметры формы;

$\chi > 0$  – параметр масштаба.

Подставив ПРВ (26) в (8) и проинтегрировав [11], получим начальные моменты  $s$ – го порядка:

$$m_s = (\beta/(\beta - s))^\nu \chi^s. \quad (27)$$

Из (27) следует, что для распределения (26) существуют все обратные начальные моменты и только те прямые моменты, порядок которых удовлетворяет условию  $s < \beta$ . На рисунке 1 область существования распределения IX типа расположена справа от кривой 5. Параметры распределения (29) определяются соотношением (27) с помощью обратных моментов.

**X тип распределения.** Идентификация логарифмического нормального распределения (22) возможна только с использованием логарифмических моментов. Кроме распределения (22), к этой группе распределений относится распределение:

$$p(x) = \frac{(-0,5\ln(h))^{1-2\nu}}{B(0,5, \nu)x} \left(\ln\left(\frac{x}{h\chi}\right)\ln\left(\frac{\chi}{x}\right)\right)^{\nu-1}, \quad h\chi < x < \chi; \quad (28)$$

где  $0 < h < 1$  – параметр формы.

**XI тип распределения.** С использованием логарифмических моментов производится также идентификация распределения

$$p(x) = \frac{\lambda^{2\nu}}{B(0,5, \nu) x [\lambda^2 + (\ln(x) - \mu)^2]^{v+0,5}}, \quad 0 < x < \infty. \quad (29)$$

Для ПРВ (29) существует только часть логарифмических моментов. Следует отметить, что ПРВ (22), (24), (26), (28) и (29) можно получить путем функционального преобразования  $x = \exp(y)$  распределений Пирсона и их частных случаев.

Таким образом, предложенная модификация уравнения Пирсона позволяет получить широкий класс моделей односторонних законов распределений. При идентификации модифицированных распределений Пирсона (I – XI типов) с учетом рассмотренных их свойств можно использовать прямые и обратные степенные моменты (в том числе и дробного порядка), а также логарифмические моменты [14–16].

**2. Идентификация односторонних модифицированных распределений Пирсона.**

Аппроксимация экспериментальных распределений с помощью односторонних модифицированных распределений Пирсона может осуществляться по следующему алгоритму:

1. Вначале определяются выборочные логарифмические моменты:

$$\hat{l}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i, \quad \hat{L}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln(x_i) - \hat{l}_1)^s, \quad s = 2, 3, \quad (30)$$

а затем оценка коэффициента асимметрии:

$$L_a = L_3 / L_2^{1,5}.$$

2. Если для коэффициента  $L_a$  выполняется условие  $-0,1 \leq L_a \leq 0,1$ , то дополнительно определяется выборочный момент  $L_4$  и находится оценка совместного коэффициента асимметрии и эксцесса:

$$L_{ae} = \frac{6L_2^2}{L_4 + 3L_2^2}.$$

При выполнении условия  $L_{ae} > 1,04$  для аппроксимации экспериментального распределения используется распределение (28) с параметрами:

$$v = \frac{1,5 - L_{ae}}{L_{ae} - 1}; \quad \chi = \exp\left(\sqrt{\frac{2 - L_{ae}}{L_{ae} - 1}} L_2 + l_1\right); \quad h = \exp\left(-2\sqrt{\frac{2 - L_{ae}}{L_{ae} - 1}} L_2\right).$$

Если для коэффициента  $L_{ae}$  выполняется условие  $0,96 \leq L_{ae} \leq 1,04$ , то для аппроксимации экспериментального распределения используется логарифмическое нормальное распределение (22), параметры которого в соответствии с (23) определяются первым начальным и вторым центральным логарифмическими моментами ( $\mu = l_1, \sigma = \sqrt{L_2}$ ).

При выполнении условия  $L_{ae} < 0,96$  для аппроксимации экспериментального распределения используется распределение (29) с параметрами:

$$v = \frac{2 - 1,5L_{ae}}{1 - L_{ae}}; \quad \lambda = \sqrt{\frac{2 - L_{ae}}{1 - L_{ae}}} L_2; \quad \mu = l_1.$$

3. Если коэффициент  $L_a < -0,1$ , то для аппроксимации экспериментального распределения используется одно из распределений (7), (9) либо (12). Вид распределения и его параметры можно определить следующим образом: вначале находится оценка параметра  $c$  из решения уравнения:

$$\frac{m_{3c}}{m_{4c}} \cdot \frac{3m_{2c}m_{3c} - m_{1c}(4m_{1c}m_{3c} - m_{2c}^2)}{4m_{2c}^2 - m_{1c}(3m_{1c}m_{2c} + m_{3c})} = 1, \quad (31)$$

где

$$\widehat{m}_{1c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^c, \quad \widehat{m}_{2c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{2c}, \quad \widehat{m}_{3c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{3c}, \quad \widehat{m}_{4c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{4c}. \quad (32)$$

Затем определяются оценки коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  с помощью соотношений (5).

Если выполняется условие  $K_2 < 1$ , то для аппроксимации экспериментального распределения следует использовать распределение (7) с параметрами:

$$\alpha = \frac{2K_1K_2}{1+K_2-2K_1K_2}; \quad \nu = \frac{2K_2}{1-K_2} - \alpha; \quad \chi = \left( m_{1c} \left( 1 + \frac{\nu}{\alpha} \right) \right)^{1/c}. \quad (33)$$

Если  $K_2 = 1$ , то для аппроксимации экспериментального распределения используется распределение (9) с параметрами:

$$\alpha = \frac{K_1}{1-K_1}; \quad \beta = \left( \frac{m_{1c}}{\alpha} \right)^{1/c}. \quad (34)$$

При выполнении условия  $K_2 > 1$  для аппроксимации экспериментального распределения используется распределение (12) с параметрами:

$$\alpha = \frac{2K_1K_2}{1+K_2-2K_1K_2}; \quad \nu = \frac{2K_2}{K_2-1} + 1; \quad \lambda = \left( m_{1c} \frac{\nu-1}{\alpha} \right)^{1/c}. \quad (35)$$

4. Если коэффициент  $L_a > 0,1$ , то для аппроксимации экспериментального распределения используется одно из распределений (14), (16) либо (18). Вид распределения и его параметры можно определить следующим образом: вначале определяется оценка параметра  $c$  из решения уравнения (31), а затем определяются оценки коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  с помощью соотношений (5). При этом в соотношениях (5) и (31) теперь используются выборочные обратные моменты:

$$\widehat{m}_{1c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{-c}, \quad \widehat{m}_{2c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{-2c}, \quad \widehat{m}_{3c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{-3c}, \quad \widehat{m}_{4c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{-4c}. \quad (36)$$

Если выполняется условие  $K_2 < 1$ , то для аппроксимации экспериментального распределения следует использовать распределение (14) с параметрами  $\alpha$ ,  $\nu$  и  $\chi$ , которые определяются соотношениями (33) с учетом (36).

Если  $K_2 = 1$ , то для аппроксимации экспериментального распределения используется распределение (16) с параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ , определяемыми соотношениями (34) с учетом (36).

При выполнении условия  $K_2 > 1$  для аппроксимации экспериментального распределения используется распределение (18) с параметрами (35).

5. Когда оценка параметра  $c \rightarrow 0$  (на практике  $c \leq 0,1$ ), то аппроксимация экспериментальных распределений производится с использованием распределений (24) и (26). Если коэффициент  $L_a < -0,1$ , то для аппроксимации распределения используется распределение (24). Его параметры можно определить следующим образом: вначале определяется оценка параметра  $\beta$  из решения уравнения:

$$\frac{\ln(m_1) - l_1}{\ln(m_2) - 2\ln(m_1)} = \frac{\ln(\beta) - \ln(\beta+1) + 1/\beta}{2\ln(\beta+1) - \ln(\beta) - \ln(\beta+2)},$$

где

$$\widehat{m}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \widehat{m}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2.$$

Затем определяются оценки параметров  $\nu$  и  $\chi$  с помощью соотношений:

$$\nu = \frac{\ln(m_1) - l_1}{\ln(\beta) - \ln(\beta+1) + 1/\beta}, \quad \chi = \exp\left( l_1 + \frac{\nu}{\beta} \right).$$

Если коэффициент  $L_u > 0,1$  и  $c \leq 0,1$ , то для аппроксимации распределения используется распределение (26). Его параметры определяются аналогично параметрам распределения (24). При этом оценка параметр  $\beta$  определяется при решении уравнения:

$$\frac{\ln(m_1) + l_1}{\ln(m_2) - 2\ln(m_1)} = \frac{\ln(\beta) - \ln(\beta + 1) + 1/\beta}{2\ln(\beta + 1) - \ln(\beta) - \ln(\beta + 2)},$$

где

$$\hat{m}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}, \quad \hat{m}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2}.$$

Оценки параметров  $\nu$  и  $\chi$  соответствуют выражениям:

$$\nu = \frac{\ln(m_1) + l_1}{\ln(\beta) - \ln(\beta + 1) + 1/\beta}, \quad \chi = \exp\left(l_1 - \frac{\nu}{\beta}\right).$$

Если полученная оценка параметра  $c \geq 3$ , то можно полагать  $c = 3$ . При этом погрешность аппроксимации экспериментального распределения возрастает незначительно.

Рассмотренную методику аппроксимации экспериментальных распределений целесообразно использовать при объеме выборки  $n \geq 1000$ .

Аналогичным образом можно производить аппроксимацию теоретических распределений, только вместо выборочных моментов в этом случае используются соответствующие степенные и логарифмические моменты аппроксимируемого теоретического распределения.

### 3. Двухсторонние модифицированные распределения Пирсона и их идентификация.

Двухсторонние модифицированные распределения Пирсона можно получить путем функционального преобразования  $z = \ln(x)$  односторонних модифицированные распределений Пирсона. В результате функционального преобразования распределения (7), (9), (12), (14), (16), (18), (22), (24) и (26) примут соответственно следующий вид:

$$p(z) = \frac{c \exp(\alpha c(z - \mu))}{B(\alpha, \nu)} (1 - \exp(c(z - \mu)))^{\nu-1}, \quad -\infty < z < \mu; \quad (37)$$

$$p(z) = \frac{c \exp(\alpha c(z - \mu))}{\Gamma(\alpha)} \exp[-\exp(c(z - \mu))], \quad -\infty < z < \infty; \quad (38)$$

$$p(z) = \frac{c \exp(\alpha c(z - \mu))}{B(\alpha, \nu)[1 + \exp(c(z - \mu))]^{\alpha+\nu}}, \quad -\infty < z < \infty; \quad (39)$$

$$p(z) = \frac{c \exp(-\alpha c(z - \mu))}{\Gamma(\alpha)} \exp[-\exp(-c(z - \mu))], \quad -\infty < z < \infty; \quad (40)$$

$$p(z) = \frac{c \exp(-\alpha c(z - \mu))}{B(\alpha, \nu)} (1 - \exp(-c(z - \mu)))^{\nu-1}, \quad \mu < z < \infty; \quad (41)$$

$$p(z) = \frac{c \exp(-\alpha c(z - \mu))}{B(\alpha, \nu)[1 + \exp(-c(z - \mu))]^{\alpha+\nu}}, \quad -\infty < z < \infty; \quad (42)$$

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(z - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad -\infty < z < \infty; \quad (43)$$

$$p(z) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (\mu - z)^{\alpha-1} \exp[-\lambda(\mu - z)], \quad -\infty < z < \mu; \quad (44)$$

$$p(z) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (z - \mu)^{\alpha-1} \exp[-\lambda(z - \mu)], \quad \mu < z < \infty; \quad (45)$$

$$p(z) = \frac{(z + \chi - \mu)^{\nu-1} (\chi - z + \mu)^{\nu-1}}{(\chi)^{2\nu-1} B(0.5, \nu)}, \quad -\chi + \mu < z < \chi + \mu; \quad (46)$$

$$p(z) = \frac{\lambda^{2\nu}}{B(0,5, \nu) [\lambda^2 + (z - \mu)^2]^{\nu+0,5}}, \quad -\infty < z < \infty; \quad (47)$$

где  $\mu$  – параметр сдвига.

В соотношениях (39) и (42) выполняется условие  $0 < \alpha < \nu$ .

Двухсторонние модифицированные распределения Пирсона (37) – (47) можно применять для аппроксимации экспериментальных распределений СВ, принимающих отрицательные и положительные значения. При определении параметров двухсторонних распределений Пирсона вместо выборочных прямых и обратных степенных моментов используются прямые и обратные экспоненциальные моменты, а также выборочные прямые степенные моменты вместо логарифмических моментов. Это позволяет применить для идентификации параметров двухсторонних распределений Пирсона алгоритм, рассмотренный выше в параграфе 2. Установлено, что если коэффициент  $L_a < 0$ , то в данном законе распределения преобладают прямые экспоненциальные моменты, а если  $L_a > 0$ , то преобладают обратные экспоненциальные моменты.

Аналогичным образом можно производить аппроксимацию теоретических двухсторонних распределений, только вместо выборочных моментов в этом случае используются соответствующие степенные и экспоненциальные моменты аппроксимируемого теоретического распределения.

Таким образом, предложена модификация распределений Пирсона для аппроксимации односторонних и двухсторонних законов распределения экспериментальных данных, которая позволяет получить более широкий класс законов распределений, чем существующая система распределений Пирсона. Разработана методика идентификации параметров модифицированных распределений Пирсона с использованием степенных, экспоненциальных и логарифмических моментов. При этом появляется возможность во многих случаях повысить точность получаемых оценок параметров распределений. Разработана топографическая классификация односторонних законов распределения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pearson, K. On the dissection of asymmetrical frequency curves / K. Pearson // *Phil. Trans. Roy. Soc.* – 1894. – Vol. A185. – p.p. 71–110.
2. Карпов, И.Г. Модифицированное уравнение Пирсона для распределений непрерывных случайных величин / И.Г. Карпов Ю.Т. Зырянов, О.В. Мельник // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – Орел. – 2013. – № 1 (297). – С. 16–23.
3. Кендалл, М. Теория распределений. / М. Кендалл, А. Стюарт – М.: Наука, 1966.
4. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006.
5. Бостанджиян, В.А. Распределение Пирсона, Джонсона, Вейбулла и обратное нормальное. Оценивание их параметров / В.А. Бостанджиян. – Черноголовка: Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН, 2009.
6. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер. – М.: Мир, 1967. – Т. 2.
7. Одномерные непрерывные распределения: часть 1 / Н.Л. Джонсон, С. Коц, Н. Балакришнан. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010.
8. Одномерные непрерывные распределения: часть 2 / Н.Л. Джонсон, С. Коц, Н. Балакришнан. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
9. Карпов, И.Г. Модификация уравнения Пирсона для односторонних законов распределения непрерывных случайных величин / И.Г. Карпов // *Радиотехника.* – 1999. – № 3. – С. 60–65.
10. Карпов, И.Г. Методы обобщенного вероятностного описания и идентификации негауссовских случайных величин и процессов / И.Г. Карпов, М.Г. Карпов, Д.К. Проскурин. – Воронеж: ВГУ, 2010.
11. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1988.
12. Прудников, А.П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1984.
13. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979.
14. Карпов, И.Г. Приближенная идентификация законов распределения помех в адаптивных приемниках с использованием метода моментов / И.Г. Карпов // *Радиотехника.* – 1998. – № 3. – С. 11–14.
15. Карпов, И.Г. Аппроксимация теоретических и экспериментальных распределений с использованием степенных и логарифмических моментов / И.Г. Карпов, В.В. Евсеев // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2008. – № 11. – С. 30–37.

**Карпов Иван Георгиевич**  
ФГБОУ ВПО Тамбовский государственный техниче-  
ский университет, г. Тамбов  
Доктор технических наук, профессор кафедры инфор-  
мационные 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 техниче-  
ский университет, г. Тамбов  
Доктор технических наук, профессор кафедры конст-  
руирование радиоэлектронных и микропроцессорных  
систем  
392000, Тамбов, ул. Советская, 106  
Тел: (4752) 72–69–64, +9156662190  
E-mail: zut-tmb@mail.ru

I.G. KARPOV, YU.T. ZYRYANOV

## METHODS OF IDENTIFICATION PARAMETERS MODIFIED PEARSON DISTRIBUTION BY USING POWER, EXPONENTIAL AND LOGARITHMIC MOMENTS

*Offered the distributions of Pearson for approximation of laws of distribution of experimental data which allows to receive wider class of laws of distributions, than existing system of distributions of Pearson is offered. The technique of identification of parametres of the modified distributions of Pearson with use sedate, exponential and the logarithmic moments is developed.*

**Keywords:** *the equations of Pearson, system of distributions of Pearson, modified distribu-  
tions of Pearson, the sedate moments, the exponential moments, the logarithmic moments.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Pearson, K. On the dissection of asymmetrical frequency curves / K. Pearson // Phil. Trans. Roy. Soc. – 1894. – Vol. A185. – p.p. 71–110.
2. Karpov, I.G. Modifitsirovannoye uravneniye Pirsona dlya raspredeleniy nepreryvnykh sluchaynykh velichin / I.G. Karpov YU.T. Zyryanov, O.V. Melnik // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel. – 2013. – № 1 (297). – S. 16–23.
3. Kendall, M. Teoriya raspredeleniy. / M. Kendall, A. Styuart – M.: Nauka, 1966.
4. Kobzar, A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov / A.I. Kobzar. – M.: Fizmatlit, 2006.
5. Bostandzhiyan, V.A. Raspredeleniye Pirsona, Dzhonsona, Veybulla i obratnoye normalnoye. Otsenivaniye ikh parametrov / V.A. Bostandzhiyan. – Chernogolovka: Redaktsionno–izdatelskiy otdel IPKHF RAN, 2009.
6. Feller, V. Vvedeniye v teoriyu veroyatnostey i yeye prilozheniya / V. Feller. – M.: Mir, 1967. – T. 2.
7. Odnomernyye nepreryvnyye raspredeleniya: chast 1 / N.L. Dzhonson, S. Kots, N. Balakrishnan. – M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010.
8. Odnomernyye nepreryvnyye raspredeleniya: chast 2 / N.L. Dzhonson, S. Kots, N. Balakrishnan. – M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012.
9. Karpov, I.G. Modifikatsiya uravneniya Pirsona dlya odnostoronnykh zakonov raspredeleniya nepreryvnykh sluchaynykh velichin / I.G. Karpov // Radiotekhnika. – 1999. – № 3. – S. 60–65.
10. Karpov, I.G. Metody obobshchennogo veroyatnostnogo opisaniya i identifikatsii negaussovskikh sluchaynykh velichin i protsessov / I.G. Karpov, M.G. Karpov, D.K. Proskurin. – Voronezh: VGU, 2010.
11. Gnedenko, B.V. Kurs teorii veroyatnostey / B.V. Gnedenko. – M.: Nauka, 1988.
12. Prudnikov, A.P. Integraly i ryady. Elementarnyye funktsii / A.P. Prudnikov, Yu.A. Brychkov, O.I. Marichev. – M.: Nauka, 1984.
13. Spravochnik po spetsialnym funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami./Pod red. M. Abramovitsa i I. Stigan. – M.: Nauka, 1979.
14. Karpov, I.G. Priblizhennaya identifikatsiya zakonov raspredeleniya pomekh v adaptivnykh priyemnikakh s ispolzovaniyem metoda momentov / I.G. Karpov // Radiotekhnika. – 1998. – № 3. – S. 11–14.
15. Karpov, I.G. Approksimatsiya teoreticheskikh i eksperimentalnykh raspredeleniy s ispolzovaniyem stepennykh i logarifmicheskikh momentov / I.G. Karpov, V.V. Yevseyev // Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. – 2008. – № 11. – S. 30–37.

**Karpov Ivan Georgiyevich**  
Tambov State Technical University, Tambov  
Doctor of Technical Sciences, Professor of Information  
Systems and Data Protection  
392000, Tambov, ul. Soviet, 106  
Tel: (4752) 73–26–27, 9108595874  
E-mail: zeratul68@mail.ru

**Zyryanov Yuriy Trifonovich**  
Tambov State Technical University, Tambov  
Doctor of Technical Sciences, professor of design of elec-  
tronic and Microprocessor Systems  
392000, Tambov, ul. Soviet, 106  
Tel: (4752) 72–69–64, 9156662190  
E-mail: zut-tmb@mail.ru

Д.Л. КРЫЛОВ, В.М. СОЛДАТКИН, Е.С. СОЛДАТКИНА

## ПОСТРОЕНИЕ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ САМОЛЕТА С НЕПОДВИЖНЫМ НЕВЫСТУПАЮЩИМ ПРИЕМНИКОМ ПОТОКА

*Раскрываются принципы построения системы воздушных сигналов самолета на основе панорамного ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, дополненного приемником статического давления набегающего воздушного потока. Приводится функциональная схема и алгоритмы обработки информации, раскрывается методика и проводится оценка потенциальной точности измерительных каналов системы.*

**Ключевые слова:** самолет, воздушные сигналы, измерение, система, неподвижный невыступающий приемник, панорамный ионно–меточный датчик, приемник статического давления потока, функциональная схема, алгоритмы обработки информации, точность измерительных каналов, методика, оценка.

При обеспечении безопасности полета самолета в пределах атмосферы и решении полетных задач широко используется информация о воздушных сигналах – барометрической высоте, величине и составляющих вектора истинной воздушной скорости, аэродинамических углах атаки и скольжения, приборной скорости и числе Маха, которые определяют динамику движения самолета относительно окружающей воздушной среды [1].

Современные средства измерения воздушных сигналов самолета реализуют аэродинамический и аэрометрический методы измерения и содержат вынесенные в набегающий воздушный поток флюгерные датчики аэродинамических углов, приемники воздушных давлений, приемники температуры торможения [2, 3], выступающие за обшивку фюзеляжа. Это нарушает аэродинамику самолета, особенно при его маневрировании, приводит к появлению дополнительных инструментальных и методических погрешностей при изменении параметров и состояния окружающей воздушной среды [4, 5].

Принципиальная возможность создания системы воздушных сигналов самолета с невыступающими приемниками первичной информации открывается при построении ее на основе ионно–меточных датчиков аэродинамических углов и истинной воздушной скорости [2, 6].

На рисунке 1 приведена функциональная схема системы воздушных сигналов самолета на основе ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки [7].

Ионно–меточный датчик содержит систему приемных электродов 1, электроды 3 которой расположены на одинаковом расстоянии по окружности радиуса  $R$  с центром в точке 0 расположения разрядника 2 генератора ионных меток. Приемные электроды 3 соединены со входами предварительных усилителей ПУ канала регистрации ионных меток, расположенных в блоке предварительных усилителей БПУ.

За счет выбора конструктивных параметров системы приемных электродов с помощью четных приемных электродов на выходах четных предварительных усилителей формируются положительные и отрицательные полуволны синусоидальных угловых характеристик информативных сигналов  $U(\alpha)$  [7]. С помощью нечетных приемных электродов на выходах нечетных предварительных усилителей формируются положительные и отрицательные полуволны косинусоидальных угловых характеристик информативных сигналов  $U(\alpha)$ . Выходные сигналы блока предварительных усилителей БПУ подаются на входы измерительной схемы ИС.

Измерительная схема датчика включает три канала: канал определения рабочего сектора измеряемого аэродинамического угла (канал грубого отсчета), канал точного измерения измеряемого угла в пределах рабочего сектора и канал измерения воздушной скорости, выходы которых подключены к вычислительному устройству ВУ. На выходе вычислительного устройства ВУ формируются цифровые сигналы  $N_\alpha$  и  $N_v$ , являющиеся выходом дат-

чика по аэродинамическому углу  $\alpha$  и величине (модулю)  $\bar{V}_B$  вектора истинной воздушной скорости.

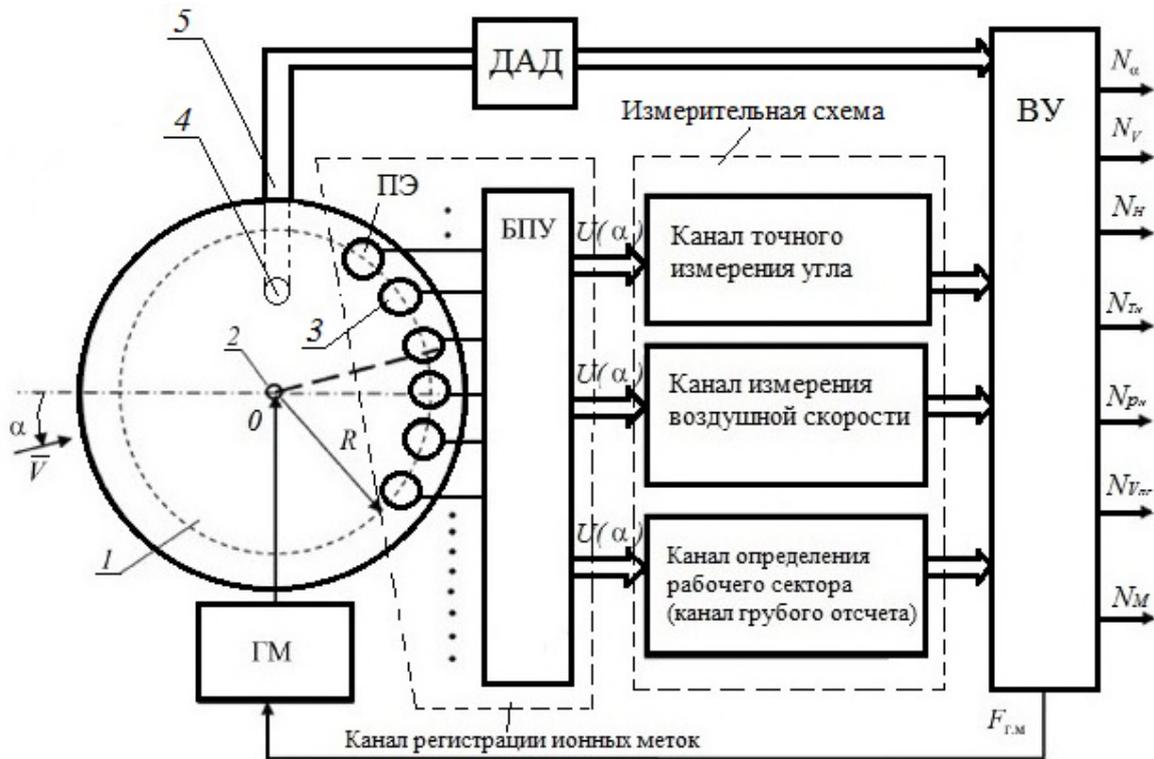


Рисунок 1 – Функциональная схема системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока

Вычислительное устройство ВУ выдает также сигнал  $F_{ГМ}$ , управляющий работой генератора меток ГМ, который задает частоту  $F_{ГМ}$  формирования ионной метки с ярко выраженным электростатическим зарядом  $q_M$ , например, путем подачи высоковольтного импульса на разрядник 2, в зазоре которого происходит искровой разряд и формирование ионной метки.

Ионно–меточный датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости устанавливается на самолете таким образом, чтобы система приемных электродов 1 (см. рисунок) находилась в плоскости изменения измеряемого аэродинамического угла  $\alpha$  вектора  $\bar{V}_B = \bar{V}$  истинной воздушной скорости (где  $\bar{V}$  – вектор скорости набегающего воздушного потока). Цикл измерения начинается с подачи с выхода вычислительного устройства ВУ сигнала  $F_{ГМ}$ . В соответствии с сигналом  $F_{ГМ}$  генератор ионных меток ГМ выдает импульс высоковольтного напряжения на разрядник 2, установленный в точке 0 генерации ионной метки. За счет искрового разряда разрядника в точке 0 образуется ионизированная область – ионная метка с явно выраженным электростатическим зарядом. Заряженная ионная метка перемещается совместно с вектором скорости  $\bar{V}$  набегающего воздушного потока и приобретает его параметры движения – скорость  $V = V_B$  и направление  $\alpha$  относительно оси симметрии системы приемных электродов 1. При перемещении ионной метки совместно с набегающим воздушным потоком заряженная ионная метка пролетает вблизи приемных электродов 3 и наводит (индуцирует) на них электростатические заряды, величина которых зависит от расстояния ионной метки от приемного электрода и углового положения  $\alpha$  траектории движения ионной метки.

При попадании траектории ионной метки в  $i$ -ый грубый канал текущее значение измеряемого аэродинамического угла определяется как:

$$\alpha = i\alpha_0 + \alpha_p, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – угол, охватывающий рабочий сектор грубого канала отсчета (при  $i_{\max} = 4$ ,  $\alpha_0 = 90^\circ$ );

$i$  – номер рабочего сектора ( $i = \overline{1,4}$ ).

Сигналы, пропорциональные синусу  $A \sin \alpha_i$  и косинусу  $A \cos \alpha_i$  измеряемого угла в рабочем секторе грубого канала, обрабатываются в вычислительном устройстве, на выходе которого выдается цифровой код, связанный со значением  $\alpha_p$  измеряемого аэродинамического угла точного канала соотношением:

$$\alpha_p = \arctg \frac{A \sin \alpha_i}{A \cos \alpha_i}, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  – текущее значение аэродинамического угла в пределах  $i$ -го рабочего сектора.

При работе канала измерения истинной воздушной скорости формируется интервал времени  $\tau_V$  пролета ионной метки расстояния  $R$  от точки  $O$  генерации ионной метки до окружности с приемными электродами. В соответствии с интервалом времени  $\tau_V$  в вычислительном устройстве вырабатывается цифровой код  $N_V$ , пропорциональный величине истинной воздушной скорости:

$$V_B = \frac{R}{\tau_V}. \quad (3)$$

Цифровые коды  $N_\alpha$ ,  $N_V$  подаются на средства отображения информации и другим потребителям.

Таким образом, ионно–меточный датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости не имеет выступающих в набегающий воздушный поток приемников, нарушающих аэродинамику летательного аппарата. В ионно–меточном датчике аэродинамического угла и истинной воздушной скорости реализуется кинематический метод измерения величины (модуля) и угла направления вектора истинной воздушной скорости, при котором точность измерения не зависит от состояния окружающей среды (температуры, атмосферного давления, плотности, влажности и т.п.). Система приемных электродов в виде расположенных по окружности металлических пластин позволяет сформировать логотметрические информативные сигналы с синусоидальной и косинусоидальной угловыми характеристиками и обеспечить измерение аэродинамического угла  $\alpha$  во всем диапазоне его изменения, т.е. от  $0$  до  $360^\circ$  или в диапазоне  $\pm 180^\circ$  без увеличения габаритных размеров системы приемных электродов. При этом конструктивное выполнение приемных электродов совместно с предварительными усилителями канала регистрации в виде автономных модулей, позволяет существенно повысить помехоустойчивость канала регистрации ионных меток и увеличить разрешающую способность по аэродинамическому углу и истинной воздушной скорости при малых габаритах системы приемных электродов. Выполнение измерительной схемы датчика в виде канала определения рабочего сектора измеряемого угла, являющегося каналом грубого отсчета, и канала точного измерения угла в каждом из рабочих секторов, подключенных к вычислительному устройству, позволяет существенно повысить разрешающую способность по измеряемому аэродинамическому углу во всем диапазоне его изменения без увеличения числа приемных электродов и габаритных размеров системы приемных электродов. Выполнение каналов определения рабочего сектора измеряемого угла и канала точного измерения аэродинамического угла внутри каждого рабочего сектора обеспечивает надежное определение рабочего сектора и точное измерение текущего значения угла внутри каждого рабочего сектора, что также позволяет повысить точность измерения в широком диапазоне изменения аэродинамического угла при одновременном изменении величины истинной воздушной скорости. Выполнение канала измерения истинной воздушной скорости позволяет с высокой точностью формировать интервал времени пролета ионной метки от точки генерации до окружности с приемными электродами при одновременном изменении аэродинамического угла,

что повышает точность измерения истинной воздушной скорости.

Для обеспечения одновременного измерения всех воздушных сигналов самолета с использованием рассмотренного ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости предлагается на плате с системой приемных электродов расположить отверстие – приемник 4 (рисунок 1) для забора статического давления  $P_H$  набегающего воздушного потока, которое пневмоканалом 5 связано со входом датчика абсолютного давления ДАД, например цифрового, выход которого подключен ко входу вычислительного устройства ВУ. Вычислительное устройство выполнено в виде вычислителя, реализующего как алгоритмы (1) – (3) определения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, так и алгоритмы определения других воздушных сигналов самолета.

По воспринимаемому статическому давлению  $P_H$  в соответствии со стандартными зависимостями, соответствующими ГОСТ 4401–81 [8], определяется текущая абсолютная барометрическая высота полета  $H$  по формулам [4]:

а) при  $[-2000 \text{ м} < H < 11000 \text{ м}]$ :

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right]; \quad (4)$$

б) при  $[11000 \text{ м} \leq H < 15000 \text{ м}]$ :

$$H = H_{11} + RT_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H}, \quad (5)$$

где  $T_0 = 288,15 \text{ К}$  – средняя абсолютная температура на уровне моря;

$P_0 = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$  – среднее абсолютное давление на уровне моря;

$\tau = 0,0065 \text{ К/м}$  – температурный градиент, определяющий изменение абсолютной температуры воздуха  $T_H$  при измерении высоты;

$R = 29,27125 \text{ м/К}$  – газовая постоянная;

$P_H$  – абсолютное давление на текущей высоте  $H$ ;

$T_{11} = 216,65 \text{ К}$  и  $P_{11} = 22632 \text{ Па} = 169,754 \text{ мм рт. ст.}$  – абсолютная температура и давление воздуха на высоте  $H_{11} = 11000 \text{ м}$ .

Используя ГОСТ 5212–74 [9], истинную воздушную скорость  $V_B$  самолета, измеренную ионно–меточным датчиком, можно представить в виде:

$$V_B = \sqrt{2gRT_H \left( \frac{k}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{P_{\text{ДИН}}}{P_H} + 1 \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} = \sqrt{2gRT_H \left( \frac{k}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{P_{\text{П}}}{P_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (6)$$

где  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;

$k = 1,4$  – показатель адиабаты для воздуха;

$P_{\text{ДИН}} = \frac{\rho_H V_B^2}{2}$  – скоростной напор (динамическое давление) набегающего воздушного потока;

$P_{\text{П}} = P_H + P_{\text{ДИН}}$  – полное давление набегающего воздушного потока;

$\rho_H$  – плотность воздуха на высоте полета  $H$ , которую можно представить как [10]:

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_H}{P_0 T_0}, \quad (7)$$

где  $\rho_0 = 0,125 \text{ кг м}^3$  – массовая плотность воздуха на высоте  $H = 0$ .

Используя значение истинной воздушной скорости  $V_B$ , измеренное ионно–меточным

датчиком, и статическое давление  $P_H$ , воспринимаемое отверстие–приемником статического давления, в соответствии с выражениями (6) и (7), получим соотношение, которое устанавливает неявную, но однозначную связь истинной воздушной скорости  $V_B$  с абсолютной температурой  $T_H$  воздуха на высоте полета  $H$ , например вида [11]:

$$T_H = \frac{V_B^2}{2gR\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(1 + \frac{\rho_0}{2P_0T_0}T_HV_B^2\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}. \quad (8)$$

Определяя из соотношения (8) абсолютную температуру  $T_H$ , по зависимости (7) можно вычислить плотность воздуха  $\rho_H$  на высоте  $H$ .

В соответствии с ГОСТ 5212–74 [9] можно определить (вычислить) приборную скорость полета – истинную воздушную скорость, приведенную к нормальным условиям на уровне  $H = 0$ , по формуле:

$$V_{\text{ПР}} = \sqrt{2gRT_0\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(1 + \frac{\rho_0}{2P_0T_0}T_0V_B^2\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]} = \sqrt{2gRT_0\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(1 + \frac{\rho_0}{2P_0}V_B^2\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}. \quad (9)$$

При необходимости можно вычислить число Маха–Маевского, характеризующее отношение истинной воздушной скорости к скорости звука  $a_H = \sqrt{kgRT_H}$  на данной высоте  $H$ . При дозвуковой скорости полета уравнение для определения числа Маха – Маевского имеет вид:

$$M = \frac{V_B}{a_H} = \frac{V_B}{\sqrt{kgRT_H}} \sqrt{\frac{2}{k-1}\left[\left(1 + \frac{\rho_0T_H}{2P_0T_0}V_B^2\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}. \quad (10)$$

Следует отметить, что для исключения влияния угла скольжения на работу канала угла атаки на самолете необходимо использовать два ионно–меточных датчика, устанавливаемых на правом и левом сторонах фюзеляжа, при этом показания выходных сигналов по углу атаки обоих датчиков усредняются, снижая случайную составляющую погрешности измерения угла атаки самолета. Аналогично усредняются и выходные сигналы по другим высотно–скоростным параметрам, уменьшая случайную погрешность их измерения. Для измерения угла скольжения система приемных электродов еще одного ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости располагается в азимутальной плоскости рыскания. При этом использование трех неподвижных невыступающих приемников потока решает задачу резервирования измерительных каналов, повышения точности и надежности работы системы воздушных сигналов самолета.

При определении результирующих погрешностей измерения высотно–скоростных параметров самолета в измерительных каналах системы воздушных сигналов на основе ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с встроенным приемником статического давления необходимо учитывать методические и инструментальные погрешности, статические, собственные и вынужденные динамические погрешности.

В процессе проектирования и разработки системы воздушных сигналов самолета на основе ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с встроенным приемником статического давления с учетом конкретного места установки датчика на конкретном объекте применения проводится уточнение алгоритмов формирования и обработки первичной информации, а, следовательно, и учет систематических составляющих методических погрешностей измерительных каналов системы.

Снижение собственных и вынужденных динамических погрешностей измерительных

каналов системы обеспечивается за счет соответствующего выбора конструктивных параметров ионно–меточного датчика и использования в измерительных каналах фильтров доминирующих аэродинамических и турбулентных помех в месте установки датчика на фюзеляже самолета.

Часть основных и дополнительных систематических статических погрешностей измерительных каналов системы учитывается и снижается при проектировании ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости. Остаточные случайные погрешности измерительных каналов определяются по результатам экспериментальных исследований образцов датчика в аэродинамической трубе и в летном эксперименте.

За счет соответствующего выбора элементной базы каналов аналого–цифрового преобразования информативных сигналов и их обработки в вычислителе их инструментальные погрешности, могут быть существенно уменьшены.

Поэтому оценку потенциальной точности измерительных каналов системы воздушных сигналов самолета на основе ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с встроенным приемником статического давления проведем по данным инструментальной точности измерения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости ионно–меточного датчика МДУС, разработанного Казанским национальным исследовательским техническим университетом им. А.Н. Туполева–КАИ совместно с ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроение» и освоенного на его производственной базе.

Без учета методических погрешностей, обусловленных искажением набегающего воздушного потока в месте расположения ионно–меточного датчика с встроенным приемником статического давления, потенциальная точность канала определения барометрической высоты будет определяться инструментальной погрешностью используемого датчика абсолютного давления.

Используя выражение (4), определяющего связь погрешности  $\Delta H$  измерения абсолютной барометрической высоты  $H$  с погрешностью  $\Delta P_H$  используемого в системе датчика абсолютного давления, можно оценить соотношением:

$$\Delta H = 2396,53 \frac{1}{P_H^{0,807169}} \Delta P_H \cdot \quad (11)$$

Определим значение основной погрешности  $\Delta H$  канала измерения барометрической высоты при использовании в качестве датчика абсолютного давления отечественных датчиков типа ДДГ, ДДЧП, ДДГМ [12]. При допустимой относительной погрешности указанных датчиков  $< 0,01\%$  [12] в диапазоне изменения высоты от 0 до 12000 м, при измерении статического давления в диапазоне от 101325 Па до 19399,4 Па инструментальная погрешность измерения барометрической высоты не будет превышать значения  $\Delta H < \pm 5...10$  м.

Как показывает опыт разработки ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости МДУС, при скорости полета более 40 км/ч погрешность измерения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости не превышают значений  $\Delta \alpha = \pm 0,15...0,2^\circ$ ,  $\Delta V_B = \pm (0,004...0,005) V_B$ .

Используя соотношение (8), оценим погрешность  $\Delta T_H$  определения температуры наружного воздуха в каналах системы воздушных сигналов с учетом погрешности  $\Delta V_B$  измерения истинной воздушной скорости ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Подставляя в (8) численные значения входящих величин, получим:

$$T_H = \frac{V_B^2}{1872,1[(1 + 0,2 \cdot 10^{-8} T_H V_B^2)^{0,286}] - 1} \cdot \quad (12)$$

Тогда в первом приближении погрешность определения температуры наружного воздуха по информации ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости

ной скорости можно оценить выражением:

$$\Delta T_H = \frac{2V_B}{1872,1[(1+0,2 \cdot 10^{-8} T_H V_B^2)^{0,286}] - 1} \Delta V_B. \quad (13)$$

Для погрешности измерения истинно воздушной скорости ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости можно оценить значением  $\Delta V_B = \pm(0,004...0,005)V_B$ , выражение для оценки погрешности определения температуры наружного воздуха принимает вид:

$$\Delta T_H = \pm(4,24...5,3) \cdot 10^{-5} \frac{V_B}{[(1+0,2 \cdot 10^{-8} T_H V_B^2)^{0,286}] - 1}. \quad (14)$$

При значении истинной воздушной скорости  $V_B = 300$  м/с (1080 км/ч) на высоте полета  $H = 7000$  м ( $T_H = 242,7$  K) погрешность определения температуры наружного воздуха можно оценить значением  $\Delta T_H = \pm(2,12...2,65) \cdot 10^{-3}$  K.

Приборная скорость самолета по информации ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости определяется выражением (9). Подставляя числовые значения входящих величин, получим:

$$V_{\text{ПР}} = 1872,1[(1+0,616V_B^2)^{0,286}] - 1. \quad (15)$$

Тогда связь погрешности  $\Delta V_{\text{ПР}}$  определения приборной скорости по информации ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости будет определяться соотношением:

$$\Delta V_{\text{ПР}} = \frac{2306,3}{(1+0,616V_B^2)^{0,286}} \Delta V_B. \quad (16)$$

Тогда как погрешность  $\Delta V_B$  измерения истинной воздушной скорости ионно–меточного датчика  $\Delta V_B = \pm(0,004...0,005)V_B$ , то погрешность измерения приборной скорости будет определяться выражением:

$$\Delta V_{\text{ПР}} = \frac{(9,2...11,5)V_B}{(1+0,616V_B^2)^{0,286}} \Delta V_B. \quad (17)$$

При значении истинной воздушной скорости  $V_B = 300$  м/с (1080 км/ч) погрешность определения приборной скорости в канале системы воздушных сигналов самолета на основе ионно–меточного датчика аэродинамических углов и истинной воздушной скорости можно оценить значением  $\Delta V_{\text{ПР}} = \pm 1,76...2,2$  м/с (6,3...7,9 км/ч).

Рассмотренная методика позволяет оценить потенциальную точность измерительных каналов системы воздушных сигналов самолета на основе ионно–меточного датчика аэродинамических углов и истинной воздушной скорости с встроенным приемником статического давления и при других исходных данных.

Таким образом, по сравнению с известными, система воздушных сигналов, построенная на основе ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, имеет ряд существенных преимуществ:

1. Обеспечивает одновременное измерение всех высотно–скоростных параметров, определяющих движение самолета относительно окружающей воздушной среды, в общей точке поверхности самолета.

2. Измерение всех высотно–скоростных параметров движения самолета относительно окружающей воздушной среды осуществляется с помощью одного неподвижного невыступающего приемника потока, неискажающего аэродинамику самолета и невливающего на него аэродинамические характеристики.

3. Измерение всех высотно–скоростных параметров обеспечивается без существенного усложнения конструктивной схемы ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

4. Получение выходных сигналов, по всем высотно–скоростным параметрам самолета в цифровой форме упрощает их использование в современных системах отображения информации, системах управления и других технических системах самолета.

5. Инструментальная точность измерительных каналов системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока соответствует уровню современных средств измерения высотно–скоростных параметров.

Следует отметить, что диапазон рабочих скоростей системы воздушных сигналов на основе ионно–меточного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с встроенным приемником статического давления не ограничен дозвуковыми скоростями полета.

Указанные достоинства рассматриваемой системы воздушных сигналов определяют перспективы разработки и применения вариантов системы на самолетах различного класса и назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практическая аэродинамика маневренных самолетов / Под общ. ред. Н.М. Лысенко. – М.: Воениздат, 1977. – 439 с.
2. Солдаткин, В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. – 448 с.
3. Макаров, Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: теория, проектирование, применение / Н.Н. Макаров. – М.: Машиностроение, 2009. – 760 с.
4. Браславский, Д.А./ Авиационные приборы и автоматы: Учебник для авиационных вузов / Д.А. Браславский, С.С. Логунов, Д.С. Пельпор. – М.: Машиностроение, 1978. – 432 с.
5. Боднер, В.А. Приборы первичной информации / В.А. Боднер. – М.: Машиностроение, 1981. – 344 с.
6. Пат. 2445634 Российская Федерация, МКИ G01P 5/14. Меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости/ Ф.А. Ганеев, В.М. Солдаткин, И.Р. Уразбахтин, Н.Н. Макаров, В.И. Кожевников.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, ОАО Ульяновское конструкторское бюро приборостроения., № 2010118253/28, заявл. 05.05.10, опубл. 20.03.12. – Бюл. № 8. – 3 с.
7. Ганеев, Ф.А. Ионно–меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логотрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки / Ф.А. Ганеев, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2010. – № 3. – С. 46–50.
8. ГОСТ 4401–81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во Стандартов, 1981. – 179 с.
9. ГОСТ 5212–74. Таблицы аэродинамическая. Динамические давления и температура торможения воздуха для скорости полета от 10 до 4000 км/ч. Параметры. – М.: Изд-во Стандартов, 1974. – 239 с.
10. Залманзон, Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления / Л.А. Залманзон. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 249 с.
11. Солдаткина, Е.С. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с расширенными функциональными возможностями / Е.С. Солдаткина, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2012. – № 4. – С. 56–59.
12. Аэрорприбор–Восход [Электронный ресурс]. – URL: [http:// www/aeroprivor.ru](http://www/aeroprivor.ru).

**Солдаткин Владимир Михайлович**  
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ).  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и информационно–измерительные системы» (ПИИС)  
Тел. 8–987–290–81–48  
E–mail: [nikitin.rf@mail.ru](mailto:nikitin.rf@mail.ru)

**Крылов Дмитрий Леонидович**  
ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»  
Главный конструктор направления  
Тел. 8–967–771–33–88  
E–mail: [ukbplkv@mv.ru](mailto:ukbplkv@mv.ru)

**Солдаткина Елена Сергеевна**  
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ–КАИ).  
Ассистент кафедры «Приборы и информационно–измерительные системы» (ПИИС)  
Тел. 8–927–035–11–61  
E–mail: [nikitin.rf@mail.ru](mailto:nikitin.rf@mail.ru)

D.L. KRYLOV, V.M. SOLDATKIN, E.S. SOLDATKINA

## CONSTRUCTION AND EVALUATION OF PRECISION OF AIR DATA SIGNALS SYSTEM OF AIRPLANE WITH THE STATIONARY INCLUDED RECEIVER OF FLOW

*The principles of building of the system of air data signals of the aircraft on the basis of panoramic ion-making sensor aerodynamic angle and true airspeed, supplemented by receiver of the static pressure of the oncoming air flow are revealed. The functional scheme and algorithms of information processing are described, the disclosed method and assessment of potential accuracy of the measuring channels of the system.*

**Keywords:** aircraft, air data signals, measurement, system, stationary included receiver, panoramic ion-making sensor, receiver of the static pressure of the oncoming air flow, functional scheme, algorithms of information processing, precision of measuring channels, method, evaluation.

### BIBLIOGRAPHY

1. Prakticheskaya aerodinamika manevrennykh samoletov / Pod obshch. red. N.M. Lysenko. – M.: Voenizdat, 1977. – 439 s.
2. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov / V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tekhn. un-ta, 2001. – 448 s.
3. Makarov, N.N. Cistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: teoriya, proyektirovaniye, primeneniye / N.N. Makarov. – M.: Mashinostroyeniye / Mashinostroyeniye – Polet, 2009. – 760 s.
4. Braslavskiy, D.A/ Aviatsionnyye pribory i avtomaty: Uchebnyy dlya aviatsionnykh vuzov / D.A. Braslavskiy, S.S. Logunov, D.S. Pelpor. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 432 s.
5. Bodner, V.A. Pribory pervichnoy informatsii / V.A. Bodner. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 344 s.
6. Pat. 2445634 Rossiyskaya Federatsiya, MKI G01P 5/14. Metochnyy datchik aerodinamicheskogo ugla i vozduшной skorosti/ F.A. Ganeyev, V.M. Soldatkin, I.R. Urazbakhtin, N.N. Makarov, V.I. Kozhevnikov.; zayavitel i patentoobladatel GOU Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet im. A.N. Tupoleva, OAO Ulyanovskoye konstruktorskoye byuro priborostroyeniya., № 2010118253/28, zayavl. 05.05.10, opubl. 20.03.12. – Byul. № 8. – 3 s.
7. Ganeyev, F.A. Ionno-metochnyy datchik aerodinamicheskogo ugla i vozduшной skorosti s logometricheskimi informativnymi signalami i interpolyatsionnoy skhemoy obrabotki / F.A. Ganeyev, V.M. Soldatkin // Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. – 2010. – № 3. – S. 46–50.
8. GOST 4401–81. Atmosfera standartnaya. Parametry. – M.: Izd-vo Standartov, 1981. – 179 s.
9. GOST 5212–74. Tablitsy aerodinamicheskaya. Dinamicheskiye davleniya i temperatura tormozheniya vozdukha dlya skorosti poleta ot 10 do 4000 km/ch. Parametry. – M.: Izd-vo Standartov, 1974. – 239 s.
10. Zalmanzon, L.A. Protochnyye elementy pnevmaticheskikh priborov kontrolya i upravleniya / L.A. Zalmanzon. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1961. – 249 s.
11. Soldatkina, Ye.S. Vikhrevoy datchik aerodinamicheskogo ugla i istinnoy vozduшной skorosti s rasshirennymi funktsionalnymi vozmozhnostyami / Ye.S. Soldatkina, V.M. Soldatkin // Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. – 2012. – № 4. – S. 56–59.
12. Aeropribor – Voskhod [Elektronnyy resurs]. – URL: <http://www/aeropribor.ru>.

**Soldatkin Vladimir Mihailovich**  
Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev – KAI (KNRTU–KAI)  
Doctor of Technical Science, professor, head of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)  
Ph. 8–987–290–81–48  
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

**Krylov Dmitriy Leonidovich**  
Ulyanovsk instrument manufacturing design bureau  
Chief designer directions  
Ph. 8–967–771–33–88  
E–mail: ukbplkv@mv.ru

**Soldatkina Elena Sergeevna**  
Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI (KNRTU–KAI)  
Assistant of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)  
Ph. 8–927–035–11–61  
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Р.В. РОМАНОВ, О.Р. КУЗИЧКИН, А.В. ГРЕЧЕНЕВА

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА В НЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ

*В данной работе рассматривается вопрос создания автоматизированных систем контроля водоносного горизонта на локальном уровне. Использование в локальном геоэкологическом мониторинге нецентрализованных систем водоснабжения многочастотных методов геоэлектрического контроля, адаптированных под задачу контроля поверхностных и подземных вод. В работе выбрана базовая геоэлектрическая модель в точках геоэкологического контроля воды.*

**Ключевые слова:** геоэкологический мониторинг, геоэлектрические методы, подземные воды, обработка информации, нецентрализованные системы водоснабжения.

В настоящее время в связи с повышением требований к обеспечению и поддержанию экологической безопасности в городах и населенных пунктах всё большую актуальность приобретает вопрос оценки качества подземных вод, используемых для питьевого водоснабжения. Особенно это является важным в населенных пунктах и районах использующих нецентрализованные системы водоснабжения, контроль за которыми носит регламентный характер [1]. Он основан на разрабатываемых для каждого конкретного случая программах производственного контроля воды. Кроме регламентного подхода к проблеме контроля нецентрализованных систем водоснабжения актуальным направлением, позволяющим комплексно решить эту задачу на уровне населенных пунктов, является создание автоматизированных систем контроля воды на локальном уровне геоэкологического мониторинга.

Сложность и разнообразность поведения динамики гидросферы приводит к необходимости расширения количества контролируемых параметров подземных водоносных слоев при организации систем геоэкологического контроля воды. При этом одной из основных задач при организации систем автоматизированного контроля качества воды является необходимость обеспечения оперативности принятия решений. Проблема заключается в том, что при контроле качества воды необходимо использовать лабораторные камеральные исследования, основанные на заборе проб из питьевых источников, требующие значительных временных затрат [2]. Их можно существенно уменьшить за счет применения методов экспресс-анализа на основе контроля обобщенных параметров водных ресурсов. Это позволит в первом приближении оперативно сформировать оценку критичности изменений объекта исследования с дальнейшей детализацией. В практике неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий широкое применение находят электропараметрические методы [3]. Применительно к рассматриваемой проблематике одним из перспективных направлений в разработке методов экспресс-анализа для систем геоэкологического контроля качества воды является применение электроразведочных методов, в которых в качестве обобщенного качественного параметра выступает электропроводность воды [4–6]. Современные системы контроля, построенные на базе геоэлектрических методов зондирования, обладают высокой чувствительностью к изменениям электропроводности верхних водоносных горизонтов, что обуславливает их высокую эффективность использования в системах контроля нецентрализованных систем водоснабжения.

Целью работы является разработка структуры системы автоматизированного контроля водоносного горизонта, а также обоснование применения геоэлектрических методов зондирования для геоэкологического контроля в нецентрализованных системах водоснабжения на локальном уровне.

Назначением системы автоматизированного контроля нецентрализованного водоснабжения на локальном уровне является постоянный мониторинг уровня режима и качества вод верхнего водоносного горизонта, а также разработка мероприятий для ликвидации причин вызвавших загрязнение. Основой ее построения является геоэлектрические методы экспресс анализа верхнего водоносного горизонта по обобщенному параметру – электропроводности. Выбор электропроводности воды в качестве обобщенного параметра качества вод определяется его информативностью и высокой технологичностью геоэлектрических методов для контроля этого параметра в реальном масштабе времени. Кроме того это дает возможность использования распределенных геоэлектрических измерений для гидро-

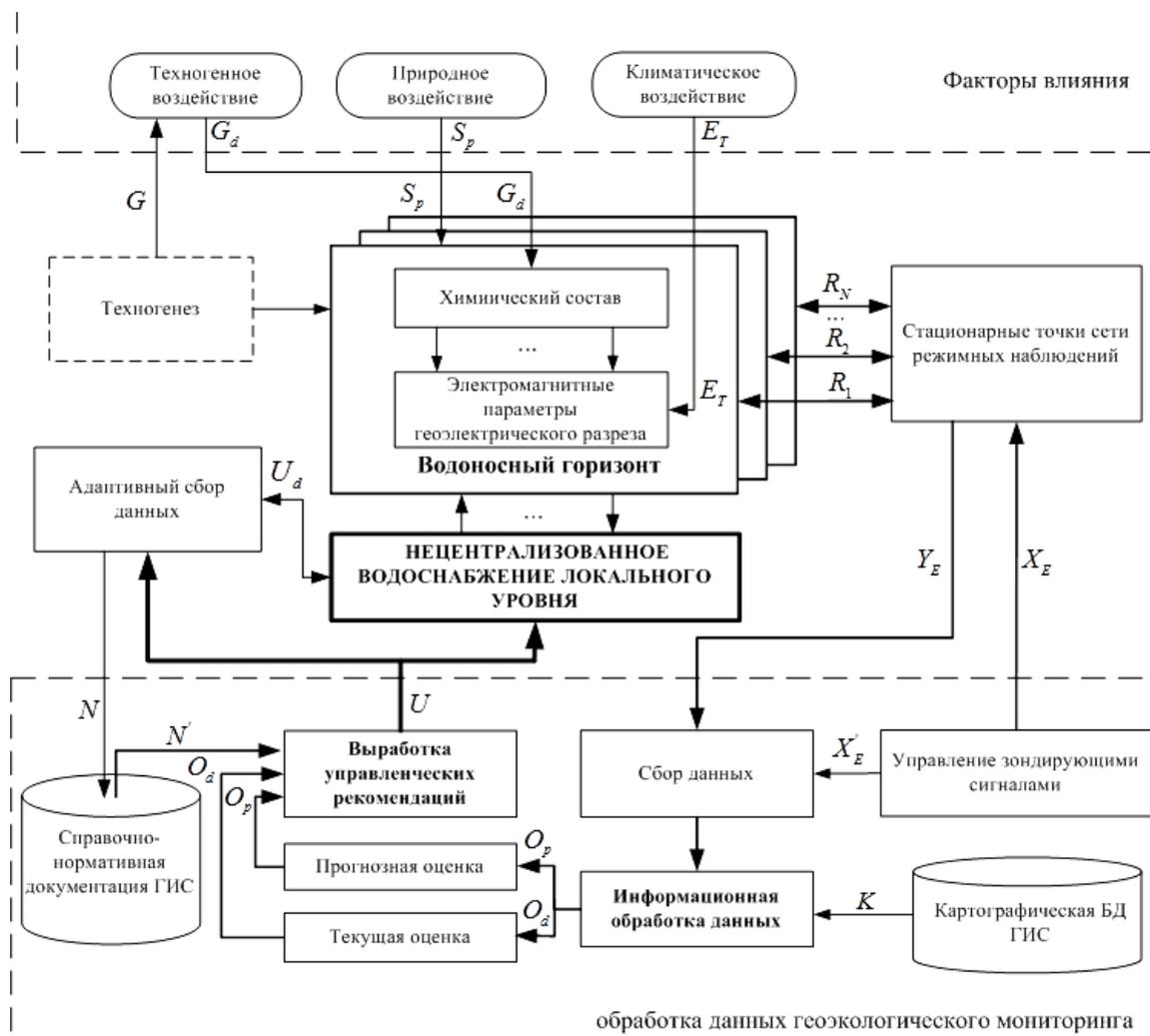
геологической оценки развития экзогенных и эндогенных геологических процессов на территории.

В пунктах наблюдения по данным регистрации параметров геоэлектрического разреза должны контролироваться следующие показатели:

- минерализация водоносного слоя, используемого для водоснабжения;
- состояние уровня подземных вод;
- температурный режим подземных вод в зоне наблюдения.

Особенностью контроля в этом случае является пространственная ограниченность сбора данных и оценка не только по параметрам геоэлектрического разреза в местах наблюдения, но и по гидрогеологическим моделям локального уровня. При этом следует учитывать сезонную и климатическую зависимость геоэлектрических параметров среды в точках наблюдения.

Принцип построения системы контроля нецентрализованного водоснабжения на основе геоэлектрических методов с учетом влияния внешних помехообразующих факторов представлен на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Структура системы автоматизированного контроля водоносного горизонта*

В приведенной структуре отдельно выделены факторы, влияющие на водоносный горизонт, а также выделен блок обработки данных геоэкологического мониторинга. Внешние воздействия по отношению к верхнему водоносному слою можно разделить на техногенные, природные и климатические.

Природные (экзогенные) воздействия  $S_p$  имеют как сезонный характер влияния на верхний водоносный горизонт, изменяя уровень подземных вод в период паводков и повышенной водности весной, так и иррегулярный, определяемый изменением гидрохимического состава за счет попадания в него поверхностных и грунтовых вод.

Техногенное воздействие  $G$  влияет на водоносный горизонт и образует техногенную помеху,  $G_d$  которая влияет на химический состав воды.

Использование высокочувствительных методов геоэлектрического зондирования при геоэкологическом контроле, позволяет оперативно получать данные о текущих изменениях исследуемого слоя геоэлектрического разреза.

Однако следствием повышения чувствительности геоэлектрических измерительных систем является зависимость получаемых данных от климатических факторов  $E_T$ . Использование высокочувствительных методов геоэлектрического зондирования при геоэкологическом контроле, позволяет оперативно получать данные о текущих изменениях исследуемого слоя геоэлектрического разреза. Однако следствием повышения чувствительности геоэлектрических измерительных систем является зависимость получаемых данных от климатических факторов  $E_T$ . Принимая во внимание долговременный характер проведения геоэкологических исследований, необходимо учитывать температурное влияние и отделять его воздействие от реальных геодинамических изменений. Особо следует выделить температурные геодинамические вариации  $E_T$ , которые являются наиболее существенным помехообразующим фактором.

В водоносном слое можно выделить электромагнитные параметры геоэлектрического разреза, а также химический состав, определяющие состав гидрогеологической среды.

На химический состав гидрогеологической среды оказывают влияние техногенные (промышленные) помехи  $G_d$ , а химический состав, в свою очередь, влияет на электромагнитные параметры геоэлектрического разреза.

Климатические воздействия, изменяющие электромагнитные параметры геоэлектрического разреза  $E_T$ , природные воздействия  $S_p$ , влияющие на водоносный горизонт, и техногенные помехи  $G_d$ , влияющие на химический состав гидрогеологической среды, образуют группу помехообразующих факторов.

В нецентрализованной системе водоснабжения локального уровня используются геоэлектрические методы зондирования геоэкологического контроля, посредством управления зондирующими сигналами оказывается воздействие  $X_E$  на электромагнитные параметры геологической среды.

Данные о формируемых зондирующих сигналах  $X_E$  и полученные отклики сигналов  $Y_E$  электромагнитных параметров  $E$  геологического разреза получает блок сбора данных и передает на обработку  $D = \{Y_E \rightarrow X_E\}$ , где  $f_Y: X_E \times E \rightarrow Y_E$ . Данные о сигналах  $D$  и картографические данные исследуемой прилегающей местности  $K$  систематизируются и передаются для формирования текущей оценки динамики верхнего водоносного горизонта контролируемой зоны  $O_d$  и для прогнозной оценки состояния качества подземных вод  $O_p$ . Т.е.,  $f_O: D \times K \rightarrow O$ , где  $O = \{O_d, O_p\}$ . На основе оценки  $O$  и справочно-нормативных документации ГИС  $N$ , производится выработка управленческих рекомендаций  $U$  (запрет на употребление воды в питьевых и технических целях, вызов служб санитарно-эпидемиологического надзора). Т.е.,  $f_U: O \times N \rightarrow U$ , где  $U = \{U_d, U_s\}$ .

В систему также поступают данные со стационарных точек сети режимных наблюдений  $U_S$ . Если наблюдается отклонение от заданных параметров водоносного горизонта, то оно наблюдается на какой-то из стационарных точек наблюдения  $R$ , и влияет на систему нецентрализованного водоснабжения локального уровня  $U_S$ .

Сотрудники структуры наблюдения и защиты локализируют и детализируют проблемную территорию, располагая дополнительные точки контроля  $U_D$  в сети наблюдений.

Современные системы контроля, построенные на базе геоэлектрических методов зондирования, обеспечивают высокоточное слежение за экзогенной геодинамикой среды и позволяют предупредить появление возможных кризисных ситуаций [7].

В качестве базовой модели при организации геоэкологического контроля верхних водоносных горизонтов в системах мониторинга нецентрализованных систем водоснабжения локального уровня может быть принята многослойная модель геологического разреза (рисунок 2).

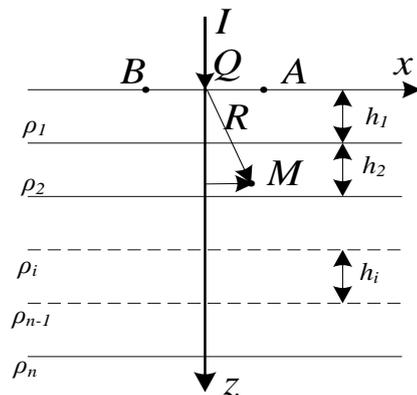


Рисунок 2 – Базовая геоэлектрическая модель при геоэкологическом контроле воды

Каждый из слоев модели характеризуется определенными параметрами, определяемыми физическими процессами, происходящими в них и оказывающих влияние на результаты контроля. В поверхностных природных водах, содержащих преимущественно неорганические вещества, удельная электропроводность служит мерой их суммарной ионной концентрации. С увеличением концентрации солей в воде усиливаются межслойные взаимодействия. Электропроводность водных систем увеличивается с ростом температуры, так как при этом уменьшается их вязкость и увеличивается степень диссоциации. Особенно это характерно для верхнего приповерхностного слоя. Оценка общей минерализации воды по ее удельной электропроводности не может быть однозначной. Минерализация и электропроводность колеблются в широких пределах, поэтому необходимо применение многослойной модели геологического разреза, что позволит выделить вариации электропроводности нескольких слоев одновременно [8].

Для контроля параметров верхних водоносных горизонтов предлагается использовать метод многочастного вертикального электрического зондирования (МЧВЭЗ), при использовании которого можно выделить изменения в каждом слое принятой модели. Воспользуемся базовой геоэлектрической моделью  $N$ -слояного геологического разреза. При использовании точечного источника геоэлектрического поля, с частотой  $\omega$ , потенциал на расстоянии  $r$  от источника может быть записан в следующем виде [9]:

$$U(\rho) = \frac{\rho_1(p)I(\rho)}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r} + \int_0^{\infty} [R_1(m) - 1] J_0(mr) dm \right\}, \quad (1)$$

где  $J_0(mr)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка от  $mr$ ;  
 $R_1(m)$  – функция геоэлектрической контрастности;  
 $p = j\omega$  – оператор Лапласа.

Для простоты предположим наличие общей меры глубины  $d_0$ . При этом мощность любого слоя в нашей модели:  $d_i = n_i d_0$ , где  $n_i \in Z$ .

Для функции геоэлектрической контрастности может быть получено выражение в виде бесконечной суммы экспонент [10]:

$$R_1'(m) = R(m) - 1 = 1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} q_i e^{-2im d_0}, \quad (2)$$

где  $q_i$  – коэффициент эмиссии, который может быть рассчитан для любого значения  $i$  по заданным параметрам многослойного разреза.

Как видно из приведенного соотношения функция геоэлектрической контрастности  $R_1(m)$  зависит только от параметров  $h_i$  и  $p_i$  слоистого разреза и не зависит от  $r$ . При использовании неконтактных датчиков напряженности электрического поля и нормировании регистрируемого геоэлектрического сигнала перейдем к передаточной функции геоэлектрического разреза.

$$H(p) = - \frac{\partial U(p)}{\partial r I(p)} = \frac{\rho_1(p)}{2\pi} \left[ \frac{1}{r^2} + \int_0^{\infty} R_1'(m) m J_1(mr) dm \right]. \quad (3)$$

Соответственно передаточная функция геоэлектрической разреза может быть выражена в виде бесконечной суммы элементарных функций:

$$H(p) = \frac{\rho_1(p)}{2\pi} \left[ \frac{1}{r^2} + 2 \sum_{i=1}^{\infty} q_i t_{i,E} \right], \quad (4)$$

где  $t_{i,E}$  – коэффициенты удаления, не зависящие от сопротивлений горизонтов, определяемые по следующему соотношению:

$$t_{i,E} = r / \left[ r^2 + (2id_0)^2 \right]^{3/2}. \quad (5)$$

В простейшем случае для модели двухслойного проводящего полупространства, которая хорошо может описывать процесс контроля верхнего водоносного горизонта с параметрами  $h_1, \rho_1(p, T)$  – для первого слоя с учетом температурного влияния,  $h_2, \rho_2(p)$  – для второго слоя, коэффициент эмиссии можно выразить через коэффициент контрастности электрических параметров сред [11]:

$$q_i(p) = k_{12}^i(p) = \left( \frac{\rho_2(p) - \rho_1(p, T)}{\rho_2(p) + \rho_1(p, T)} \right)^i. \quad (6)$$

Приняв  $d_0=h_1$ , получим:

$$H(p) = \frac{\rho_1(p, T)}{2\pi} \left[ \frac{1}{r^2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n(p, T)}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{3/2}} \right]. \quad (7)$$

Аналогично может быть получено расчетное соотношение для коэффициента передачи для любого числа учитываемых слоев геоэлектрической модели геологического разреза при мониторинге нецентрализованных водных систем. В этом случае допустимо использовать аппроксимацию передаточных функций геоэлектрического разреза эквивалентными дробно-рациональными функциями комплексного переменного  $p$ , физически реализуемых дискретными электрическими цепями. Для решения задач контроля эквивалентность функций геоэлектрического разреза должна обеспечивать совпадение характеристик только на диапазоне, применяемых в МЧВЭЗ методе, частот, и только на ограниченном отрезке точечного контроля [12, 13].

Для обеспечения геологического мониторинга водоносного горизонта в нецентрализованных системах водоснабжения в данной работе был разработан принцип построения системы автоматизированного контроля на базе геоэлектрических методов.

Для постоянного контроля уровня режима и качества вод верхнего водоносного горизонта в нецентрализованных системах водоснабжения используются геоэлектрические методы экспресс анализа по обобщенному параметру – электропроводности. В структуре рассмотрены помехообразующие факторы, которые могут оказать влияние на измерения электропроводности водоносного горизонта, а также на саму электропроводность.

Использование разработанной структуры в системе автоматизированного контроля позволяет в стационарных пунктах наблюдения проводить оценку минерализации водоносного слоя, состояния уровня подземных вод, температурного режима подземных вод по параметрам геоэлектрического разреза в местах наблюдения. Для гидрогеологической оценки, где существует сложная геологическая среда и рельеф, используются гидрогеологические модели локального уровня. Определены базовые геоэлектрические модели геологического разреза, рассмотрена функция геоэлектрической контрастности и передаточная функция геоэлектрического разреза для многочастотного метода вертикального электрического зондирования.

*Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ «14-08-31570 – мол\_а».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусова, А.П. Экологическая гидрогеология: Учебник для вузов / А.П. Белоусова, И.К. Гавич, А.Б. Лисенков, Е.В. Попов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 397 с.
2. Алексеев, Л.С. Контроль качества воды / Л.С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 154 с.
3. Вавилов, В.П. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах / В.П. Вавилов, К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин и др. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 5. – Кн. 1. Тепловой контроль. – Кн. 2. Электрический контроль.
4. РС СОП РТ 002–1–003–94 Ускоренные методы контроля качества природных, сточных вод и дистиллированной воды по данным об их электропроводности. Методические рекомендации. – Казань, 1995.
5. Sharapov, R.V. Geodynamic monitoring in area of nuclear power plant / R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 492. – p.p. 556–560.
6. Sharapov, R.V. Monitoring of karst-suffusion formation in area of nuclear power plant / R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. – p.p. 810–813.
7. Sharapov, R.V. The polarizing characteristics of electrolocation signals and their analysis in geomonitoring system / R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. – 2013. – p.p. 913–918.
8. Зацепина, Г.Н. Физические свойства и структура воды / Г.Н. Зацепина. – М.: Московский университет, 1998.
9. Жданов, М.С. Электроразведка: Учебник для вузов / М.С. Жданов. – М.: Недра, 1986. – 316 с.
10. Хмелевской, В.К. Электроразведка / В.К. Хмелевской. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 422 с.
11. Bykov, A. Application seismoelectric method for inspection electrically conducting media / A. Bykov, O. Kuzichkin // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 490–491. – p.p. 1712–1716.
12. Kuzichkin, O. Spectral processing of the spatial data at geoelectric monitoring / O. Kuzichkin, N. Chaykovskay // International Conference on Multimedia Technology, IEEE ICMT 2011, Hangzhou, China. – p.p. 765–768.
13. Bykov, A. Approximation of equivalent transfer function of the geoelectric section in geodynamic inspection / A. Bykov, O. Kuzichkin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. – 2014. – p.p. 615–622.

**Романов Роман Вячеславович**  
Муромский институт (филиал)  
ФГБОУ ВПО «Владимирский  
государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»  
(МИ (филиал) ВлГУ)  
г. Муром ул. Орловская 23  
Аспирант кафедры управления и  
контроль в технических системах  
E-mail:  
romanov.roman.5@yandex.ru

**Кузичкин Олег Рудольфович**  
Муромский институт (филиал)  
ФГБОУ ВПО «Владимирский  
государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»  
(МИ (филиал) ВлГУ)  
г. Муром ул. Орловская 23  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры управления и  
контроль в технических системах  
E-mail: electron@mivlgu.ru

Греченева Анастасия Владимировна  
Муромский институт (филиал)  
ФГБОУ ВПО «Владимирский  
государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»  
(МИ (филиал) ВлГУ)  
г. Муром ул. Орловская 23  
студент кафедры управления и  
контроль в технических системах  
E-mail: itpu@mivlgu.ru

---

R. V. ROMANOV, O. R. KUZICHKIN, A. V. GRECHENEVA

## **GEOECOLOGICAL CONTROL OF THE AQUIFER IN DECENTRALIZED WATER SYSTEMS AT THE LOCAL LEVEL**

*In this work is considered the question of creation of the automated monitoring systems of the aquifer at the local level. Using at decentralized water systems the local geoenvironmental monitoring, multifrequency geoelectric methods for the control of surface water and groundwater. In this paper we selected basic geoelectric model at the points geoenvironmental monitoring of water.*

**Keywords:** *geocological monitoring, geoelectric methods, groundwater, information processing, decentralized water supply systems.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Belousova, A.P. Ekologicheskaya gidrogeologiya: Uchebnik dlya vuzov / A.P. Belousova, I.K. Gavich, A.B. Lisenkov, Ye.V. Popov. – M.: IKTS «Akademkniga», 2006. – 397 s.
2. Alekseyev, L.S. Kontrol kachestva vody / L.S. Alekseyev. – 3-ye izd., pererab. i dop. – M.: INFRA-M, 2004. – 154 s.
3. Vavilov, V.P. Nerazrushayushchiy kontrol. Spravochnik v 8 tomakh / V.P. Vavilov, K.V. Podmasteryev, F.R. Sosnin i dr. – M.: Mashinostroyeniye, 2006. – T. 5. – Kn. 1. Teplovoy kontrol. – Kn. 2. Elektricheskiy kontrol.
4. RS SOP RT 002-1-003-94 Uskorennyye metody kontrolya kachestva prirodnykh, stochnykh vod i distillirovannoy vody po dannym ob ikh elektroprovodnosti. Metodicheskiye rekomendatsii. – Kazan, 1995.
5. Sharapov, R.V. Geodynamic monitoring in area of nuclear power plant / R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 492. – p.p. 556-560.
6. Sharapov, R.V. Monitoring of karst-suffusion formation in area of nuclear power plant / R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. – p.p. 810-813.
7. Sharapov, R.V. The polarizing characteristics of electrolocation signals and their analysis in geomonitoring system / R.V. Sharapov, O.R. Kuzichkin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. – 2013. – p.p. 913-918.
8. Zatsepina, G.N. Fizicheskiye svoystva i struktura vody / G.N. Zatsepina. – M.: Moskovskiy universitet, 1998.
9. Zhdanov, M.S. Elektrorazvedka: Uchebnik dlya vuzov / M.S. Zhdanov. – M.: Nedra, 1986. – 316 s.
10. Khmelevskoy, V.K. Elektrorazvedka / V.K. Khmelevskoy. – M.: Izd-vo MGU, 1984. – 422 s.
11. Bykov, A. Application seismoelectric method for inspection electrically conducting media / A. Bykov, O. Kuzichkin // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – № 490-491. – p.p. 1712-1716.
12. Kuzichkin, O. Spectral processing of the spatial data at geoelectric monitoring / O. Kuzichkin, N. Chaykovskay // International Conference on Multimedia Technology, IEEE ICMT 2011, Hangzhou, China. – p.p. 765-768.
13. Bykov, A. Approximation of equivalent transfer function of the geoelectric section in geodynamic inspection / A. Bykov, O. Kuzichkin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. – 2014. – p.p. 615-622.

**Romanov Roman Vyacheslavovich**  
Murom Institute (branch) of the  
«Vladimir State University named  
after A.G. and N.G. Stoletovs» (MI  
(branch) of Vladimir State  
University)  
Murom Orlovskaya Street.23  
Postgraduates of the Department in  
the management and control of  
engineering systems  
E-mail: romanov.roman.5@yandex.ru

**Kuzichkin Oleg Rudolfovich**  
Murom Institute (branch) of the  
«Vladimir State University named  
after A.G. and N.G. Stoletovs» (MI  
(branch) of Vladimir State  
University)  
Murom Orlovskaya Street.23  
Doctor of Technical Sciences,  
professor of management and control  
in technical systems  
E-mail: electron@mivlgu.ru

**Grecheneva Anastasiya Vladimirovna**  
Murom Institute (branch) of the  
«Vladimir State University named  
after A.G. and N.G. Stoletovs» (MI  
(branch) of Vladimir State  
University)  
Murom Orlovskaya Street.23  
student of management and control in  
technical systems  
E-mail: itpu@mivlgu.ru

А.М. ВАСИЛЬЕВ, В.К. ГАРИПОВ, М.А. КОСТРОМИН, В.В. СЛЕПЦОВ

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

*В статье рассмотрены вопросы применения методов бесконтактной термометрии для измерения температуры различных объектов. Показано, что бесконтактные измерения температуры характеризуются большим количеством как методических, так и инструментальных систематических погрешностей. Представлена структура полной погрешности результатов измерений. Определены доминирующие компоненты в составе полных погрешностей. Установлено, что для минимизации перечисленных методических погрешностей нужно всегда стремиться использовать пирометры, чувствительные в как можно более коротковолновой части спектра.*

**Ключевые слова:** погрешности, бесконтактная термометрия, пирометры, измерение, объекты.

Измерение температуры при помощи пирометров является косвенным методом. Поток излучения объекта, регистрируемый пирометром, определяется его температурой. Кроме температуры объекта, на поток излучения оказывают влияние следующие факторы [1]:

- излучательная способность объекта, которая зависит от его оптических свойств, электросопротивления, температуры, фазового состояния и др.;
- поглощение излучения промежуточной средой;
- отраженное объектом излучение сторонних источников.

Методические погрешности, возникающие вследствие влияния данных факторов, аддитивны, поэтому в пирометрии принято использовать обобщенный коэффициент  $\epsilon$ .

Таким образом, пирометр измеряет некую условную температуру, которую принято называть радиационной или яркостной для энергетических пирометров и цветовой для пирометров спектрального отношения.

Методическая погрешность определения температуры, связанная с неточным знанием величины  $\epsilon(\lambda, T)$ , для энергетических типов пирометров может быть выражена:

$$\delta = \ln \Theta / \left( \ln \Theta - \frac{C_2}{\lambda T} \right), \quad (1)$$

где  $\Theta = \epsilon_x / \epsilon_0$ .

В случае, если пирометр калиброван на образцовом излучателе, можно считать  $\epsilon_0 = 1$ . Для спектральных пирометров, использующих два участка спектра, методическая погрешность составляет:

$$\delta_s^{(2)} = \frac{\ln(\Theta_1 / \Theta_2)}{\ln(\Theta_1 / \Theta_2) - \frac{\lambda_1 \lambda_2 C_2}{(\lambda_1 - \lambda_2) - \lambda T}}. \quad (2)$$

Помимо методических погрешностей, пирометры обладают инструментальной погрешностью, которая связана с погрешностью измерения интенсивности излучения. Для энергетических пирометров инструментальная погрешность имеет вид:

$$\delta_{И} = \frac{\lambda T}{C_2} \delta\Phi, \quad (3)$$

где  $\delta\Phi$  – погрешность измерения потока излучения.

В пирометрах спектрального отношения при измерении интенсивности в двух участках спектра инструментальная погрешность составляет:

$$\delta_{И} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 T}{(\lambda_2 - \lambda_1) C_2} \delta y, \quad (4)$$

где  $\delta\mu$  – погрешность измерения отношения потоков излучения.

Сравним методическую и инструментальную погрешности на примере энергетических пирометров, используя выражения (1) и (3). Выясним, с какой точностью нужно измерять интенсивность  $\Phi$ , чтобы инструментальная погрешность была равна методической погрешности, т.е.  $\delta_{И} = \delta_{\varepsilon}$ .

Для  $\lambda = 1\text{ мкм}$  и  $T \sim 10\text{ К}$  имеем:

$$\begin{aligned} \lambda T / C_2 &\approx 0,1, \\ \delta\Phi / \Phi &\approx \ln(\varepsilon / \varepsilon_0) / \{1 - (\lambda T / C_2) \ln(\varepsilon / \varepsilon_0)\} \approx \ln(\varepsilon / \varepsilon_0) \{1 + 0,1 \ln(\varepsilon / \varepsilon_0)\}, \\ \delta\Phi / \Phi &\approx \ln(\varepsilon / \varepsilon_0) \approx \ln\{(\varepsilon_0 - \delta\varepsilon) / \varepsilon_0\} \approx \delta\varepsilon / \varepsilon_0. \end{aligned} \quad (5)$$

То есть, в рассматриваемом случае для заданной инструментальной точности измерений необходимо знание излучательной способности с такой же точностью.

Основным показателем, характеризующим качество результата измерения, является погрешность измерения.

Количественное значение погрешности зависит от многих факторов, сопровождающих процесс измерения:

- характера измеряемой величины;
- несовершенства ИИУС, с помощью которой производится измерение;
- условий измерения и т.д.

Многие из этих факторов, как правило, имеют случайный характер и поэтому их влияние на погрешность результата измерения не может быть полностью устранено.

Метрологический уровень определения теплофизических свойств металлических расплавов зависит от метрологических характеристик ИИУС, под которыми понимаются такие характеристики, которые позволяют судить о пригодности ИИУС для измерений в известном диапазоне с заданной точностью.

Формализованное описание измерительных процедур, результатов измерения, их характеристик, а также метрологических характеристик ИИУС необходимо для определения характеристик результатов измерений и метрологических характеристик ИИУС расчетными методами на аналитической основе [2].

Главной целью формализованного описания измерительных процедур, погрешностей и характеристик погрешностей является формирование основы для оценки метрологического уровня результатов теплофизических измерений.

Для обобщенного описания результатов измерения используются характеристики погрешностей.

К основным характеристикам погрешности относятся [3]:

- математическое ожидание (систематическая погрешность):

$$\Delta_{\text{сист}}\lambda_j^* = M[\Delta_j^*] = M[\lambda_j^*] - \lambda(t_j); \quad (6)$$

- корень квадратный из дисперсии (среднеквадратическая погрешность):

$$\sigma_{\Delta} = D^{1/2}[\Delta\lambda_j^*] = \left[ \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta\lambda_j^* - \Delta_{\text{сист}}\lambda_j^*)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где  $m$  – число измерительных экспериментов;

$[\Delta_{Н}\lambda_j^*, \Delta_{В}\lambda_j^*]$  – доверительный интервал с установленными нижней и верхней границами;

$P_{Д}$  – доверительная вероятность, определяющая вероятность того, что:

$$\Delta_{Н}\lambda_j^* \leq \Delta\lambda_j^* \leq \Delta_{В}\lambda_j^*.$$

Анализ характеристик погрешностей результатов измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности выполним на основе уравнения измерений тепло- и температуропроводности [4]:

$$a_i^* = \left\langle K_1 \cdot \exp \left\langle K_2 \frac{\langle T_n^* \rangle_{q_{1i}}}{\langle T_m^* \rangle_{q_{2i}}} q_{3i} \right\rangle q_{4i} \right\rangle q_{5i}; \quad (8)$$

$$\lambda_i^* = \left\langle \frac{1}{\langle T_m^* \rangle_{q_{1i}}} \left\langle K_3 \left\langle \ln \left\langle (K_4 \langle a \rangle_{q_{2i}}) \right\rangle q_{3i} \right\rangle q_{4i} \right\rangle q_{5i} \right\rangle q_{6i}. \quad (9)$$

где  $a^*$ ,  $\lambda_i^*$  – коэффициенты температуро– и теплопроводности;

$K_1, K_2, K_3, K_4$  – константы;

$T_m^*, T_n^*$  – величины температур для материалов с известными  $a$  и  $\lambda$ ;

$\langle \square \rangle$  – числовой результат измерительного преобразования в цифровом виде.

В уравнениях измерений (8), (9) используются результаты прямых измерений температуры  $T_i^*(x, \tau)$ :

$$T_i^*(x, \tau) = \left\langle T^H \left( \left\langle [bU(T_i(x, \tau))]_{\Delta_K U}^h \right\rangle q_{1i} \left\langle \langle m_M \rangle_{q_{2i}} \right\rangle q_{3i} \right) \right\rangle q_{4i}. \quad (10)$$

Характеристики погрешности результатов измерений температуры получим на основе уравнения (10), определяющего структуру полной погрешности:

$$\Delta T_i^* = \Delta_b T_i^* + \Delta_U T_i^* + \Delta_{кв} T_i^* + \Delta_{01} T_i^* + \Delta_{02} T_i^* + \Delta_{\psi} T_i^* + \Delta_W T_i^* + \Delta_{OC} T_i^* + \Delta_{R_T} T_i^*, \quad (11)$$

где  $\Delta_b T_i^*$  – погрешность, возникающая из–за отличия  $b$  от номинальной величины  $b_H$ ;

$\Delta_U T_i^*$  – погрешность из–за отличия реальной статической характеристики преобразования термодатчика от номинальной, так как  $T^H(U) = U^{H^{-1}}(T)$  – градуировочная характеристика, отражающая преобразование, обратное номинальному преобразованию датчика, и, кроме того, эта составляющая включает в себя погрешность аппроксимации при реализации градуировочной характеристики на программной основе;

$\Delta_{кв} T_i^*$  – погрешность квантования;

$\Delta_{01} T_i^*$  – погрешность при округлении результата аналого–цифрового преобразования;

$\Delta_{02} T_i^*$  – погрешность при округлении конечного результата (результата обратного преобразования);

$\Delta_{OC} T_i^*$  – погрешность от воздействия температуры окружающей среды на ИИУС и контролируемый объект;

$\Delta_{R_T} T_i^*$  – погрешность в результате изменения термосопротивления в области контакта датчика и контролируемого объекта.

Определим характеристики погрешности результатов измерений теплопроводности  $\lambda$  объекта.

Структура полной погрешности результата измерения  $\lambda$  будет следующей [5]:

$$\Delta \lambda_i^* = \Delta_{K3} \lambda_i^* + \Delta_{K4} \lambda_i^* + \Delta_a \lambda_i^* + \Delta_{T_m} \lambda_i^* + \sum_{i=1}^5 \Delta_{0i} \lambda_i^*, \quad (12)$$

где  $\Delta_{K3} \lambda_i^*$  – погрешность, обусловленная неточным определением значения  $K_3$ ;

$\Delta_{K4} \lambda_i^*$  – погрешность, обусловленная неточным определением значения  $K_4$ ;

$\Delta_a \lambda_i^*$  – погрешность из–за неточного установления  $a$ ;

$\Delta T_m \lambda_i^*$  – погрешность в результате неверного установления значения  $T_m$ ;

$\Delta_{oi} \lambda_i^*$  – погрешности из-за округлений.

Выделим доминирующие компоненты в составе полных погрешностей.

Известно, что погрешности, возникающие при измерениях физических величин при помощи тех или иных средств измерений, принято делить на методические и инструментальные [5].

Методические погрешности – это те погрешности, которые присущи данному методу измерений. Они возникают вне зависимости от того, насколько хорошо калиброваны средства измерений. Их нельзя исключить простым улучшением метрологических характеристик измерительных приборов без изменений методики измерений.

В отличие от методических, инструментальные погрешности являются следствием недостатков, присущих самим средствам измерений. Они могут быть уменьшены или исключены при усовершенствовании средств измерений – термостабилизацией критичных к температуре узлов, экранировкой, установкой более чувствительных датчиков, более точной калибровкой, и т.д.

Бесконтактные измерения температуры характеризуются большим количеством как методических, так и инструментальных систематических погрешностей.

Методические погрешности являются следствием того, что сигналы, вырабатываемые приемниками излучения, определяются не только температурой измеряемой поверхности, но и ее излучательной способностью. Последующий неучет которой приводит к появлению большого количества методических погрешностей.

Известно, что для яркостных пирометров связь между действительной температурой объекта  $T_d$  и результатом его измерения пирометром  $T_{И}$  определяется соотношением:

$$\frac{1}{T_d} = \frac{1}{T_{И}} + \ln \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T), \quad (13)$$

где  $\lambda$  – длина волны, соответствующая середине диапазона спектральной чувствительности приемника излучения пирометра (с учетом полосы пропускания объектива и/или входного окна);

$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$  – усредненное по диапазону спектральной чувствительности приемника значение излучательной способности измеряемого объекта.

Разность между действительной температурой  $T_d$  и результатом измерения  $T_{И}$  определяется:

$$T_d - T_{И} \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T). \quad (14)$$

Ввиду того, что:

$$T_{И} = \left( \frac{1}{T_d} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) \right)^{-1} = \frac{T_d}{1 - \frac{\lambda}{c_2} T_d \cdot \ln \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)}, \quad (15)$$

то, подставив (15) в (14), и разделив на  $T_d$ , получим:

$$\frac{T_d - T_{И}}{T_d} = \frac{T_d \cdot \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)}{T_d \cdot \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) - 1}. \quad (16)$$

Из выражения (16) определяется относительная погрешность измерений в виде функции измеряемой температуры  $T_d$ , длины волны  $\lambda$  на которой работает энергетический пирометр, и излучательной способности  $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ .

Из анализа видно, что погрешность возрастает прямо пропорционально длине волны.

С учетом того, что  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T) < 1$ , эта погрешность также растет и с уменьшением  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ .

Так как для большинства металлов  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  снижается с ростом длины волны  $\lambda$ , то очевидно, что для снижения систематической методической погрешности, обусловленной отливом от 1 излучательной способности  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  необходимо, чтобы яркостной пирометр работал в диапазоне как можно более коротких длин волн.

Из проведенного анализа следует, что если длина волны яркостного пирометра составляет 0,3 мкм, то методическая погрешность, связанная с неучетом отличия от 1 излучательной способности металла, составляет от 2,4% до 4%.

На длине волны 1,5 мкм методическая погрешность еще возрастает и лежит в пределах от 17% до 25% (в 6 раз выше, чем при прочих равных на длине волны 0,3 мкм!). А на 5 мкм такая методическая погрешность доходит до 56% ÷ 64%, то есть погрешность таких измерений возрастает в 6...10 раз.

Следовательно, для минимизации погрешностей, обусловленных неучетом излучательной способности измеряемого объекта, необходимо пользоваться яркостными пирометрами, работающими в как можно более коротковолновом диапазоне длин волн.

Если кроме результата  $T_{\text{И}}$  измерения температуры объекта яркостным пирометром, точное значение длины волны  $\lambda$ , на которой работает энергетический пирометр, и излучательной способности  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ , то получить можно получить действительное значение температуры объекта  $T_d$  с помощью выражения (13).

На практике  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  всегда известна с той или иной погрешностью, что вносит в результат измерения температуры яркостным пирометром второй вид методической систематической погрешности – погрешность, возникающую вследствие ввода неправильного значения излучательной способности.

Анализ показывает, что 10%-я погрешность в измерении излучательной способности приводит к погрешности 0,3 ÷ 0,5% в измерении действительной температуры объекта, если измерения проводятся на длине волны, равной 0,3 мкм, к погрешности порядка 1,5 ÷ 2,5% при измерении на длине волны 1,5 мкм, и 5 ÷ 8% при измерении на длине волны 5 мкм.

То есть, для яркостного пирометра методическую погрешность вследствие ввода неправильного значения излучательной способности при измерениях в ультрафиолете можно считать незначимой, в то время как при измерениях в ИК-диапазоне эта методическая погрешность сопоставима с погрешностью в измерении излучательной способности.

Таким образом, для минимизации погрешностей, обусловленных вводом неправильного значения излучательной способности измеряемого объекта, необходимо пользоваться яркостными пирометрами, работающими в как можно более коротковолновом диапазоне длин волн.

Известно, что для радиационных пирометров справедливо следующее соотношение [6]:

$$T_d = T_{\text{И}} / \sqrt[4]{\varepsilon_t}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon_t$  – интегральная излучательная способность измеряемого объекта.

Из (17) следует, что для объекта, излучательная способность в которого менее 1, разность между его действительной температурой  $T_d$  и результатом измерения  $T_{\text{И}}$ , полученным с помощью пирометра полного излучения:

$$T_d - T_{\text{И}} = (1 - \sqrt[4]{\varepsilon_t}), \quad (18)$$

Таким образом, относительная погрешность за счет неучета радиационным пирометром излучательной способности измеряемого объекта определяется как:

$$\frac{T_d - T_{\text{И}}}{T_d} = 1 - \sqrt[4]{\varepsilon_t}. \quad (19)$$

В явном виде такая методическая погрешность от длины волны излучения не зависит.

Анализ показал, что погрешность измерений радиационным пирометром температуры металлов при неучете излучательной способности  $\varepsilon_t$  превышает 30%.

Для снижения методической погрешности радиационного пирометра, обусловленной неправильным вводом значения излучательной способности, необходимо стремиться к увеличению значения излучательной способности, что в конечном итоге означает переход, если это технически осуществимо, на использование коротковолновых яркостных пирометров.

Известно, что если на измеряемый объект с действительной температурой  $T_0$  и излучательной способностью  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  попадает излучение близко расположенного (или расположенного относительно далеко, но имеющего большие геометрические размеры) объекта с температурой  $T_0$ , то результат измерения  $T_{и}$  может быть искажен [6].

Связь между излучательной способностью и коэффициентом отражения  $\rho$  определяется следующим соотношением:

$$\rho = 1 - \varepsilon. \quad (20)$$

Энергетическая яркость  $L_{\lambda_{и}}$  измеряемого объекта включает в себя  $L_{\lambda_d}$  – часть энергетической яркости черного тела, имеющего равную с ним температуру, а также составляющую, обусловленную переотражением энергетической яркости близко расположенного нагретого объекта  $L_{\lambda_0}$ .

С учетом (20) тогда можно записать:

$$L_{\lambda_{и}} = \varepsilon L_{\lambda_d} + (1 - \varepsilon) \varepsilon_0 L_{\lambda_0}, \quad (21)$$

где  $\varepsilon$  – излучательная способность объекта измерений;

$\varepsilon_0$  – соответственно излучательная способность близко расположенного нагретого объекта.

При измерении температуры такого объекта яркостным пирометром, если температура  $T_0$  выше действительной температуры измеряемого объекта  $T_d$  результат измерения  $T_{и}$  будет завышен, и величина завышения будет тем больше, чем меньше  $\varepsilon$  и чем больше разность между  $T_0$  и  $T_d$ .

При большой разнице между  $T_0$  и  $T_d$  влияние  $T_0$  оказывается пренебрежимо малым. Если  $T_0$  и  $T_d$  сопоставимы, то влияние нагретого объекта приводит к тому, что яркость измеряемого объекта приближается к яркости черного тела при температуре, равной температуре объекта, то есть наблюдаемое значение излучательной способности возрастает.

В результате, если  $\varepsilon_0$  близко к 1, при равенстве  $T_0$  и  $T_d$ ,  $L_{\lambda_0}$  становится равным  $L_{\lambda_d}$  и, измеряемый объект излучает как черное тело при равной с ним температуре.

Таким образом, имея информацию о яркостной температуре объекта  $T_{и}$  точно зная длину волны  $\lambda$ , на которой работает энергетический пирометр, излучательную способность  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ , а также температуру  $T_0$  и излучательную способность  $\varepsilon_0$  можно легко получить действительное значение температуры объекта  $T_d$ .

На практике температура  $T_0$  чаще всего неизвестна, а  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  обычно известны с погрешностью, нередко довольно значительной.

Вследствие этого, основным способом снижения рассматриваемой систематической методической погрешности является уменьшение длины волны, на которой работает приемник яркостного пирометра. При этом, как правило, возрастает  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ , что снижает степень влияния отраженного излучения.

В энергетических пирометрах с нефокусируемой оптикой при изменении расстояния между объектом и пирометром поток, приходящий на приемник пирометра изменяется от 10÷20% (при удалении) до 1,5÷2 раз (при приближении), а температура измеряемого объекта неизменна.

Это происходит потому, что с изменением расстояния происходит несинхронное уменьшение телесного угла, под которым из каждой точки объекта видна входная линза объектива пирометра, и увеличение площади объекта, попадающей в поле зрения пирометра.

Сложная форма зависимости диаметра поля зрения пирометра от расстояния между пирометром и объектом не позволяет получить аналитические зависимости, пригодные для теоретического анализа рассматриваемой погрешности.

Для учета и последующей компенсации упомянутой методической погрешности можно воспользоваться понятием эффективной излучательной способности.

Определим ее равной произведению действительной излучающей способности на коэффициент  $\delta$ , характеризующий изменения потока  $\rho$ , приходящего на приемник пирометра при расстоянии, большем или меньшем расстояния в процессе калибровки  $\rho_k$  к потоку в процессе калибровки  $\rho_k$ :

$$\rho = \frac{\rho}{\rho_k}. \quad (22)$$

Эффективная монохроматическая излучательная способность определяется:

$$\varepsilon_{\lambda}^{\text{эфф}} = \delta \cdot \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T), \quad (23)$$

а эффективная полная излучательная способность – согласно:

$$\varepsilon_l^{\text{эфф}} = \delta \cdot \varepsilon_l. \quad (24)$$

Для конкретного пирометра значение  $\varepsilon^{\text{эфф}}$  легко определить экспериментальным путем. Для этого необходимо этим пирометром и каким-либо контактным способом измерить температуру «нечерного» объекта на заданном расстоянии, и подобрать такое значение коэффициента  $k$ , при котором результаты измерений контактным и бесконтактным методами будут максимально близкими.

Полученное значение  $k$  и будет значением  $\varepsilon^{\text{эфф}}$  для данного пирометра и для выбранного расстояния.

Более эффективным способом исключения рассматриваемой систематической погрешности является использование пирометров с объективом, позволяющим фокусировать на приемник излучения изображение измеряемого объекта, снабженным соответствующим образом подобранной полевой диафрагмой [1].

Неполное заполнение измеряемым объектом поля зрения энергетического пирометра приводит к пропорциональному ослаблению потока, зарегистрированного пирометром.

Если объект заполняет половину поля зрения пирометра, то поток, пришедший на приемник, оказывается ослабленным вдвое в сравнении с потоком от этого же объекта на этом же расстоянии при этой же температуре, если треть поля зрения – то ослаблен втрое, и т.д.

Таким образом, влияние неполного заполнения поля зрения на поток, попавший на приемник, аналогично влиянию расстояния, которое рассмотрено выше.

Следовательно, оно, также как и расстояние, может быть учтено дополнительной мультипликативной составляющей  $\delta'$  в  $\varepsilon^{\text{эфф}}$ , при этом  $\delta'$  определяется как отношение площади поля зрения, заполненной измеряемым объектом, ко всей площади поля зрения в плоскости объекта:

$$\varepsilon^{\text{эфф}} = \delta \cdot \delta' \cdot \varepsilon. \quad (25)$$

Определенное в соответствии с (25) значение  $\varepsilon^{\text{эфф}}$  для конкретного пирометра экспериментально находится в соответствии с методикой, изложенной выше.

Методическая погрешность вследствие влияния на результат измерения пирометра с термическим приемником температуры корпуса пирометра и/или приемника возникает только в энергетических пирометрах с термическими приемниками излучения [7]. Пирометры с фотоэлектрическими приемниками излучения от этой методической погрешности свободны.

Для минимизации такой методической погрешности в пирометрах с термоэлектрическими приемниками необходимо вводить соответствующую поправку, корректирующую изменение сигнала на выходе пирометра в зависимости от температуры корпуса приемника. Для этого тем или иным способом измеряют температуру корпуса приемника излучения, и далее осуществляют коррекцию в соответствии со следующим алгоритмом [7]:

$$E = \alpha(F_1 \cdot T_1^4 + F_0 \cdot T_0^4 - F_k \cdot T_k^4), \quad (26)$$

где  $\alpha = M \cdot (1 - r)$ ,

$T_0$  – температура окружающей среды в момент проведения измерений,

$T_k$  – температура окружающей среды в момент калибровки,

$F_0$  и  $F_k$  – поглощение линз объектива, соответствующее температурам  $T_0$  и  $T_k$ .

Таким образом, следует, что для минимизации перечисленных методических погрешностей нужно всегда стремиться использовать пирометры, чувствительные в как можно более коротковолновой части спектра.

Использование пирометров, работающих в диапазоне длин волн длиннее 2 мкм с метрологической точки зрения оправдано лишь при измерении температур ниже 200 °С.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неделько, А.Ю. Пирометрические средства измерения температуры / А.Ю. Неделько // Технология машиностроения. – 2006. – № 4. – С. 52–56.
2. Магунов, А.Н. Спектральная пирометрия / А.Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 5–28.
3. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986 – 544 с.
4. Куинн, Т. Температура / Т. Куинн. Пер. с англ. под ред. Д.Н. Астрова. – М.: Мир, 1985. – 448 с.
5. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений: 2-е изд., перераб. и доп / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
6. Лебедева, В.В. Техника оптической спектроскопии: 2-е изд., перераб. и доп / В.В. Лебедева. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 352 с.
7. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для студ. вузов. 4-е изд., перераб. и доп / Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 1999. – 480с.
8. Васильев, А.М. Современные распределенные информационно-измерительные системы. Методология построения. Книга 2 / А.М. Васильев. – М.: МГУПИ, 2009. – 258 с.
9. Гарипов, В.К. Бесконтактное определение свойств расплавов металлов / В.К. Гарипов, А.Н. Подбельский, В.В. Слепцов. Deutschland, Saarbrücken.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 134 с.

#### **Васильев Андрей Михайлович**

Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
Тел.: (499) 269-56-10  
E-mail: amvrf@yandex.ru

#### **Гарипов Вадим Кадимович**

Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные технологии и приборостроение»  
Тел.: (496) 547-34-66  
E-mail: garvad11@gmail.com

#### **Костромин Михаил Анатольевич**

Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и приборостроение»  
Тел.: (496) 547-34-66  
E-mail: mk@omnica.ru

#### **Слепцов Владимир Владимирович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
Тел.: (495) 944-91-65 доб. 1011, 1012  
E-mail: slepsov@mirea.ru

A.M. VASILEV, V.K. GARPOV, M.A. KOSTROMIN, V.V. SLEPTSOV

### ESTIMATES FOR THE ERROR OF TEMPERATURE MEASUREMENTS

## OBJECTS BY MEANS OF NON-CONTACT THERMOMETER

*In article questions of application of methods of contactless thermometry for measurement of temperature of various objects are considered. It is shown that contactless measurements of temperature are characterized by a considerable quantity both methodical, and tool regular errors. The structure of a full error of results of measurements is presented. Dominating components as a part of full errors are defined. It is established that for minimization of the listed methodical errors it is necessary always to aspire to use the pyrometers sensitive in as more as possible short-wave part of a spectrum.*

**Keywords:** errors, contactless thermometry, pyrometers, measurement, objects.

### BIBLIOGRAPHY

1. Nedelko, A.Yu. Pirometricheskiye sredstva izmereniya temperatury / A.Yu. Nedelko // Tekhnologiya mashinostroyeniya. – 2006. – № 4. – S. 52–56.
2. Magunov A.N. Spektralnaya pirometriya / A.N. Magunov // Pribory i tekhnika eksperimenta. – 2009. – № 4. – S. 5–28.
3. Bronshteyn, I.N. Spravochnik po matematike / I.N. Bronshteyn, K.A. Semendyayev. – M.: Nauka, 1986 – 544 s.
4. Kuinn T. Temperatura / T. Kuinn. Per. s angl. pod. red. D.N. Astrova. – M.: Mir, 1985. – 448 s.
5. Novitskiy, P.V. Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereniy: 2-ye izd., pererab. i dop / P.V. Novitskiy, I.A. Zograf. – L.: Energoatomizdat, 1991. – 304 s.
6. Lebedeva, V.V. Tekhnika opticheskoy spektroskopii: 2-ye izd., pererab. i dop / V.V. Lebedeva. – M.: Izdvo MGU, 1986. – 352 s.
7. Yakushenkov Yu.G. Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov: Uchebnik dlya stud. vuzov. 4-ye izd., pererab. i dop / Yu.G. Yakushenkov. – M.: Logos, 1999. – 480s.
8. Vasilyev, A.M. Sovremennyye raspredelennyye informatsionno-izmeritelnyye sistemy. Metodologiya postroyeniya. Kniga 2 / A.M. Vasilyev. – M.: MGUPI, 2009. – 258 s.
9. Garipov, V.K. Beskontaktnoye opredeleniye svoystv rasplavov metallov / V.K. Garipov, A.N. Podbelskiy, V.V. Sleptsov. Deutschland, Saarbrücken.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 134 s.

#### **Vasilev Andrey Mihajlovich**

The Moscow state university of an information technology, a radio engineering and electronics  
Cand.Tech.Sci., the senior teacher of chair «Devices and information-measuring systems»  
Ph.: (499) 269-56-10  
E-mail: amvrf@yandex.ru

#### **Garipov Vadim Kadimovich**

The Moscow state university of an information technology, a radio engineering and electronics  
Dr.Sci.Tech., the professor of chair «the Information technology and instrument making»  
Ph.: (496) 547-34-66  
E-mail: garvad11@gmail.com

#### **Kostromin Michael Anatolevich**

The Moscow state university of an information technology, a radio engineering and electronics  
Cand.Tech.Sci., the senior teacher of chair «the Information technology and instrument making»  
Ph.: (496) 547-34-66  
E-mail: mk@omnica.ru

#### **Slepsov Vladimir Vladimirovich**

The Moscow state university of instrument making and computer science  
Dr.Sci.Tech., the professor of chair «Devices and information-measuring systems»  
Ph.: (495) 944-91-65 доб. 1011, 1012  
E-mail: slepsov@mirea.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. Подписные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

• Рисунки с подрисуночной 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 30.06.2015 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,5.  
Тираж 600 экз.  
Заказ №140/15П2

Отпечатано с готового оригинал–макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.