

**Редакционный совет**

**Голенков В.А.** д-р техн. наук,  
проф., председатель  
**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.  
**Киричек А.В.** 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.

**Редакция**

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

**Заместители главного редактора**  
**Гордон В.А.** д-р техн. наук, проф.  
**Киричек А.В.** д-р техн. наук, проф.  
**Подмастерьев К.В.** д-р техн. наук, проф.

**Члены редколлегии**

**Бабичев А.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Вдовин С.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Дмитриев А.М.** д-р техн. наук, проф.,  
член-кор. РАН  
**Емельянов С.Г.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубарев Ю.М.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубчанинов В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Иванов Б.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Колесников К.С.** д-р техн. наук,  
проф., академик РАН  
**Копылов Ю.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Малинин В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Мулюкин О.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Осадчий В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Панин В.Е.** д-р техн. наук, проф.,  
академик РАН  
**Распопов В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Смоленцев В.П.** д-р техн. наук, проф.

**Ответственный за выпуск**

**Григорьева О.Ю.**

**Адрес редакции**

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,  
43-48-90  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

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

Подписной индекс **29504**  
по объединенному каталогу «Пресса  
России»

© Госуниверситет – УНПК, 2012

## Содержание

### Естественные науки

<i>Корнеев Ю.С., Кобцев Б.Г., Корнеева Е.Н., Грядунова Е.Н.</i> Исследование поведения динамической системы с пускозащитной муфтой при случайных перегрузках.....	3
<i>Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Якушина С.И., Конев А.Н.</i> Дисперсионный закон с точки зрения механики сплошной среды.....	6
<i>Шадрин И.Ф.</i> Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры П.....	14
<i>Колчунов В.И., Брума Е.В.</i> Регрессионная модель динамики численности маломобильных групп населения.....	21
<i>Малинин Г.В.</i> Структурно-аналитическая мезомеханика материалов, испытывающих упругопластические деформации и мартенситные превращения.....	32

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Ивахнюк Г.К., Давыдов Е.И., Лямаев Б.Ф.</i> Устройство и математическая модель вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой для очистки сточных вод.....	40
<i>Портер А.М., Букатый С.А., Округин А.А., Водолагин А.Л.</i> Исследование долговечности валов и дисков ГТД в условиях совместного действия малоциклового усталости и длительной прочности.....	45
<i>Савин Л.А., Сливинский Е.В., Радин С.Ю., Суздальская Е.А.</i> Повышение плавности хода пассажирских вагонов.....	53
<i>Александров М.В., Корнев Л.П.</i> Разработка технологии получения чугунов с вермикулярным графитом для деталей стеклоформ.....	59

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Амбросимов С.К., Большаков А.Н.</i> Теоретические и экспериментальные исследования напряжения текучести при выходе режущего клина из зоны обработки.....	66
<i>Копылов Ю.Р., Кожевников А.А.</i> К проблеме создания виброупрочняющих станков с числовым программным управлением.....	70
<i>Песин М.В.</i> Повышение надежности резьбовых соединений изделий горных машин, нефтегазопромышленного и бурового оборудования.....	75
<i>Юрьев В.Г., Зубарев Ю.М., Зайцев Г.П.</i> Сравнительная оценка обрабатываемости керамических материалов.....	80

### Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

<i>Фетисов И.В.</i> Решение модельной задачи о случайных колебаниях подвесной части стиральной машины.....	84
--	----

### Приборостроение и биотехнические системы

<i>Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С.</i> Построение и моделирование вихревого датчика аэродинамического угла и воздушной скорости.....	96
<i>Еременко В.Т., Тютякин А.В.</i> Подход к выбору профилей сбора и обработки данных в системах неразрушающего контроля и диагностики технических объектов.....	103
<i>Королёв М.В., Ларкин Е.И., Иванов Ю.Б.</i> Обеспечение защищенности речевой информации при использовании систем виброакустического шумления.....	111
<i>Ганеев Ф.А., Ганеев Т.Ф., Уразбахтин И.Р.</i> Моделирование амплитудного ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости.....	121

### Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Гаврилина В.А., Сычев С.Н.</i> Информационная поддержка контроля качества вина.....	128
<i>Марков В.В.</i> Математическая модель тепловых процессов в элементарном фрикционном контакте.....	136
<i>Белов А.А., Проскурьяков А.Ю.</i> Вопросы прогнозирования уровней концентраций в телекоммуникационной системе газового контроля промышленных и коммунальных объектов.....	143
<i>Горшков А.А., Ларкин Е.В.</i> Расчет наблюдаемой площади в системе с множеством видеокамер.....	150



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

**№ 4 (294) 2012**

# Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

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

## Editorial council

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
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.

**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Novikov A.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Popova L.V.** Doc. Sc. Ec., Prof.

**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Editorial Committee

### Editor-in-chief

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

### Editor-in-chief Assistants

**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Podmasteryev K.V.** Doc. Sc. Tech.,  
Prof.

### Member of editorial board

**Babichev A.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Vdovin S.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Dmitriev A.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Corresponding Member of RAS

**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Zubarev Y.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Subchaninov V.G.** Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.

**Ivanov B.R.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kolesnikov K.S.** Doc. Sc. Tech.,  
Prof., Academician of RAS

**Kopylov Y.R.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Malinin V.G.** Doc. Sc. Ph.-Math., Prof.

**Mulyukin O.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Osadchy V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Panin V.E.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Academician of RAS

**Raspopov V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Smolenzev V.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.

### Responsible for edition

**Grigorieva O.Yu.**

### Address

302020 Orel,  
Naugorskoe Chossee, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,  
43-48-90  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency  
of supervision in sphere of commun-  
ication, 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, 2012

## Contents

### Natural science

<b>Korneev Y.S., Kobtsev B.G., Korneeva E.N., Gryadunova E.N. The research of behavior of dynamic system with a start-protective clutch at casual overloads.....</b>	<b>3</b>
<b>Frolenkova L.YU., Shorkin V.S., Yakushina S.I., Konev A.N. The dispersion law from the point of view of mechanics of a continuous medium.....</b>	<b>6</b>
<b>Shadrin I.F. Hard rods on a two-dimensional surface. Clusters II.....</b>	<b>14</b>
<b>Kolchunov V.I., Bruma E.V. Regression model of dynamics of number of low-mobile groups of the population.....</b>	<b>21</b>
<b>Malinin G.V. Structural and analytical mesomechanics of materials, experiencing elastic-plastic deformation and martensite transformations.....</b>	<b>32</b>

### Construction, calculation, material

<b>Ivakhnyuk G.K., Davydov E.I., Lyamaev B.F. The device and mathematical model of the vertical sediment bowl with the spirally-wound nozzle for wastewater treatment.....</b>	<b>40</b>
<b>Porter A.M., Bukatyi S.A., Okrugin A.A., Vodolagin A.L. Research of durability of shaft and disks gas-turbine engine in the conditions of joint action of low-cyclic fatigue and long durability.....</b>	<b>45</b>
<b>Savin L.A., Slivinskii E.V., Radin S.J., Suzdaltva E.A. Improved ride passenger cars.....</b>	<b>53</b>
<b>Alexandrov M.V., Korenev L.P. Technology of production of compacted graphite cast irons for glass moulds.....</b>	<b>59</b>

### Machine building technology and toolware

<b>Ambrosimov S.K., Bolshakov A.N. The oretical and experimntal research the yield stress in a moment outlet cutting edge from the zone of treatment.....</b>	<b>66</b>
<b>Kopylov Y.R., Kozhevnikov A.A. To problem of creation of vibroconsolidating machine-tools with programmatic management.....</b>	<b>70</b>
<b>Pesin M.V. Increase of reliability of carving connections of oil-and-gas products.....</b>	<b>75</b>
<b>Yuriev V.G., Zubarev Y.M., Zaitcev G.P. Comparative appreciation of ceramic material machining</b>	<b>80</b>

### Machine, apparatus, technology light and food industry

<b>Fetisov I.V. Model problems random oscillations hanging of the washing machine.....</b>	<b>84</b>
--	-----------

### Instrument making and biotechnological system

<b>Soldatkin V.M., Soldatkina E.S. Construction and simulation vortex sensor angle of aerodynamic and air speed.....</b>	<b>96</b>
<b>Eremenco V.T., Tiutiakin A.V. An approach to the selection of data acquisition and processing profiles in the systems of technical objects non-destructive testing and diagnostics.....</b>	<b>103</b>
<b>Korolyov M.V., Larkin E.I., Ivanov Y.B. Ensuring security of voice information using the vibro-acoustic noising systems.....</b>	<b>111</b>
<b>Ganeev F.A., Ganeev T.F., Urazbahtin I.R. Simulation of amplitude ion-marking sensor aerodynamic angle and air speed.....</b>	<b>121</b>

### Tests, control, diagnostics and quality control

<b>Gavrilina V.A., Sychev S.N. Informational support for the control of wine.....</b>	<b>128</b>
<b>Markov V.V. Mathematical model of thermal processes in the elementary friction contact.....</b>	<b>136</b>
<b>Belov A.A., Proskuryakov A.Y. Questions of prediction concentration levels in the telecommunica-tions industrial and municipal facilities gas control system.....</b>	<b>143</b>
<b>Gorshkov A.A., Larkin E.V. Computation of observed square in a multi-video-camera system.....</b>	<b>150</b>

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees.



$$b_1 = \frac{\cos \beta + \text{sign} \dot{x} \left( f \sin \beta \right)}{\sin \beta - \text{sign} \dot{x} \left( f \cos \beta \right)} \quad (6)$$

$$b_3 = \frac{f \text{sign} \dot{x} + b_1}{z \sin \beta}. \quad (7)$$

Вообще при всех исследованиях (на всех этапах) лучше всего применять формулы (6) и (7). Это не приведет к возможным ошибкам. Все сказанное будет происходить также, если уменьшить момент двигателя. Однако при рассмотрении движения грузов (шаров) вверх-вниз мы не учитывали условий движения. Ясно, что движение вверх возможно, если сумма проекций всех сил на ось  $x$ , действующих на груз, положительна. Если эта сумма отрицательна – тело может двигаться вниз.

Используя рисунок 1, имеем:

для движения вверх необходимо  $\dot{x} > 0$ :

$$F_u \geq F_1 + F_2 \sin \beta + N_2 \cos \beta, \quad (8)$$

для движения вниз  $\dot{x} < 0$ :

$$F_u + F_1 + F_2 \sin \beta \leq N_2 \cos \beta. \quad (9)$$

Из уравнений (8) и (9) определяются допустимые углы  $\beta$ , при которых не происходит заклинивания шаров.

Решение уравнений движения на всех этапах (и особенно на последнем) следует вести с учетом ограничений (8) и (9).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеева, Е.Н. Динамика безнагрузочного разгона механической пусковой муфты, применяемой в приводах транспортных машин / Е.Н. Корнеева, В.А. Гордон // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт» 2008.– № 1/17 (542). – С. 75–84.
2. Корнеев, Ю.С. Динамика разгона исполнительного органа технологической машины с пускозащитной муфтой при установившемся движении / Ю.С.Корнеев, В.А. Гордон, Е.Н. Корнеева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 2011.– № 4/(288).– С. 3 – 7.
3. Корнеева, Е.Н. Методы Рунге и Штермера для решения дифференциальных уравнений первого порядка / Е.Н. Корнеева, В.А. Гордон, Ю.С. Корнеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии 2009.– № 6/278 (577).– С. 33 – 38.

### Корнеев Юрий Степанович

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: 41-98-96

### Кобцев Борис Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: 41-98-72

### Корнеева Елена Николаевна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: 41-98-48

### Грядунова Елена Николаевна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: 41-98-72

Y.S. KORNEEV, B.G. KOBTSEV, E.N. KORNEEVA, E.N. GRYADUNOVA

## THE RESEARCH OF BEHAVIOR OF DYNAMIC SYSTEM WITH A START-PROTECTIVE CLUTCH AT CASUAL OVERLOADS

*The article is devoted to the equations describing the dynamics of work of system with a start-protective clutch at overloads from the technological car, caused by random factors at first time.*

**Keywords:** *tecnological machine, clutch, overloads, the differential equations.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Korneeva, E.N. Dinamika beznagruzochnogo razgona mehanicheskoy puskovoj mufty, primenjaemoj v privodah transportnyh mashin / E.N. Korneeva, V.A. Gordon // Izvestija OrelGTU. Serija «Stroitel'stvo. Transport» 2008.– № 1/17 (542). – S. 75–84.
2. Korneev, Ju.S. Dinamika razgona ispolnitel'nogo organa tehnologicheskoy mashiny s puskozawit-noj muftoj pri ustanovivshemsja dvizhenii / Ju.S.Korneev, V.A. Gordon, E.N. Korneeva // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii 2011.– № 4/(288).– S. 3 – 7.
3. Korneeva, E.N. Metody Runge i Shtermera dlja reshenija differencial'nyh uravnenij pervogo po-rjadka / E.N. Korneeva, V.A. Gordon, Ju.S. Korneev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i teh-nologii 2009.– № 6/278 (577).– S. 33 – 38.

#### **Korneyev Yuri Stepanovich**

State University ESPC

Candidate of technical Sciences, associate Professor

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 41-98-96

#### **Kobtsev Boris Georgievich**

State University ESPC

Candidate of technical Sciences, associate Professor

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 41-98-72

#### **Korneeva Elena Nikolaevna**

State University ESPC

Candidate of technical Sciences, associate Professor

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 41-98-48

#### **Gryadunova Elena Nikolaevna**

State University ESPC

Candidate of technical Sciences, associate Professor

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 41-98-72

## ДИСПЕРСИОННЫЙ ЗАКОН С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

*При движении волн деформации в среде распространяются импульс и энергия. Их передача от атома к атому происходит в течение периода их колебаний около положения равновесия. Учет только потенциального взаимодействия предполагает мгновенную передачу. Предлагаемой моделью упругой среды учитывается передача импульса от частицы к частице в течение конечного промежутка времени. Полученное волновое уравнение содержит смешанные производные поля перемещений по координатам и времени.*

**Ключевые слова:** дисперсионный закон, волновое уравнение, тензоры деформации и напряжений, сплошная среда, градиентная теория упругости, потенциал взаимодействия.

### ВВЕДЕНИЕ

Описание особенностей поведения материала в приповерхностном слое является актуальной задачей. В работе [1] предложена теория упругой среды, позволяющая моделировать напряженно-деформированное состояние вблизи ее границы. В работах [2, 3] представлены результаты реализации теории для количественной оценки прочности адгезионного сцепления элементов многослойных стенок бланкета термоядерного реактора. Эта оценка проводилась для статических условий. Вместе с тем, стенки бланкета подвержены бомбардировке нейтронным потоком. Он способен вызвать [4] распространение в их материале волн очень высокой частоты. Дисперсионный закон, характеризующий их, имеет две нелинейные ветви – акустическую и оптическую. Теория [1] способна описать только первую из них. Предлагаемое обобщение теории [1] дает возможность описать обе ветви, тем самым добиться большей адекватности в описании поведения реальных материалов в рамках механики сплошной среды. Основное допущение, позволяющее сделать это, состоит в учете конечности времени тепловых флуктуаций конденсированной среды в записи закона сохранения импульса. При построении балансовых соотношений для сплошной среды обычно используются осредненные (по предположению) характеристики ее поведения. Флуктуации этих характеристик, связанные с тепловым колебанием атомов, не учитываются. Это возможно лишь тогда когда деформации соседних элементарных ячеек дискретной структуры неразличимы. Подобный подход называют длинноволновым приближением [2, 3, 4]. Он применим для эффектов, имеющих на много превышающий межатомное расстояние масштаб, а также длительность, большую периода колебаний атомов. Волны, порожденные рентгеновским облучением, бомбардировкой среды нейтронным потоком, имеют длину, соизмеримую с межатомным расстоянием. Предлагаемая далее модель направлена на изучение этих волн.

### ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ В ОТСУТСТВИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Используются следующие основные допущения.

1. Плотность и температура материала постоянны.
2. Взаимодействие малых частиц  $dV$  и  $dV_1$  потенциальное, парное.

Потенциал пропорционален их объемам. Коэффициент пропорциональности  $\Phi = \Phi(\vec{r}_1, \vec{R})$  (далее потенциал) – непрерывная и дифференцируемая функция своих аргументов, где  $\vec{R}$  и  $\vec{r}_1$  – радиус-векторы частиц  $dV$  и  $dV_1$  в текущей конфигурации среды.

3. Сила действия частицы  $dV_1$  на частицу  $dV$  –  $\vec{F} dV dV_1$ , определяется уравнением

$$\vec{F} = -\nabla \Phi(\vec{r}_1 - \vec{R}) \Big|_{\Delta \vec{u}=0} \quad (1)$$

где  $\vec{a} = \vec{r}_1 - \vec{r}$  – радиус-вектор частицы  $dV_1$  относительно  $dV$ ;

$a = |\vec{a}|$  – расстояние между центрами масс взаимодействующих частиц в отсчетном состоянии;

$\vec{u} = \vec{R} - \vec{r}$  – вектор смещения  $dV$  из отсчетного состояния с радиус-вектором  $\vec{r}$  в текущее.

4. Для относительного смещения  $\Delta \vec{u}$  справедливо представление в виде ряда Тейлора по внешним степеням вектора  $\vec{a}$ :

$$\Delta \vec{u} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \left[ \nabla_{\vec{r}}^{(n)} \vec{u} \right]_{\vec{a}=0} \overset{n \text{ раз}}{\cdot \dots \cdot} \vec{a}^n, \quad (2)$$

где  $\nabla_{\vec{r}}$  – знак свертки;

$\vec{a}^n$  – внешняя  $n$ -я степень вектора  $\vec{a}$ ,

$\nabla_{\vec{r}}^n$  – вектора  $\nabla = d \dots / d \vec{r}$ ;

$\Delta$  – знак приращения; поскольку вектор  $\vec{a}$  отсчитывается от точки  $M$  – конца вектора  $\vec{r} = \vec{OM}$ , то при неизменности положения точек  $O$  и  $M_1$  справедливо равенство:  $d \vec{a} = -d \vec{r}$ .

Дифференциальные уравнения движения имеют вид:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = \text{div} \text{div} \text{div} \dots \text{div} \vec{f}. \quad (3)$$

Здесь:

$$P^{(n)} = P^{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} C^{(n)} \cdot \dots \cdot \nabla_{\vec{r}}^n \vec{u}. \quad (4)$$

$$P^{(0)} = \int_{\Omega} \vec{f} dV_1, \quad C^{(n,m)} = \frac{1}{n!m!} \int_{\Omega} \vec{a}^n \nabla_{\vec{a}}^m \vec{F} dV_1. \quad (5)$$

где  $\vec{f}$  – объемная плотность внешних распределенных сил;

$\rho$  – плотность материала;

$t$  – время;

$\Omega$  – обозначение бесконечно протяженной среды.

Бесконечная последовательность  $\nabla_{\vec{r}}^n \vec{u}$  градиентов перемещений характеризует деформируемое состояние бесконечно малой окрестности  $dV$  точки среды. Обобщенными силами, совершающими работу на них, как на обобщенных перемещениях, являются тензоры напряжений  $P^{(n)}$ , определяемые уравнениями (4), (5). Тензоры  $P^{(0)}$  характеризуют начальное напряженное состояние среды, тензоры  $C^{(n,m)}$  – ее механические свойства.

В рамках "мгновенного" описания дисперсионный закон – зависимость  $\omega(K)$  в одномерном случае для продольных волн, с помощью подстановки  $u = u_0 e^{i(\omega t - Kx)}$ , где  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  – круговая частота колебаний,  $K$  – волновое число, можно получить в виде степенного ряда на основании уравнения (3), которое в этом случае при  $\vec{f} = 0$  имеет вид:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b_1^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \dots, \quad (6)$$

где  $c = \sqrt{\frac{C_{1111}^{(1,1)}}{\rho}}$  – скорость распространения длинных продольных волн малой амплитуды в упругой среде, коэффициенты  $b_j$  определяются формулами:

$$b_{j-1}^{2(j-1)} = \frac{D_j}{D_1}, \quad j = 1, 2, \dots,$$

$$D_1 = C_{1111}^{(1,1)} > 0, \quad D_2 = C_{111111}^{(1,3)} - C_{111111}^{(2,2)} + C_{111111}^{(3,1)} > 0, \quad (7)$$

Дисперсионный закон имеет вид:

$$\frac{\omega^2}{c^2} = K^2 - b_1^2 K^4 + \dots = \frac{1}{a^2} \left[ \left( \frac{b_1}{a} \right)^2 K^4 + \dots \right]. \quad (8)$$

Очевидно, что выражение (8) описывает только акустическую ветвь и при надлежащем подборе коэффициентов  $b_1, \dots$ , характеризующих неклассические упругие свойства среды, может быть использовано для обработки как экспериментальных, так и теоретических данных, полученных физикой твердого тела для дискретной среды.

Для обоих типов волн в разложении (8) сохранились только первые два члена: первый – классический, и второй, содержащий неизвестную постоянную  $b_1$ . Скорость  $c$  распространения волны, хотя и является известной характеристикой материала, также предполагалась неизвестной. Оба параметра  $b_1$  и  $c$  определялись по имеющимся экспериментальным данным [4] для поперечной волны. Потенциал взаимодействия частиц среды  $\Phi = \Phi(\xi)$  в ее отсчетном состоянии использовался в форме

$$\Phi(\xi) = \alpha_1 e^{-\eta} + \alpha_2 e^{-2\eta}, \quad \eta = \frac{a}{\sigma}, \quad (9)$$

содержащей два неизвестных параметра  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  ( $\sigma$  – среднее межатомное расстояние), через которые посредством формул (5) и (7) выражены  $b_1$  и  $c$ . Это дает возможность найти значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  с помощью которых вычисляются значения  $b_1$  и  $c$  для продольной волны. Используя найденные числа построены кривые дисперсионных законов как для продольной, так и для поперечной волн. Результаты представлены на рисунках 1 и 2.

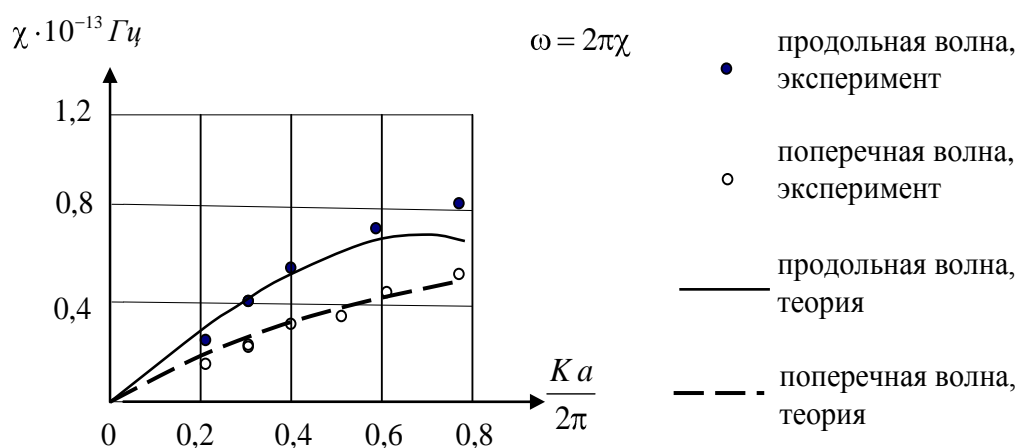


Рисунок 1 – Дисперсионные кривые для упругих волн

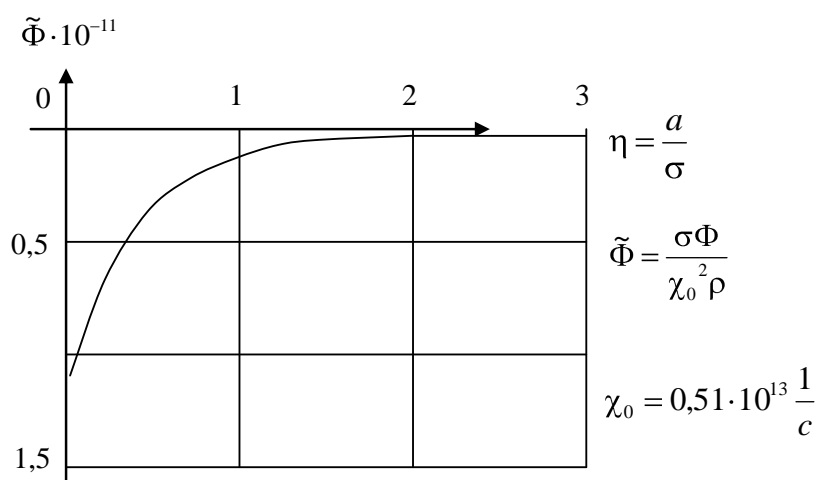


Рисунок 2 – График зависимости потенциала  $\tilde{\Phi}$  от расстояния между частицами



**ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

Для учета конечности времени тепловых флуктуаций механических характеристик среды вводятся дополнительные гипотезы.

1. В отсутствии внешних воздействий частицы сплошной среды совершают движение, описываемое вектором смещений  $\vec{w}(\mathbf{r}, t)$ . Этот вектор удовлетворяет следующим условиям.

- Существует такая постоянная величина  $T$ , что для каждой частицы  $dV$  и для всякой величины  $\varepsilon$ :  $0 < \varepsilon < T$  в любой момент времени  $t^*$  среднее на отрезке  $[t^* - \varepsilon, t^* - \varepsilon + T]$  значение  $\langle \vec{w}(\mathbf{r}, t^*) \rangle$  вектора смещения равно нулю:

$$\langle \vec{w}(\mathbf{r}, t^*) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t^* - \varepsilon}^{t^* - \varepsilon + T} \vec{w}(\mathbf{r}, t) dt = \vec{0}. \tag{10}$$

- Для каждой частицы  $dV$  существует такой момент  $t^* = t$ , для которого

$$\vec{w}(\mathbf{r}, t) = \vec{0}, \quad \vec{w}(\mathbf{r}, -\tau) = -\vec{w}(\mathbf{r}, +\tau), \quad \tau = t_1 - t. \tag{11}$$

Далее для каждой частицы рассматриваются только эти моменты времени.

2. Допускается, что под влиянием внешних воздействий на колебательное движение частиц сплошной среды накладывается такое смещение  $\vec{U}(\mathbf{r}, t) = \vec{U}(\mathbf{r}, t)$ , что изменение этого

вектора на отрезке  $\tau \in \left[-\frac{T}{2}; +\frac{T}{2}\right]$  незначительно и допустимо утверждение

$$\vec{U}(\mathbf{r}, t) = \langle \vec{U}(\mathbf{r}, t + \tau) \rangle. \tag{12}$$

3. Потенциал  $\Phi(\mathbf{r}_1, \vec{R})$  тот же, что и в отсутствии динамического эффекта. Значит, остаются без изменения величины  $C^{(a,n)}$ , сохраняют свой вид соотношения, связывающие тензоры напряжений  $P^{(a)}$  с потенциалом  $\Phi(\mathbf{r}_1, \vec{R})$  и вектором перемещений  $\vec{w}(\mathbf{r})$ .

4. Внешние воздействия на изучаемое тело  $B$  в течение отрезка времени  $\tau \in \left[-\frac{T}{2}; +\frac{T}{2}\right]$  считаются постоянными.

5. Уравнение движения представляют собой равенство изменения количества движения частицы  $dV$  полученному ей импульсу, но не за бесконечно малый отрезок времени, а за конечный, длина которого равна  $T$ .

За это время "сглаживаются" флуктуации вектора перемещений, вызванные тепловыми колебаниями частиц среды. Такое уравнение имеет вид:

$$\int_{-\frac{T}{2}+t}^{+\frac{T}{2}+t} \mathbf{F} \cdot P(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} = \rho \int_{-\frac{T}{2}+t}^{+\frac{T}{2}+t} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}. \tag{13}$$

Здесь:  $\vec{u} = \vec{w} + \vec{U}$ ,  $P = P^{(0)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{(1)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{(2)} - \dots$

Далее осуществляется преобразование этого уравнения.

В произвольный момент времени  $t_1$  считается справедливым разложение в окрестности точки  $\tau = t_1 - t = 0$ :

$$P(\mathbf{r}, t) = P^{(0)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{(1)} - \nabla \cdot \mathbf{P}^{(2)} - \dots = P(\mathbf{r}, t + \tau) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \frac{\partial^k P}{\partial t^k} \tau^k. \tag{14}$$

Здесь учтено, что  $\frac{\partial}{\partial t_1} = -\frac{\partial}{\partial t}$ .

Кроме того, в уравнении движения учитывается, что:



$C_{12} = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ н/м}$ ,  $C_{44} = 5,76 \cdot 10^{11} \text{ н/м}$ ,  $\rho = 3,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}$ , вычислено значение  $\chi = \frac{1}{T} = 40 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$ .

По найденным данным построены теоретические кривые для акустической ветви продольной волны и оптические ветви продольной и поперечной волн. Они представлены на рисунке 3.

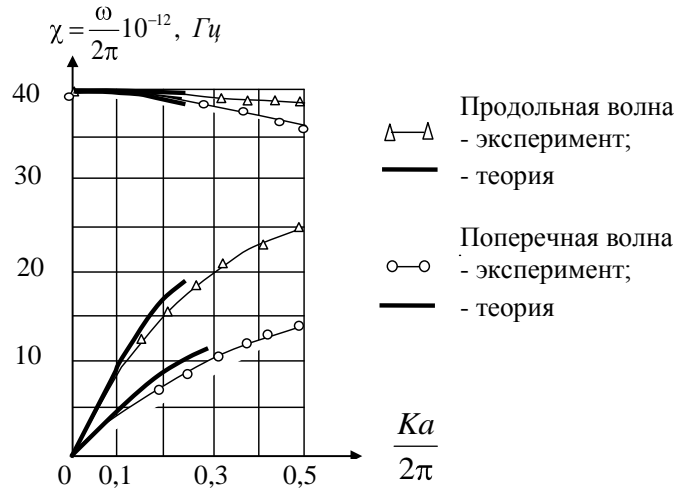


Рисунок 3 – Дисперсионный закон для кристалла алмаза в направлении [111] (верх – оптические ветви, низ – акустические ветви для продольной и поперечной волн)

Полученное удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных данных свидетельствует о справедливости проведенных рассуждений.

Адекватность выражения (19) дисперсионному закону, полученному физикой твердого тела, следует также из наличия возможности совпадения их выражений. Поскольку рассматриваемая сплошная среда предполагается однородной, полученная форма записи дисперсионного закона сравнивается с формой, полученной для дискретных сред с элементарной ячейкой, состоящей из двух одинаковых атомов. (Предполагается, что однородность соответствует этой ситуации.) В этом случае дисперсионный закон для плоской продольной одномерной волны имеет вид [4]:

$$\omega^2 \left( 1 - \frac{M}{4C} \omega^2 \right) = \frac{C}{2M} \left( 1 - \cos Ka \right) \quad (22)$$

Здесь  $M$  – масса атомов, входящие в элементарную ячейку;  $C = \frac{d^2\Psi}{da^2} \Big|_{a=\sigma}$  – силовая постоянная;  $\Psi$  – потенциал парного взаимодействия атомов решетки.

Полного совпадения выражений (19) и (22) можно добиться, если выполняются равенства

$$T^2 = \frac{M}{C}, \quad \frac{c^2}{\sigma^2} = \frac{C}{2M}, \quad \left( \frac{b_1}{\sigma} \right)^2 = \frac{2!}{4!} \dots \quad (23)$$

Полученный результат подтверждает справедливость предложенных выше теоретических построений для получения выражения дисперсионного закона для сплошной упругой среды, адекватного известному в физике твердого тела выражению, содержащему решения как для акустической, так и оптической его ветвей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рабочие камеры ядерных реакторов, бланкеты термоядерных реакторов подвержены мощному воздействию нейтронного потока. Обычно учитывается лишь то, что нейтроны, застревая в атомной структуре материала, изменяют его механические характеристики. Од-

нако нейтронный поток, как следует из данных опытов, представленных в [4], способен вызывать колебания атомной решетки с высокими частотами и порождать волны с длиной в нанометровом диапазоне. Возбуждая собственные колебания элементов многослойных стенок реактора, blankets они могут привести к их разрушению за счет частичного или полного расслаивания.

Предложенная модель упругой среды позволяет провести необходимые расчеты дисперсионного закона сред сложного состава и структуры.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шоркин, В. С. Модель сплошной упругой среды, основанная на представлении о дальнедействующем потенциальном взаимодействии ее частиц [Текст] / В. С. Шоркин // Упругость и неупругость. Материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 95-летию со дня рождения А. А. Ильюшина (Москва, 19-20 января 2006 года) / Под ред. И.А. Кийко, Р.А. Васина, Г.Л. Бровко. – М.: Лена-нанд, 2006. – С. 271 – 282.
2. Vitcovsky, I. V. Adhesion energy estimation of some composite materials [Text] / I. V. Vitcovsky, F. N. Konev, V. S. Shorkin, N. D. Kzaev, A. E. Rusanov, V. M. Khoroshikh and S. L. Leonov. // Plasma Devices and Operations. – 2003. – Vol. 11 (2). – P. 81 – 87.
3. Витковский, И. В. Теоретическая оценка несплошности адгезионного контакта элементов жидкометаллического blankets термоядерного реактора [Текст] / И. В. Витковский, А. Н. Конев, С. И. Якушина, В. С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – Вып. 6. – С.28-33.
4. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела [Текст] / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 792 с.
5. Лейбфрид, Г. Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов [Текст] / Г. Лейбфрид. – М.–Л.: Гос. изд-во ф.-м. лит., 1963. – 312 с.
6. Кунин, И. А. Теория упругих сред с микроструктурой [Текст] / И. А. Кунин. – М.: Наука, 1975. – 476 с.
7. Ландау, Л. Д. Статистическая физика [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука. – Т. 5, 1976. – 584 с.

**Фроленкова Лариса Юрьевна**

ФГБОУ ВПО "Государственный университет-УНПК", г. Орел  
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры "Физика"  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 41-98-44  
E-mail: LaraFrolenkova@yandex.ru

**Шоркин Владимир Сергеевич**

ФГБОУ ВПО "Государственный университет-УНПК", г. Орел  
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой "Физика"  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 41-98-44  
E-mail: VSorkin@yandex.ru

**Якушина Светлана Ивановна**

ФГБОУ ВПО "Государственный университет-УНПК", г. Орел  
старший преподаватель кафедры "Высшая математика"  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 41-98-48  
E-mail: jakushina@rambler.ru

**Конев Алексей Николаевич**

ОАО «Ижорские заводы»  
Зам. начальника производственно-диспетчерского управления  
Тел. 89217598034  
E-mail: sisop@gmx.net

---

L. YU. FROLENKOVA, V.S. SHORKIN, S.I. YAKUSHINA, A.N. KONEV

## **THE DISPERSION LAW FROM THE POINT OF VIEW OF MECHANICS OF A CONTINUOUS MEDIUM**

*At motion of strain waves in the medium the impulse and energy extended. Their transfer from atom to atom happened during the cycle of vibration about position of equilibrium. The account only potential of interaction assumed instant transfer. The model of the elastic medium, which considers transfer of an impulse from a particle to a particle during a final time interval, is offered. The received wave equation contained the mixed derivative fields of displacement on coordinates and time.*

**Keywords:** dispersion law, wave equation, tensor of strain and stress, continuum, gradient theory of elasticity, potential of interaction.

## BIBLIOGRAPHY

1. Shorkin, V. S. Model' sploshnoj uprugoj sredy, osnovannaja na predstavlennii o dal'nodejstvujuwem potencial'nom vzaimodejstvii ee chastic [Tekst] / V. S. Shorkin // Uprugost' i neuprugost'. Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma po problemam mehaniki deformiruemyh tel, posvjawennogo 95-letiju so dnja rozhdenija A. A. Il'jushina (Moskva, 19-20 janvarja 2006 goda) / Pod red. I.A. Kijko, R.A. Vasina, G.L. Brovko. – M.: Lenand, 2006. – S. 271 – 282.
2. Vitcovsky, I. V. Adhesion energy estimation of some composite materials [Text] / I. V. Vitcovsky, F. N. Konev, V. S. Shorkin, N. D. Kzaev, A. E. Rusanov, V. M. Khoroshikh and S. L. Leonov. // Plasma Devices and Operations. – 2003. – Vol. 11 (2). – P. 81 – 87.
3. Vitkovskij, I. V. Teoreticheskaja ocenka nesploshnosti adgezionnogo kontakta jelementov zhidkometallicheskogo blanketa termojadernogo reaktora [Tekst] / I. V. Vitkovskij, A. N. Konev, S. I. Jakushina, V. S. Shorkin // Zhurnal tehnichejskoj fiziki. – 2007. – T. 77. – Vyp. 6. – S.28-33.
4. Kittel', Ch. Vvedenie v fiziku tverdogo tela [Tekst] / Ch. Kittel'. – M.: Nauka, 1978. – 792 s.
5. Lejbfriid, G. Mikroskopicheskaja teorija mehanicheskih i teplovyh svojstv kristallov [Tekst] / G. Lejbfriid. – M.–L.: Gos. izd-vo f.-m. lit., 1963. – 312 s.
6. Kunin, I. A. Teorija uprugih sred s mikrostrukturoj [Tekst] / I. A. Kunin. – M.: Nauka, 1975. – 476 s.
7. Landau, L. D. Statisticheskaja fizika [Tekst] / L. D. Landau, E. M. Lifshic. – M.: Nauka. – T. 5, 1976. – 584 s.

### **Frolenkova Larisa Yurievna**

State University ESPC

candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor, associate Professor of the Department of "Physics"  
g. Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. (4862) 41-98-44

E-mail: LaraFrolenkova@yandex.ru

### **Shorkin Vladimir Sergeevich**

State University ESPC

doctor of physico-mathematical Sciences, Professor, head of the Department of "Physics"

g. Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. (4862) 41-98-44

E-mail: VSorkin@yandex.ru

### **Yakushina Svetlana Ivanovna**

State University ESPC

the senior teacher of Department "Higher mathematics"

g. Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. (4862) 41-98-48

E-mail: jakushina@rambler.ru

### **Konev Aleksey Nikolaevich**

OAO Izhorskiye Zavody

Deputy head of production and dispatching control

Tel. 89217598034

E-mail: sisop@gmx.net

И.Ф. ШАДРИН

## ЖЁСТКИЕ СТЕРЖНИ НА ДВУМЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ. КЛАСТЕРЫ II

*Компьютерное моделирование методом Монте-Карло использовано для изучения локальной структуры в системе твёрдых стержней, находящихся на плоской (2D) поверхности. В работе изучались некоторые характеристики кинематического и структурообразующего элемента – кластера, состоящего из группы стержней, отбираемых по определённым критериям. Определялись области допустимых значений критериев кластерообразования и некоторые характеристики распределения кластеров.*

**Ключевые слова:** жёсткие стержни, 2D-поверхность, кластер, структурообразование.

### ВВЕДЕНИЕ

Из классических работ [1, 2] известно, что дальний порядок в двумерных системах невозможен из-за неограниченного роста тепловых флуктуаций направлений директора ориентации и что расходимость является логарифмической. Средне-полевые теории [3-5] не в состоянии объяснить наличие "квази-дальнего порядка", поскольку различием между истинным и "квази-дальним порядком" можно пренебречь из-за ограниченности размеров моделируемых систем и времени моделирования.

Наша работа направлена на изучение локальной структуры в 2D-системах анизотропных частиц и уточнение морфологической структуры в 2D-системах посредством введения кинематического и структурообразующего элемента – кластера [6, 7]. Кластер – это образование из рядом расположенных стержней, отбираемых по определённым критериям, причём кластеры можно видеть и при низких, и при больших концентрациях стержней. Некоторые мезофазы в 2D-системах анизотропных частиц можно описать через иерархию кластеров различной степени «плотности и упорядоченности».

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

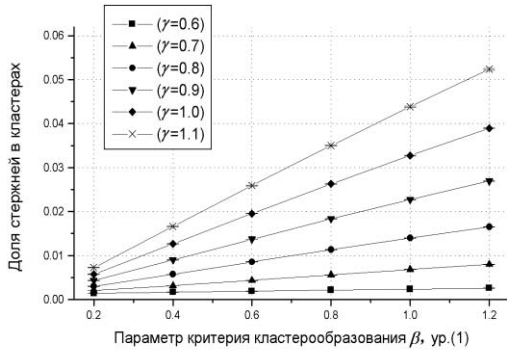
Из нашей предыдущей статьи [7] следует, что кластеры в системе стержней образуются в широком диапазоне концентраций от 10% до 80% и при разных осевых отношениях стержней  $P = L/D = 6, 15, 30$ . И если в области малых концентраций число кластеров мало, то при средних и больших концентрациях большая часть стержней системы входит в кластеры. Как следует из определения кластеров ([7] ур.2), они могут быть рыхлыми и плотными, в зависимости от того, как стержни в среднем будут располагаться в нём. Условно можно считать, что параметр критерия кластерообразования (ПКК)  $\gamma$  отвечает за близость поверхностей стержней друг к другу, а значит, и за плотность кластера в среднем. Параметр  $\beta$  отвечает за близость центров стержней в их соосном упорядочении, следовательно, и за упорядоченность образующихся кластеров и их похожесть на смектические или столбчатые структуры. Таким образом, согласно [7], к параметрам ПКК можно предъявлять различные требования по поиску и выявлению разнообразных морфологических структур в хаотической системе стержней.

По нашему мнению, выбор конкретных значений параметров критерия кластерообразования должен удовлетворять следующим требованиям:

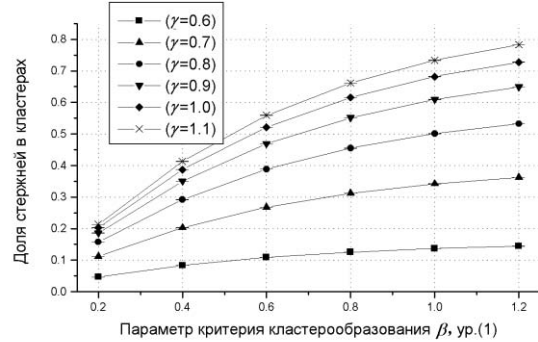
- а) быть применимым во всем диапазоне исследуемых концентраций;
- б) быть применимым для стержней с разными осевыми отношениями;
- в) давать максимально полную информацию об иерархии микроструктур стержней в системе;
- г) полный набор параметров критерия кластерообразования должен быть фиксиро-

ванным и минимальным по количеству.

Для проверки вышеперечисленных требований (при предварительных исследованиях) системы двумерных жестких сфероцилиндров при различных концентрациях нами была выбрана следующая матрица набора ПКК, состоящая из сочетания двух линейных векторов  $\gamma \in (0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1)$  и  $\beta \in (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2)$ . При малых значениях ПКК (векторов  $\gamma, \beta$ ) мы получаем плотные и смектически подобные кластеры, а при больших значениях имеем возможность выделять рыхлые и нерегулярные кластеры.

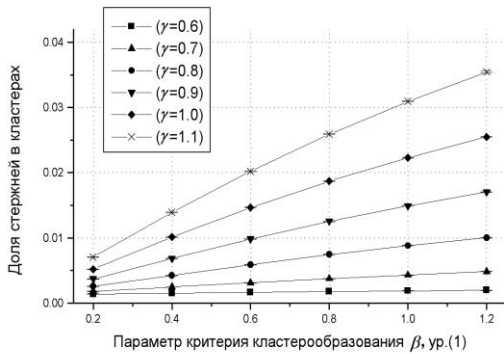


а)

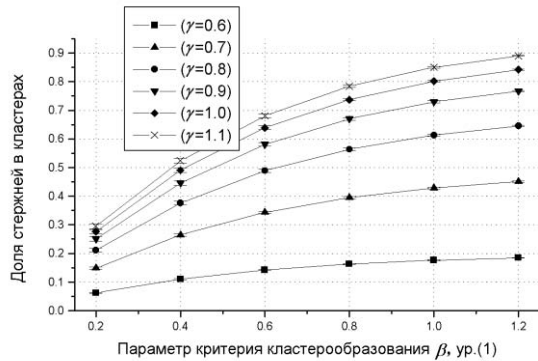


б)

Рисунок 1 – Осевое отношение  $P=6$  при концентрации стержней а) 10%, б) 50%

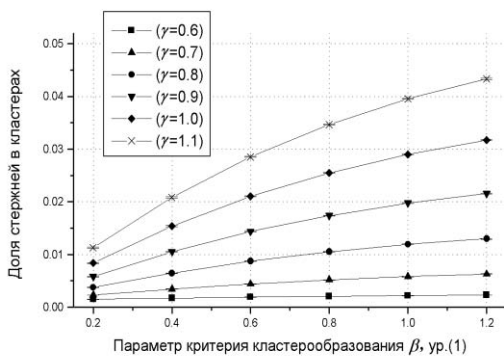


а)

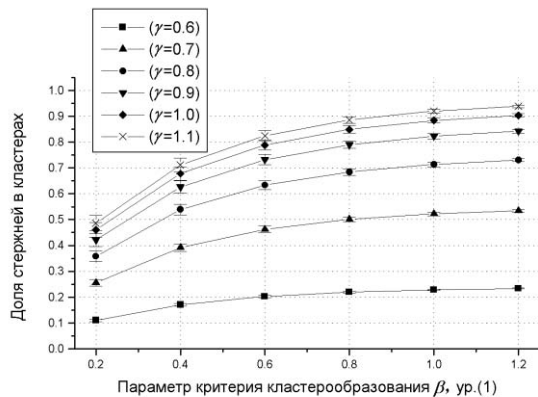


б)

Рисунок 2 – Осевое отношение  $P=15$  при концентрации стержней а) 10%, б) 50%



а)

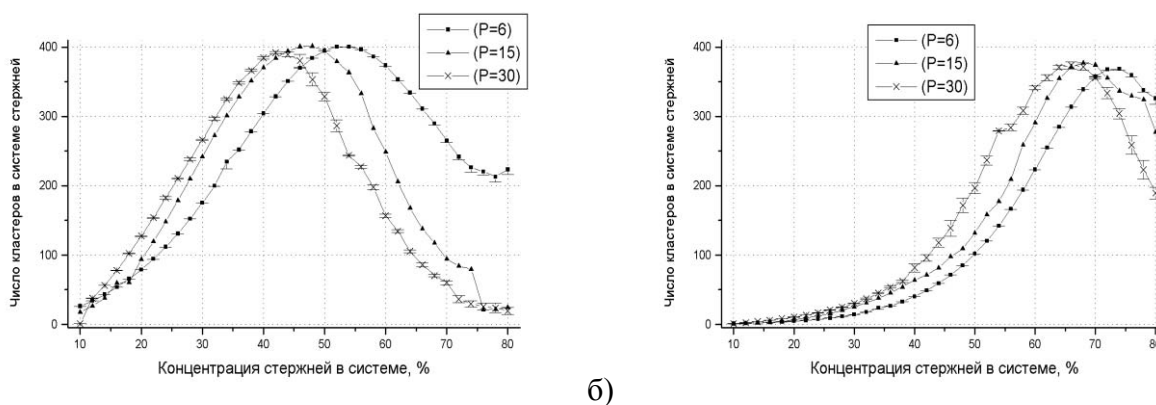


б)

Рисунок 3 – Осевое отношение  $P=30$  при концентрации стержней а) 10%, б) 50%

Предварительная проверка полноты набора ПКК приведена на рисунках 1, 2, 3. Здесь

показана зависимость доли стержней, входящих в кластеры любого размера по всей системе, от величин  $\gamma$  и  $\beta$ . Как видно из представленных графиков, кластеры образуются при заведомо низкой концентрации 10% и при средней концентрации 50%. Доля вхождения стержней в кластеры имеет непрерывный и монотонный характер при увеличении абсолютных значений параметров ПКК, и это наблюдается для всех приведённых осевых отношений стержней, что можно считать хорошим соответствием двум первым требованиям к ПКК. Дополнительно хотелось бы остановиться на интерпретации значений параметров ПКК ( $\gamma = 1.2$  и  $\beta = 1.1$ ). В нашем случае при отсутствии энергетического взаимодействия между стержнями основное значение имеют только топологические (энтропийные) взаимодействия, называемые в работах [3-5, 8] «потенциал истощения» (depletion interaction), которые по своей сути являются непрерывными (при отсутствии непосредственного контакта между стержнями). Поэтому, хотя значения ПКК ( $\gamma > 1.0$  и  $\beta > 1.0$ ) и не являются «физическими» по данному нами [7] определению, но важную роль играет их непрерывность и гладкость в представленном диапазоне значений. (Поясним, что для больших значений ПКК их «непрерывность и гладкость» нами не проверялась.) Регулярной зависимости от осевого отношения стержней не наблюдается, хотя можно заметить, что при увеличении осевого отношения стержней незначительно возрастает число стержней, входящих в кластеры любого размера, при концентрации 50% [7].

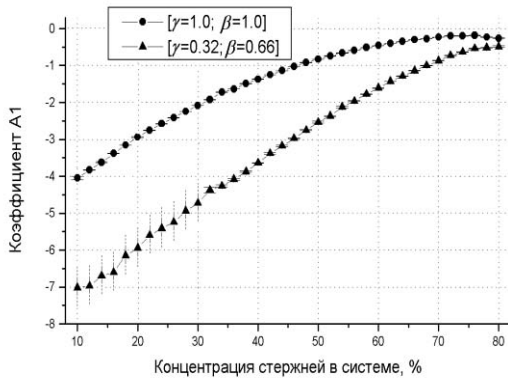


а) **Рисунок 4 – Число кластеров любых размеров в системе из 1600 стержней, в функциональной зависимости от концентрации и с различным осевым отношением  $P = 6, 15, 30$  для разных значений ПКК**  
 а)  $\gamma = 1$  и  $\beta = 1$ , б)  $\gamma = 0.32$  и  $\beta = 0.66$

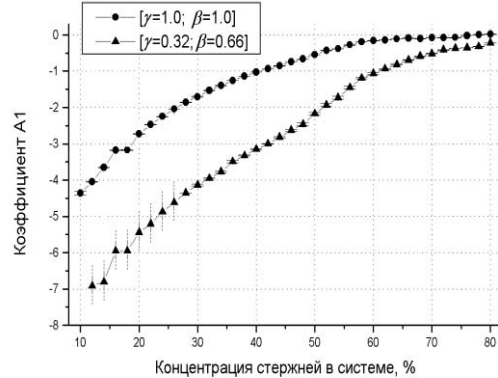
На рисунке 4а показана зависимость количества кластеров различного размера для разных осевых отношений стержней и ПКК  $\gamma = 1$  и  $\beta = 1$ . Из графиков видно, что максимальное число кластеров практически одинаково для всех осевых отношений стержней, но максимум распределения наступает по концентрации стержней тем раньше, чем больше осевое отношение стержней в системе. Примерно такая же функциональная зависимость наблюдается при ПКК  $\gamma = 0.32$  и  $\beta = 0.66$ , но только в другой области концентрации стержней системы, и максимальное число кластеров различного размера в системе практически остаётся тем же. Количество стержней, входящих в кластеры различного размера, по [7] монотонно увеличивается с концентрацией стержней в системе, а вот число кластеров после достижения максимума уменьшается с увеличением концентрации. Сильное уменьшение числа кластеров в системе (рис. 4а) наблюдается при высоких осевых отношениях стержней и ПКК  $\gamma = 1$  и  $\beta = 1$ , например, при  $P = 30$ , число кластеров при концентрации стержней 80% уменьшается примерно в двадцать раз по сравнению с максимумом. А для осевого отношения стержня  $P = 6$  число кластеров при концентрации стержней 80% уменьшается примерно в два раза, таким образом, для разных осевых отношений стержней отличие достигается 10-кратное. При малых значениях ПКК  $\gamma = 0.32$  и  $\beta = 0.66$  скорость падения числа кластеров



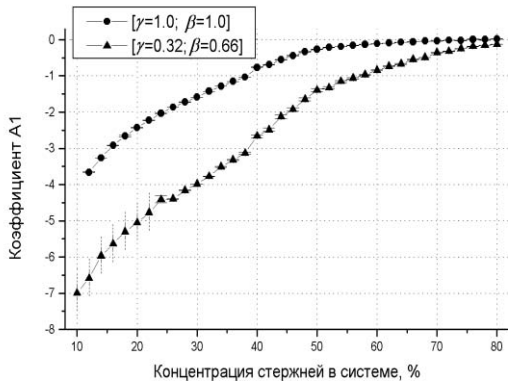
любого размера в системе также падает быстро, но концентрации стержней больше, чем 80%, нами не рассчитывались.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Зависимость коэффициента  $A_1$  (ур.2) в функции концентрации стержней в системе из 1600 стержней. С различными осевыми

$$\text{отношениями } P = \frac{L}{D}$$

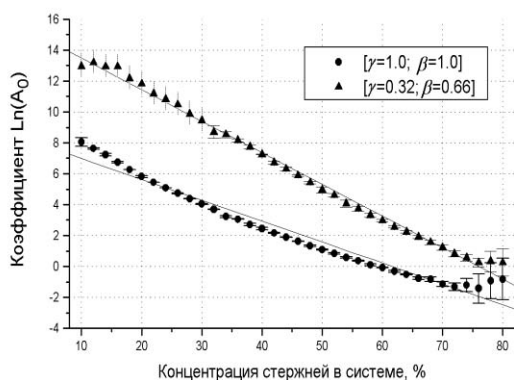
а) =6; б) =15; в) =30. На графике экспериментальные точки имеющие штриховые вертикальные линии найдены по двум точкам нормированного распределения  $P(n)$ , то есть в системе наблюдались только кластеры из двух и трёх стержней

Как видно из рисунка 5, область изменения коэффициента наклона прямых ([7] ур.2) практически одинакова для различных значений ПКК. При значении ПКК ( $\gamma = 1.0$  и  $\beta = 1.0$ ) значение коэффициента  $A_1$  при увеличении концентрации стержней имеет асимптоту  $A_1 = 0.0$ . Причём, чем больше осевое отношение стержней, тем быстрее коэффициент  $A_1$  выходит на асимптоту. Приближение степенного коэффициента  $A_1$  к асимптоте  $A_1 = 0.0$  означает, что вероятность появления кластеров с большим числом стержней возрастает, и тем больше, чем ближе коэффициент к нулю. Для стержней с большим осевым отношением это происходит раньше, по возрастанию концентрации, чем для меньших осевых отношений. При повышении концентрации стержней в системе появляются кластеры большего размера (рис. 4) и их становится больше (рис. 3), до достижения максимума. То есть в системе стержней при повышении концентрации стержней от низкой к средней одновременно проявляются два фактора, увеличивается доля больших кластеров и возрастают их размеры, тем самым существенно увеличивая области локального порядка. А вот структура или «морфология» образующихся локально упорядоченных областей зависит от сочетания расположенных рядом систем кластеров.

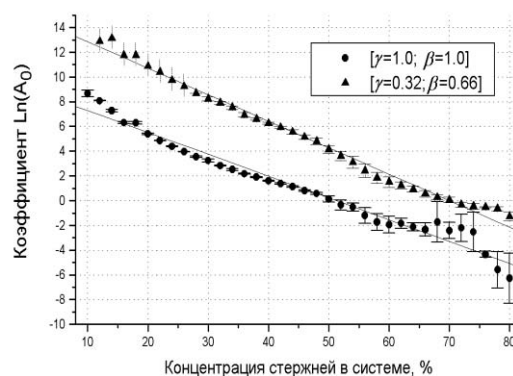
Аналогичный тип поведения наблюдается и для малых значений ПКК ( $\gamma = 0.32$  и  $\beta = 0.66$ ), за исключением того, что область изменения коэффициента  $A_1$  больше и выход на асимптоту  $A_1 = 0.0$  наблюдается при больших концентрациях стержней. Причём, на этих кривых можно наблюдать некий «излом» в монотонном повышении по концентрации, который можно объяснить тем, что кривые при больших значениях ПКК выходят на свою асимптоту. То есть система становится концентрированной для кластеров с такими значениями ПКК, и дальнейшее повышение концентрации системы стержней будет происходить за счёт формирования более плотных и регулярных кластеров. А это означает большую вероятность

появления более «правильных» морфологических структур в системе с увеличением концентрации стержней. И наиболее вероятным будет «сметическая» или «столбчатая» морфология упорядоченных областей. Из рисунков 3б и 4 можно сделать заключение, что для области концентрации больше, чем область насыщения для малых значений ПКК, наша система стержней становится «эффективно малой» и мы можем получать для неё только полуколичественные численные данные, которые будут характеризоваться большими численными ошибками.

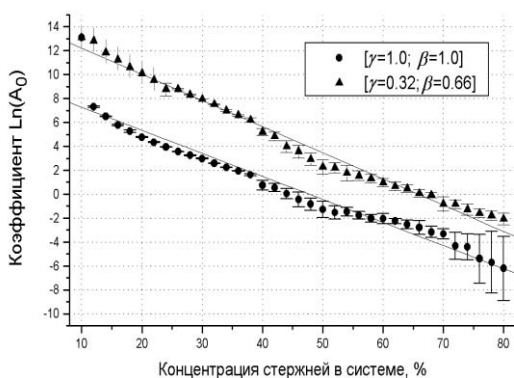
Интересно, если провести экстраполяцию по осевому отношению стержней  $P \rightarrow \infty$  для определения концентрации «насыщения» для ПКК ( $\gamma = 1.0$  и  $\beta = 1.0$ ) рис. 4 и взять следующие значения:  $P = 6$  – излом 76%,  $P = 15$  – 58%,  $P = 30$  – 50%. То при экстраполяции на большие осевые отношения стержней «выход на асимптоту коэффициента  $A_1$ » системы стержней произойдёт уже при  $(44 \pm 3)\%$ . Данное значение совпадает с [9], и это обнаружено в [6], как область структурного перехода по концентрации и, видимо, объясняется малыми размерами моделируемой системы.



а)



б)



в)

**Рисунок 6 – Зависимость коэффициента  $A_0$  (ур.2) в функции концентрации стержней в системе из 1600 стержней. С различными осевыми**

$$\text{отношениями } P = \frac{L}{D}$$

а) = 6; б) = 15; в) = 30. На графике экспериментальные точки, имеющие штриховые вертикальные линии, найдены по двум точкам нормированного распределения  $P(n)$ , то есть в системе наблюдались только кластеры из двух и трёх стержней

Поведение коэффициента  $Ln(A_0)$  ([7] ур.2) представлено на рисунке 6 и показывает одинаковую функциональную зависимость по концентрации как для больших значений ПКК, так и для малых. В пределах среднеквадратичных ошибок поведение коэффициента  $Ln(A_0)$  довольно хорошо описывается линейной зависимостью по концентрации. Причём, для осевых отношений стержней ( $P = 15, 30$ ) области определения коэффициента  $A_0$  практически совпадают, и есть некоторое различие для стержней с осевым отношением ( $P = 6$ ). Данное поведение означает, что форма кластерного распределения в системе стержней существенно (экспоненциально) зависит от концентрации стержней в системе и при больших концентрациях стремится, видимо, к равномерному (плоскому) распределению, вероятность кластеров с большим числом стержней существенно увеличивается. Интересно отметить и тот факт,

что рост среднеквадратичной ошибки коэффициента  $Ln(A_0)$  совпадает с областями «насыщения и излома» коэффициентов  $A_1$  для больших и малых значений ПКК по концентрации стержней.

В большом числе работ [8, 10] по определению фазовых портретов системы стержней в зависимости от осевых отношений и концентрации стержней приводятся очень разнообразное и сложное поведение фаз стержней (нематические, смектические и др.).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые численные эксперименты показали, что в системе 2D-стержней распределение кластеров различной степени плотности и упорядоченности, в среднем непрерывно и монотонно зависит от концентрации стержней в системе. И если при низкой концентрации стержней в системе число кластеров с большими значениями ПКК преобладает, то в области средней и высокой концентрации становится больше кластеров с меньшими значениями ПКК. Таким образом, в системе стержней в области низких концентраций стержней образуются преимущественно рыхлые и неправильной формы кластеры, которые с повышением концентрации заменяются более плотными и регулярными кластерами. А это означает, что с повышением концентрации возрастает вероятность появления более «правильных» морфологических структур смектического и столбчатого типа, причём, их распределение и размеры подчиняются монотонным статистическим закономерностям. Дополнительно, при больших осевых отношениях стержня ( $P \geq 30$  и  $N_{\text{стержней}} \approx 1600$ ), система стержней становится «эффективно малой» выше средних концентрациях ( $\rho \geq 50\%$ ) и получаемые численные данные будут характеризоваться большими ошибками.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау, Л.Д. О теории фазовых переходов. II [Текст] / Л.Д. Ландау // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1937, – Т. 7., – №3, – с.627
2. Stanley, H. E. Phase Transitions and Critical Phenomena [Текст] / H. E. Stanley // Oxford University Press: New York, – 1971
3. Varga, S. Nematic and smectic ordering in a system of two-dimensional hard zigzag particles [Текст] / S. Varga, P. Gurin, J.C. Armas-Perez, J. Quintana-H // J. Chem. Phys. 131, 184901 (2009)
4. Chen Z. Y. Continuous isotropic-nematic transition of partially flexible polymers in two dimensions [Текст] / Z. Y. Chen // Phys. Rev. Lett. 71, 93 (1993).
5. Schlacke H. Orientational Transitions of Two-Dimensional Hard-Rod Fluids. [Текст] / H. Schlacke, H.-J. Mogel, P. Schiller // Mol. Phys. 93, 777 (1998).
6. Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard-rod system: Structural transitions and clusters [Текст] / I.F. Shadrin, M.R. Sharafutdinov, A.M. Elyashevich // J. Chemical information and computer sciences, 1994, V34, N2, 335-338p.
7. Шадрин, И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры [Текст] / Шадрин И.Ф. // Известия ОрелГТУ, 2012г, №3, С.3-9.
8. Galanis J. Depletion forces drive polymer-like self-assembly in vibrofluidized granular materials [Текст] / Galanis J., Nossal R., Harries D. // J. the Royal Society of Chemistry 2010, Soft Matter, 2010, 6, p.1026-1034
9. Меркурьева, А.А. Ориентационное упорядочение в двумерных атермических растворах / А.А. Меркурьева, Т.М. Бириштейн [Текст] // Высокомолекулярные соединения А33.- 1991.- Т33.- №1.- С.141—145.
10. Bates M.A. Phase behavior of two-dimensional hard rod fluids [Текст] / Bates M.A., Frenkel D. // J. of Chemical Physics 2000, V.112, N.22, p.10034-10041.

#### Шадрин Иван Фёдорович

«Госунiversитет - УНПК», г.Орел  
канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика»  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: Ivshadr@mail.ru

I.F. SHADRIN

### HARD RODS ON A TWO-DIMENSIONAL SURFACE. CLUSTERS II

*Computer simulation by a Monte-Carlo method is used for learning of local frame in system of the firm rods which are on plane (2D) surfaces. Some performances of the kinematic and gel-forming device cluster consisting of bunch of rods, culled on certain measure were in-process studied. Fields of a legitimate value of measure of clustering and some performances of allocation of clusters were spotted.*

**Keywords:** rigid rods, 2D-surface, cluster, structure formation.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Landau, L.D. O teorii fazovyh perehodov. II [Tekst] / L.D. Landau // Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoj fiziki. – 1937, – T. 7., – №3, – s.627
2. Stanley, H. E. Phase Transitions and Critical Phenomena [Tekst] / H. E. Stanley // Oxford University Press: New York, – 1971
3. Varga, S. Nematic and smectic ordering in a system of two-dimensional hard zigzag particles [Tekst] / S. Varga, P. Gurin, J.C. Armas-Perez, J. Quintana-H // J. Chem. Phys. 131, 184901 (2009)
4. Chen Z. Y. Continuous isotropic-nematic transition of partially flexible polymers in two dimensions [Tekst] / Z. Y. Chen // Phys. Rev. Lett. 71, 93 (1993).
5. Schlacken H. Orientational Transitions of Two-Dimensional Hard-Rod Fluids. [Tekst] / H. Schlacken, H.-J. Mogel, P. Schiller // Mol. Phys. 93, 777 (1998).
6. Shadrin, I.F. Computer simulation of a hard-rod system: Structural transitions and clusters [Tekst] / I.F. Shadrin, M.R. Sharafutdinov, A.M. Elyashevich // J.Chemical information and computer sciences, 1994, V34, N2, 335-338p.
7. Shadrin, I.F. Zhjostkie sterzhni na dvumernoj poverhnosti. Klastery [Tekst] / Shadrin I.F. // Iz-vestija OrelGTU, 2012g, №3, S.3-9.
8. Galanis J. Depletion forces drive polymer-like self-assembly in vibrofluidized granular materials [Tekst] / Galanis J., Nossal R., Harries D. // J. the Royal Society of Chemistry 2010, Soft Matter, 2010, 6, p.1026-1034
9. Merkur'eva, A.A. Orientacionnoe uporjadochenie v dvumernyh atermicheskikh rastvorah / A.A. Mer-kur'eva, T.M. Birshtejn [Tekst] // Vysokomolekuljarnye soedinenija A33.- 1991.- T33.- №1.- C.141—145.
10. Bates M.A. Phase behavior of two-dimensional hard rod fluids [Tekst] / Bates M.A., Frenkel D. // J. of Chemical Physics 2000, V.112, N.22, p.10034-10041.

#### **Shadrin Ivan Feodorovich**

State University ESPC

Candidate of physico-mathematical sciences, associated professor, chair “Physics”

Orel, Naugorskoe shosse, 29

E-mail: Ivshar@mail.ru

В.И. КОЛЧУНОВ, Е.В. БРУМА

## РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ МАЛОМОБИЛЬНЫХ ГРУПП НАСЕЛЕНИЯ

*Предложена методика установления корреляционных связей между количеством маломобильных групп населения с ограниченными возможностями и рядом факторов эколого-социо-экономического характера. Расчеты проводились с использованием статистических данных Федеральной службы государственной статистики за 2000 – 2010 годы.*

**Ключевые слова:** маломобильная группа населения, доступная среда жизнедеятельности, выбросы в атмосферу, поле корреляции, регрессионная модель, уравнение регрессии, прогнозирование.

Особенностью демографических процессов в России за последние 30 лет является сокращение численности населения и снижение качества человеческого ресурса за счет роста маломобильных групп населения. По различным статистическим данным, в настоящее время, численность населения страны составляет около 143 миллионов человек, из них маломобильные группы населения (лица с ограниченными возможностями, пожилые люди, беременные женщины, люди с детскими колясками, дети и т.д.) составляют порядка 25-30 % [1], то есть численность маломобильных групп населения такова, что их можно считать особой статистически значимой социальной группой, которая так же, как все население, имеет право на доступность и реализуемость жизненных потребностей, включая жилье, транспорт, занятость, образование, лечение, культуру. Механизмом, обеспечивающим удовлетворение многообразных потребностей, служит город с его функциями, как сложная многоуровневая социально-экономическая территориальная система, в пределах которой протекают многочисленные взаимосвязанные процессы внешнего и внутреннего обеспечения жизнедеятельности населения [3].

В последние два десятилетия в стране была развернута работа по формированию доступной среды жизнедеятельности для маломобильных групп населения, по адаптации среды обитания человека для их нужд. Начиная с 2000 г. в систему нормативных документов по строительству введен специальный комплекс №35 «Обеспечение доступной среды жизнедеятельности для инвалидов и других маломобильных групп населения» [2].

В исследованиях последних лет, посвященных проблемам маломобильных групп населения, обсуждаются факторы, препятствующие их независимой жизни – физические барьеры и отношение к ним здоровых людей [4]; предлагаются методики комплексной оценки городской среды на предмет ее соответствия потребностям маломобильных групп населения [1].

С целью оценки влияния ряда эколого-социо-экономических факторов на численность маломобильных групп населения в России в настоящей работе предлагается методика анализа динамики их численности, как функции факторов, потенциально воздействующих на здоровье населения, а именно:

- объема выбросов в атмосферу –  $z_1$  млн.тонн;
- объема сброса сточных вод –  $z_2$  млрд.м<sup>3</sup>;
- объема инвестиций в здравоохранение –  $z_3$  млн.руб.;
- количества врачей (по специальностям) –  $z_4$  тыс.чел.;
- числа больничных коек (по виду заболевания) –  $z_5$  тыс.шт.;
- объема лесовосстановления –  $z_6$  тыс.га;
- количества безработных –  $z_7$  тыс.чел.;
- среднедушевого дохода –  $z_8$  руб.;
- прироста населения –  $z_9$  тыс.чел.

На основании статистических данных Федеральной службы государственной статистики [5] на рисунке 1 и рисунке 2 приведены поля корреляции объясняющих (рис. 1) и объясняемых (рис. 2) факторов. На каждом графике показаны средствами ППП Excel линии

тренда и полиномиальные функции  $z_i = z_i(x)$  ( $i = 1, 2, \dots, 9$ ) и  $Y_j = Y_j(x)$  ( $j = 1, 2, \dots, 13$ ), где  $x$  - номер года, если 2000 год считать первым ( $x = 1$ ), причем  $x$  изменяется от 1 до 11.

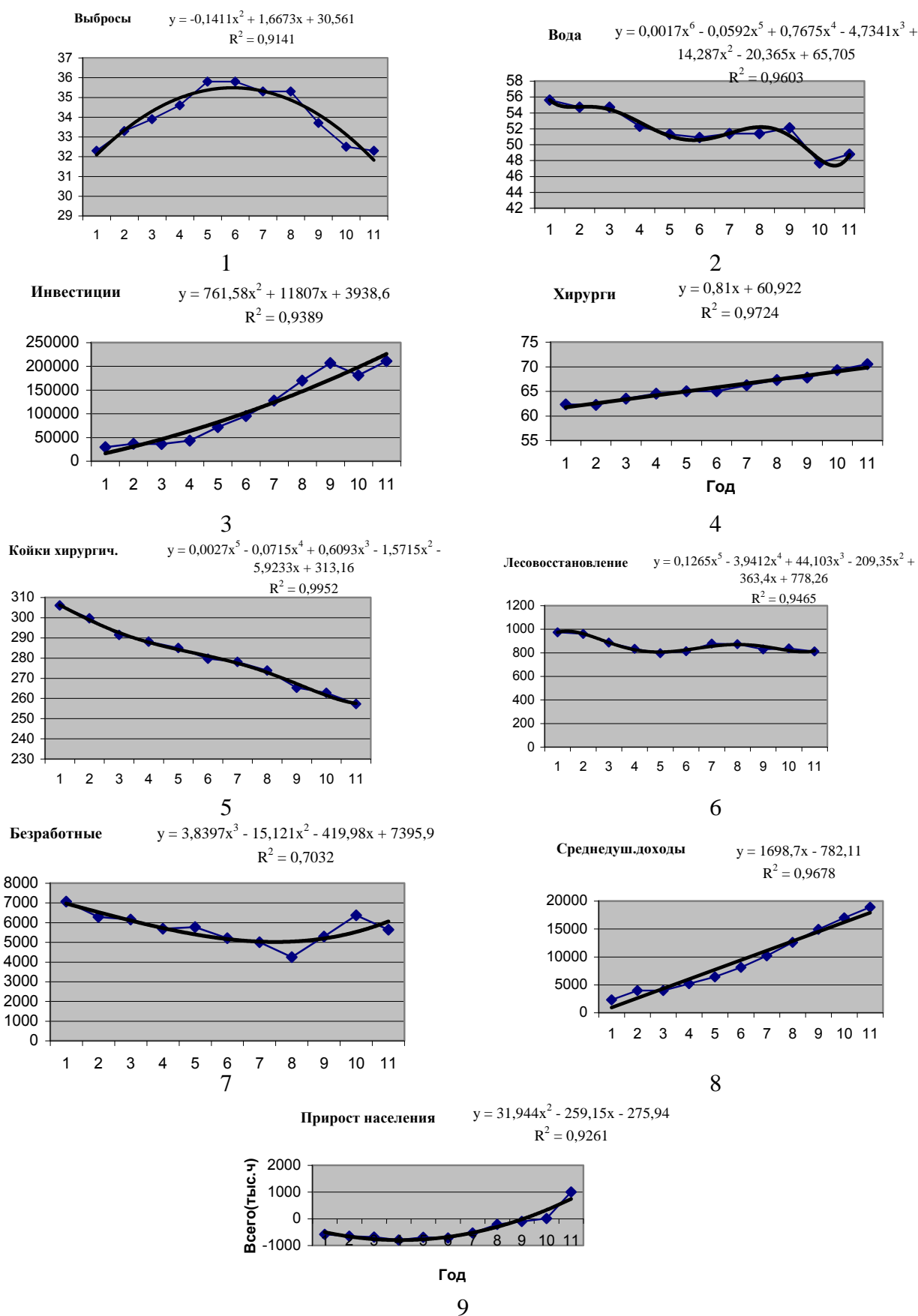
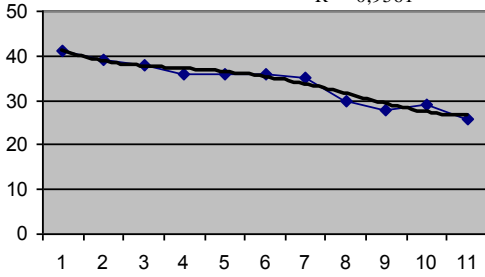


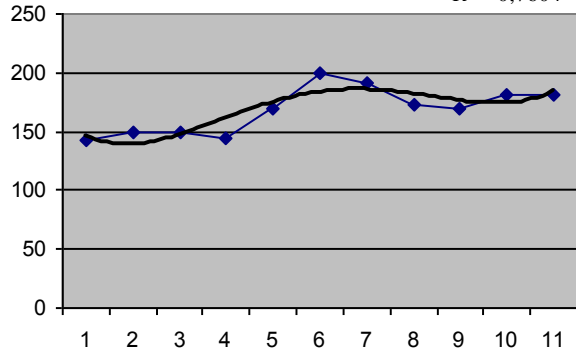
Рисунок 1 – Поля корреляции объясняющих факторов по данным Федеральной службы государственной статистики

**Туберкулез**  $y = 0,0093x^4 - 0,2273x^3 + 1,7879x^2 - 6,3392x + 45,909$   
 $R^2 = 0,9561$



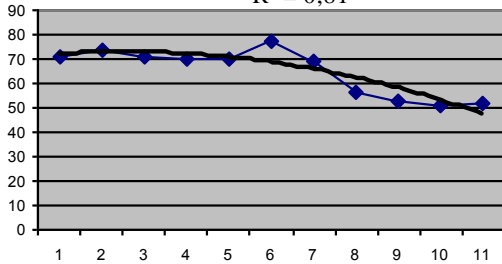
1

**Злокач.новообразования**  $y = 0,1064x^4 - 2,621x^3 + 20,819x^2 - 53,181x + 181,3$   
 $R^2 = 0,7604$



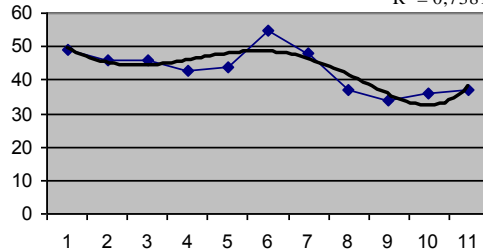
2

**Травмы**  $y = -0,3566x^2 + 1,8252x + 70,364$   
 $R^2 = 0,81$



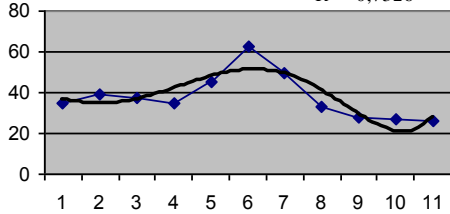
3

**Психич.расстройства**  $y = 0,0045x^5 - 0,0874x^4 + 0,3494x^3 + 1,5385x^2 - 10,357x + 58,091$   
 $R^2 = 0,7381$



4

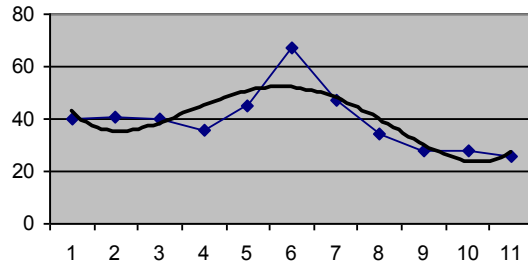
**Эндокрин.с-ма**  $y = 0,0106x^5 - 0,2386x^4 + 1,58x^3 - 2,4612x^2 - 2,442x + 40,212$   
 $R^2 = 0,7326$



Год

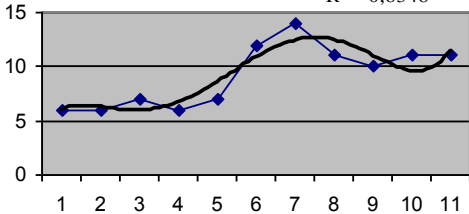
5

**Болезни глаза.**  $y = 0,0798x^4 - 1,9277x^3 + 14,78x^2 - 39,394x + 69$   
 $R^2 = 0,6677$



6

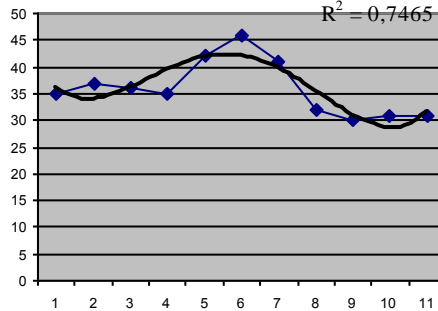
**Болезни уха**  $y = 0,0048x^5 - 0,1334x^4 + 1,2889x^3 - 5,1119x^2 + 8,4003x + 1,5758$   
 $R^2 = 0,8348$



год

7

**Нервная с-ма**  $y = 0,0388x^4 - 0,9046x^3 + 6,6209x^2 - 16,314x + 46,727$   
 $R^2 = 0,7465$



8

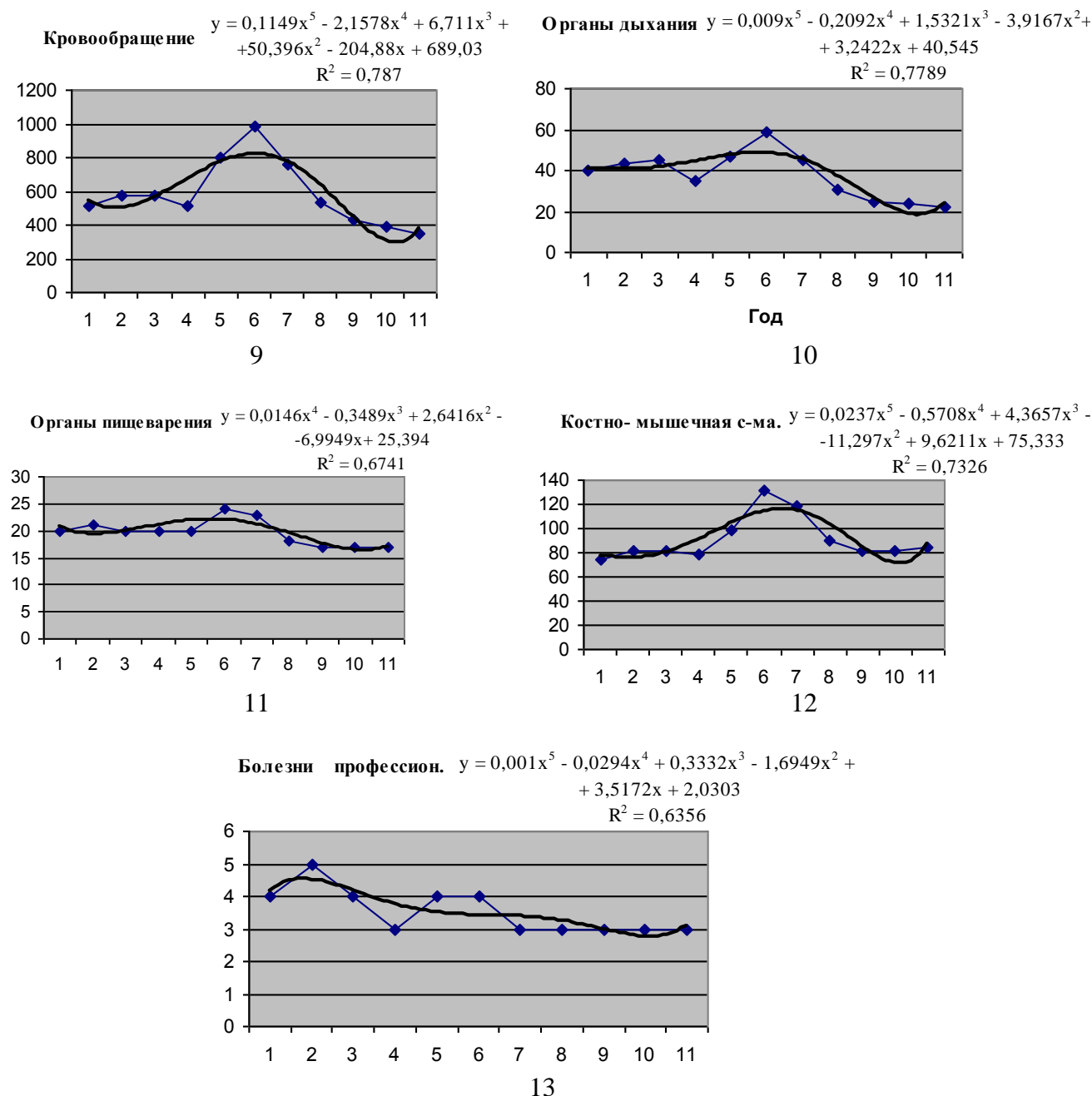


Рисунок 2 – Поля корреляции объясняемых факторов по данным Федеральной службы государственной статистики

Приведенные на графиках коэффициенты детерминации  $R^2$  свидетельствуют о том, что изменения рассматриваемых переменных за исследуемый промежуток времени (2000-2010 гг.) практически точно описываются соответствующими многочленами.

Учитывая, что тренд является интегральной характеристикой процесса динамики численности маломобильных групп населения (по категориям), дополним его описание корреляционно-регрессионным анализом. Для этого установим связь между зависимой (объясняемой) переменной  $Y_j(x)$  и независимыми (объясняющими) переменными  $z_i(x)$  в виде функции множественной регрессии

$$\hat{Y}_j(x) = f(z_1, z_2, \dots, z_9), (j = 1, 2, \dots, 13) \quad (1)$$

Требование надежности регрессионной модели и полученных на ее основе статистических оценок ограничивает число объясняющих факторов “i”, связывая их число с числом уровней временного ряда  $n = 11$  неравенством  $i \leq \frac{n}{3}$ , т.е.  $i \leq 3$



Для определения наиболее значимых факторов, из выбранных для построения модели, проведем корреляционный анализ.

В таблице 1 приведены коэффициенты парной корреляции для маломобильной группы населения категории «Последствия травм».

Таблица 1 – Корреляционная таблица

	Y <sub>3</sub>	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	z <sub>3</sub>	z <sub>4</sub>	z <sub>5</sub>	z <sub>6</sub>	z <sub>7</sub>	z <sub>8</sub>	z <sub>9</sub>
маломобильная группа населения Y <sub>3</sub>	1									
Выбросы в атм z <sub>1</sub>	0,4244	1								
Объем сброса сточ.вод z <sub>2</sub>	0,636	-0,03	1							
Инвестиции в здрав-е z <sub>3</sub>	-0,885	-0,15	-0,8	1						
Кол-во хирург. z <sub>4</sub>	-0,835	-0,12	-0,9	0,9426	1					
Число бол.коек z <sub>5</sub>	0,8172	0,084	0,9	-0,945	-1	1				
Лесовосст-е z <sub>6</sub>	0,3504	-0,39	0,8	-0,519	-0,7	0,7	1			
Безработные z <sub>7</sub>	0,2296	-0,68	0,4	-0,503	-0,4	0,5	0,5	1		
Доходы (среднедуш) z <sub>8</sub>	-0,891	-0,21	-0,9	0,9767	1	-1	-0,6	0	1	
Прирост населения z <sub>9</sub>	-0,817	-0,53	-0,6	0,8038	0,8	-0,8	-0,3	-0	0,8	1

Аналогичные расчеты проведены для остальных двенадцати категорий маломобильных групп населения

Принимаем, что в регрессионную модель (1) будут включены два фактора, связь которых с зависимой переменной наиболее сильная ( $r_{Y_j z_i} \geq 0,7; j = 1, 2 \dots 13$ ).

Анализ матрицы коэффициентов парной корреляции из таблицы 1 показывает, что в модели следует оставить переменные z<sub>1</sub>(выбросы в атмосферу) и z<sub>4</sub>(количество врачей-хирургов), поскольку их связь с результирующим признаком Y<sub>3</sub>(численность маломобильной группы населения категории «Последствие травм») достаточно высокая и парная корреляция между ними практически отсутствует ( $r_{z_1 z_4} = -0,12$ ). Остальные факторы исключаем из модели по причине их слабой связи с результирующим признаком и сильной корреляцией с двумя выбранными для дальнейшего анализа признаками. В итоге одна из тринадцати регрессионных моделей приобретает вид

$$\hat{Y}_3 = a_{13} + a_{23}z_4 + a_{33}z_1 \quad (2)$$

где a<sub>13</sub>, a<sub>23</sub>, a<sub>33</sub> – параметры двухфакторной регрессии, подлежащие оценке.

В таблице 2 приведены пары (затенение) объясняющих факторов, включенных в двухфакторные регрессионные модели остальных двенадцати категорий маломобильных групп населения

$$\hat{Y}_j = a_{ij} + a_{2j}z_k + a_{3j}z_l \quad (3)$$

где k, l ∈ i – номера объясняющих факторов для данной категории маломобильной группы населения, j ≠ 3.

Данные таблицы 2 показывают, что основными признаками, сильно связанными с численностью маломобильных групп населения по различным категориям, являются выбросы в атмосферу z<sub>1</sub>, численность врачей z<sub>4</sub>, число больничных коек z<sub>5</sub>.

Оценку параметров a<sub>13</sub>, a<sub>23</sub>, a<sub>33</sub> двухфакторной регрессии – коэффициентов уравнения (2), проведем методом наименьших квадратов, используя данные, приведенные в таблице 3.

Таблица 2 – Два объясняющих фактора, выбранных для моделей (2), (3)

	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	Ж	
маломобильные группы населения по категориям	Выброс в атмосферу (млн.т)	Объем сброса сточн. вод. (млрд м <sup>3</sup> )	Инвестиции в здравоохран. (млн.руб)	Кол-во врачей (тыс.ч)	Кол-во бол. Кодек (тыс.шт)	Лесовосстановление (тыс.га)	Безработные (тыс.ч)	Доходы среднедуш (руб.)	Прирост населения (тыс.ч)	
Туберкулез										E>G
Злокачествен. новообразования										I>B
Болезни эндокринной с-мы, расстройства питания и нарушения обмена вещ.										B>E
Психические расстройства, расстройства поведения										I>B
Болезни нервной с-мы										B>I
Болезни глаза и его придаточного аппарата										B>F
Болезни уха и сосцевидного отростка										F.>B
Болезни системы кровообращения										B>C
Болезни органов дыхания										B>G
Болезни органов пищеварения										B>E
Болезни костно-мышечн с-мы и соединит ткани										B>H
Последствие травм										E>B
Профессионал. заболевания										F>H

Таблица 3 – Статистические данные объясняемого и объясняющих факторов

Y	z	.z <sub>4</sub>	z <sub>1</sub>
71	1	62,3	32,3
74	1	62,2	33,3
71	1	63,5	33,9
70	1	64,5	34,6
70	1	65	35,8
77	1	65	35,8
69	1	66,2	35,3
56	1	67,3	35,3
53	1	67,8	33,7
51	1	69,3	32,5
52	1	70,5	32,3

Непосредственное вычисление вектора оценок  $\bar{a} = (a_{13} \ a_{23} \ a_{33})^T$  параметров регрессии (2) производим по формуле

$$\bar{a} = (Z^T Z)^{-1} Z^T Y \quad (4)$$

где  $Z$  – матрица размерности  $11 \times 3$ , содержащая вектор–столбцы  $z, z_4, z_1$  (в указанном порядке),  $Y$  – вектор – столбец значений объясняемого фактора. В результате получаем вектор  $\bar{a}$  со следующими координатами

$$\bar{a} = (191,43 \quad -2,97 \quad 2,02)^T.$$

Таким образом, уравнение регрессии (2) принимает вид

$$\hat{Y}_3 = 191,43 - 2,97 z_4 + 2,02 z_1 \quad (5)$$

Расчетные значения  $\hat{Y}_3$  определяются путем последовательной подстановки в эту модель значений факторов, взятых для каждого уровня временных рядов  $z_4$  и  $z_1$ .

Проверка адекватности трендовых моделей осуществляется с использованием ряда статистических критериев.

### 1. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ И ПРОВЕРКА ЕГО ЗНАЧИМОСТИ

Проверка статистического качества модели предполагает:

- проверку статистической значимости каждого коэффициента уравнения регрессии (5);
- проверку общего качества уравнения регрессии;
- проверку свойств данных, использование которых предполагалось при оценивании уравнения.

Необходимые для проверки статистического качества модели данные содержатся в таблице 4, полученной в результате регрессионного анализа средствами ППП *Excel*.

Выявляем значимость отдельных коэффициентов уравнения регрессии по  $t$ -статистике Стьюдента путем проверки нулевой гипотезы о равенстве нулю каждого параметра  $a_{23}$  и  $a_{33}$

$$t_{a_2} = \frac{a_2}{Sa_1} = \frac{2,97156}{0,500904} = 5,93, t_{a_3} = \frac{a_3}{Sa_2} = \frac{2,023551}{0,873} = 2,32,$$

где  $Sa_1$  – стандартное (среднее квадратическое) отклонение коэффициента уравнения регрессии  $a_k$  ( $k=1, 2$ ).

Табличное значение  $t$ -критерия Стьюдента равно 2,3 при уровне значимости 0,05 и степенях свободы  $(n - i - 1) = (11 - 2 - 1) = 8$ , где  $n$  – количество уровней временного ряда,  $i$  – число объясняющих факторов. Так как

$$t_{a_{23}} = 5,93 > t_{табл} = 2,3 ; t_{a_{33}} = 2,32 > t_{табл} = 2,3,$$

то отвергаем гипотезу о незначимости коэффициентов уравнения регрессии  $a_{23}$  и  $a_{33}$ , т.е. ко-

эффиценты уравнения регрессии считаем значимыми.

Для анализа общего качества оцененной множественной линейной регрессии (5) используем коэффициент детерминации  $R^2 = 0,848$ , который показывает, что около 85% вариации зависимой переменной  $Y_3$  в построенной модели обусловлено влиянием факторов  $z_4$  и  $z_1$ .

Таблица 4 — Результаты регрессионного анализа, проведенного с помощью ППП Excel

Регрессионная статистика	
Множеств	0,920946113
R-квadrat	0,848141743
Нормиров	0,810177179
Стандарт	4,253044699
Наблюдения	11

Дисперсионный анализ		df	SS	MS	F	значимость F
Регрессия		2	808,2019772	404,1009886	22,34035236	0,00053181
Остаток		8	144,7071137	18,08838921		
Итого		10	952,9090909			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересеч	191,4359627	51,15261048	3,742447569	0,00568539	73,4778315	309,3940939	73,47783152	309,3940939
Кол-во	-2,97156218	0,500903531	-5,932404135	0,000348796	-4,1266478	-1,816476567	-4,126647794	-1,816476567
Выбросы	2,023550704	0,872	2,032258636	0,076588386	-0,2725725	4,319673945	-0,272572538	4,319673945

Проверку значимости уравнения регрессии проведем на основе  $F$ -критерия Фишера

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2 / i}{(1 - R^2) / (n - i - 1)} = \frac{0,848 \cdot 8}{(1 - 0,848) 2} = 22,3.$$

Табличное значение  $F$ -критерия при уровне значимости 0,05, степенями свободы  $\nu_1 = i = 2$  и  $\nu_2 = (n - i - 1) = 8$  составляет  $F_{\text{табл}} = 4,459$ . Поскольку

$$F_{\text{факт}} = 22,3 > F_{\text{табл}} = 4,459$$

Считаем, что уравнение регрессии значимо (адекватно).

## 2. ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА МОДЕЛИ

Проведем далее анализ остатков, который позволит получить представление, насколько хорошо подобрана сама модель и насколько правильно выбран метод оценки коэффициентов. Согласно общим предположениям регрессионного анализа, остатки должны вести себя как независимые, одинаково распределенные случайные величины. В классических методах регрессионного анализа предполагается нормальный закон распределения остатков.

Исследование на наличие автокорреляции остатков проведем с помощью  $d$ -критерия Дарбина-Уотсона. Величина  $d$  изменяется в пределах:

$$0 \leq d \leq 4.$$

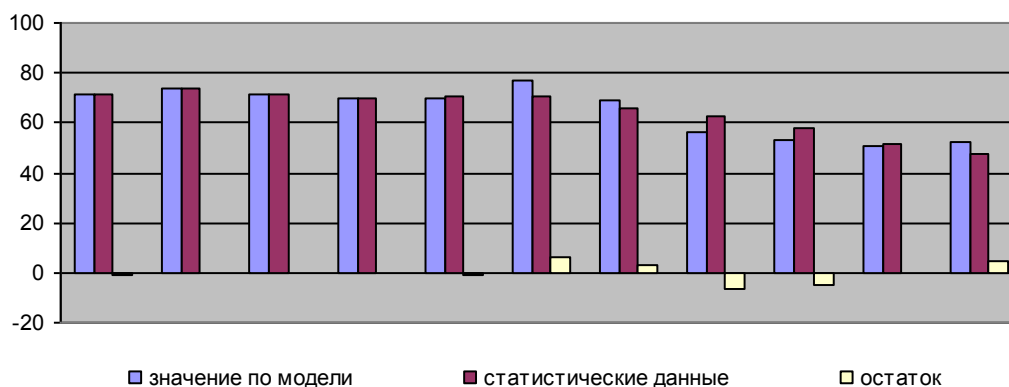
Алгоритм выявления автокорреляции остатков на основе критерия Дарбина-Уотсона следующий: выдвигается гипотеза  $H_0$  об отсутствии автокорреляции остатков. Далее по

специальным таблицам определяются критические значения  $d_L = 0,66$  и  $d_U = 1,66$  критерия Дарбина-Уотсона для заданного числа уровней временного ряда  $n = 11$ , числа независимых переменных модели  $i = 2$  и уровня значимости  $\gamma = 0,05$ . По этим значениям числовой промежуток  $[0;4]$  разбивают на пять отрезков. Вопрос о принятии или отклонении каждой из гипотез с вероятностью  $(1 - \gamma)$  рассматривается в соответствии с рис.4. Если фактическое значение критерия Дарбина-Уотсона попадает в зону неопределенности, то нельзя сделать окончательный вывод об автокорреляции остатков по этому критерию.

В таблице 5 и на рисунке 3 представлены вычисленные по модели (2) значения объясняемой переменной  $\hat{Y}$  и значения остаточной компоненты  $\varepsilon(t)$ .

Таблица 5 – Сравнение фактических данных объясняемого признака со значениями, полученными по модели

маломобильная группа населения «Последствия травмы» (тыс.ч) $Y$	Предсказ. $\hat{Y}$	Остаток $\varepsilon(t)$	$\varepsilon^2(t)$	$(\varepsilon(t)-\varepsilon^{(t-1)})^2$	$\varepsilon(t)\varepsilon^{(t-1)}$	$(\hat{Y}-\hat{Y}_{cp})^2$
1	2	3	4	5	6	7
71	71,66833	-0,66832662	0,446660466			45,687267
74	73,98903	0,010966462	0,000120263	0,46143909	-0,00733	5474,3771
71	71,34013	-0,34013313	0,115690543	0,12327092	-0,00373	5089,4146
70	69,78506	0,214943562	0,046200735	0,30811013	-0,07311	4869,9541
70	70,72754	-0,72753619	0,529308911	0,88826809	-0,15638	5002,3844
77	70,72754	6,272463808	39,34380222	49	-4,56344	5002,3844
69	66,14989	2,850113776	8,123148534	11,7124797	17,87724	4375,8074
56	62,88117	-6,88116783	47,35047065	94,6978416	-19,6121	3954,0413
53	58,15771	-5,15770561	26,60192717	2,97032201	35,49104	3382,3187
51	51,2721	-0,2721015	0,074039224	23,8691276	1,403419	2628,8284
52	47,30152	4,698483261	22,07574495	24,7067128	-1,27846	2237,4335
$\Sigma$ 714	714,00	0,00	144,71	208,74	29,08	42062,63



**Рисунок 3 – Сравнение расчетных и статистических данных**

Для определения величины d-критерия используем расчетную таблицу 5  
Имеем

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2} = \frac{208,74}{144,71} = 1,4425$$

Расчетное значение  $d$ -критерия Дарбина-Уотсона 1,4425 попало в зону неопределенности

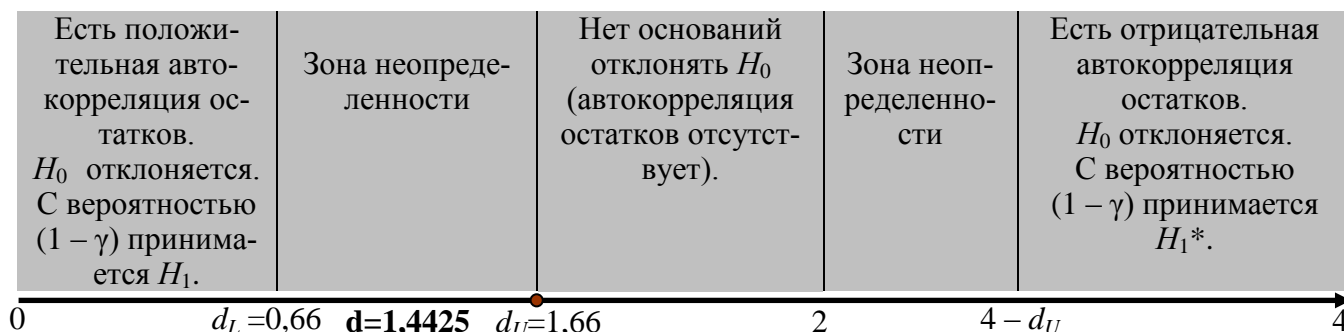


Рисунок 4 – Сравнение расчетного значения  $d$ -критерия Дарбина-Уотсона с критическими значениями  $d_L$  и  $d_U$

### 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РЕГРЕССИИ

Для построения прогноза результативного признака  $\hat{Y}$  необходимо определить прогнозные значения включенных в модель объясняющих факторов  $z_4$  и  $z_1$ .

В качестве аппроксимирующей функции для  $z_4$  выбран полином 1-ой степени (рис 1.4) (этой модели соответствует наибольшее значение коэффициента детерминации), по которому построен прогноз на два шага вперед, причем прогнозные значения на 11(2011 г.) и 12(2012 г.) периоды соответственно составляют:

$$z_4(12) = 0,81 \cdot 12 + 60,9 = 69,81,$$

$$z_4(13) = 0,81 \cdot 13 + 60,9 = 70,62$$

Для фактора  $z_1$  выбираем полином 2-ой степени (рис 1.1). Прогнозные значения на 2011 и 2012 гг. соответственно составляют:

$$z_1(12) = -0,14 \cdot 11^2 + 1,67 \cdot 12 + 30,56 = 31,96$$

$$z_1(13) = -0,14 \cdot 12^2 + 1,67 \cdot 13 + 30,56 = 30,44$$

Для получения прогнозных оценок переменной  $\hat{Y}$  «Численность маломобильной группы населения по травмам» по модели (5), подставим в нее найденные прогнозные значения факторов  $z_4$  и  $z_1$  и получим:

$$Y(12) = 191,44 - 2,97 \cdot 69,81 + 2,02 \cdot 31,96 = 48,66$$

$$Y(13) = 191,436 - 2,97 \cdot 70,62 + 2,02 \cdot 30,44 = 43,19$$

Таким образом, проделанный расчет динамики численности маломобильной группы населения по травмам показывает дальнейшее снижение ее численности в ближайшие два года.

Предложенная в работе методика установления корреляционных связей между численностью маломобильной группы населения по различным категориям и рядом факторов эколого-социо-экономического характера позволяет оценивать динамику развития численности данной группы населения и строить краткосрочные прогнозы, с учетом которых должны приниматься градостроительные решения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенова, С.А. Комплексная оценка городской среды с учетом потребностей маломобильных групп населения и инвалидов [Текст] / С.А. Семенова, А.А. Шрейбер // Строительство и реконструкция, 2011. – № 5(37). – С. 73-78.
2. Викторова, Л.А. Обеспечение безопасности и комфортности среды жизнедеятельности в строительных нормах [Текст] / Л.А. Викторова // Архитектура и строительство России, – декабрь 2011. – С.29-38.
3. Елохов, А.М. Город как объект управления [Текст] / А.М. Елохов // Вестник Пермского гос. Университета, 2011. – Выпуск 3(10). – С.78-85.
4. Набирушкина, Э.К. Доступность городской среды для инвалидов [Текст] / Э.К. Набирушкина // Социологические исследования, 2010. – № 9. – С.59-68.

5. Режим доступа: Федеральная служба государственной статистики  
[http://www.gks.ru/bgd/regl/b11\\_13\\_p/Main.htm](http://www.gks.ru/bgd/regl/b11_13_p/Main.htm)

**Колчунов Виталий Иванович**

«Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительные конструкции и материалы»,  
Тел.: +7 (4862) 73 43 67  
E-mail: skimkafedra@yandex.ru

**Брума Екатерина Владимировна**

Госуниверситет – УНПК, г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 953 628 46 84  
E-mail: mam4ikk@mail.ru

V.I. KOLCHUNOV, E.V. BRUMA

**REGRESSION MODEL OF DYNAMICS OF NUMBER OF LOW-MOBILE GROUPS OF THE POPULATION**

*The technique of establishing correlations between low populations with disabilities and a number of environmental factors, socio-economic considerations. Calculations were made using statistical data of federal service of State statistics for 2000-2010.*

**Keywords:** persons with disabilities, accessible environment, emissions, correlation, regression model, equation of regression, prediction.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Semenova, S.A. Kompleksnaja ocenka gorodskoj sredy s uchetom potrebnostej malomobil'nyh grupp naselenija i invalidov [Tekst] / S.A. Semenova, A.A. Shrejber // Stroitel'stvo i rekonstrukcija, 2011. – № 5(37). – С.73-78.
2. Viktorova, L.A. Obespechenie bezopasnosti i komfortnosti sredy zhiznedejatel'nosti v stroitel'-nyh normah [Tekst] / L.A. Viktorova // Arhitektura i stroitel'stvo Rossii, – dekabr' 2011. – С.29-38.
3. Elohov, A.M. Gorod kak ob#ekt upravlenija [Tekst] / A.M. Elohov // Vestnik Permskogo gos. Univer-siteta, 2011. – Vypusk 3(10). – С.78-85.
4. Nabirushkina, Je.K. Dostupnost' gorodskoj sredy dlja invalidov [Tekst] / Je.K. Nabirushkina // So-ciologicheskie issledovanija, 2010. – № 9. – С.59-68.
5. Rezhim dostupa: Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki  
[http://www.gks.ru/bgd/regl/b11\\_13\\_p/Main.htm](http://www.gks.ru/bgd/regl/b11_13_p/Main.htm)

**Kolchunov Vitaly Ivanovich**

State University – ESPC  
Doctor of technical sciences, professor, chair «Construction designs and materials»  
Tel.: +7 (4862) 73 43 67  
E-mail: skimkafedra@yandex.ru

**Bruma Ekaterina Vladimirovna**

State University – ESPC  
post-graduate student, chair «Construction designs and materials»  
Tel.: +7 953 628 46 84  
E-mail: mam4ikk@mail.ru

Г.В. МАЛИНИН

## СТРУКТУРНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕЗОМЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ И МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

*В настоящей статье представлены результаты теоретические исследования, развивающие методы структурно-аналитической мезомеханики, основанные на концепции многоуровневого (микро-, мезо- и макро ) пластического течения и обратимых мартенситных превращений. Впервые выведена система определяющих соотношений для описания трансляционно-ротационных мод деформаций, учитывающих взаимовлияние пластических деформаций и структурных фазовых превращений мартенситной природы для материалов с эффектом памяти формы.*

**Ключевые слова:** структурно-аналитическая мезомеханика, обратимые мартенситные превращения, сдвиговая пластическая деформация, трансляционно-ротационные моды деформации, определяющие соотношения, материалы с эффектом памяти формы, микро- мезо- и макромасштабные уровни.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что макропластическая деформация в материалах с эффектом памяти формы (ЭПФ) вносит значительные изменения в формирование разнообразных деформационных проявлений, расширяя диапазон применения материалов с ЭПФ, как интеллектуальных объектов.

В рамках структурно-аналитической мезомеханики в работах [1-5] были сформулированы модели для прогноза механического поведения материалов с мартенситным каналом деформационного массопереноса, которые позволили выполнить прогноз основных деформационных явлений в материалах, обладающих эффектами памяти формы. Однако в указанных моделях не учитывалось влияние процессов многоуровневой самоорганизации дислокационных потоков пластической деформации и фазовых превращений мартенситного типа на механические свойства. В данной работе устраняется указанный пробел. Используя методологию, изложенную в работах [5,6] сформулирована система интегро-дифференциальных определяющих соотношений для прогноза механического поведения материалов с ЭПФ, в которых учитывается взаимовлияние процессов пластической деформации и фазовых превращений мартенситного типа первого рода.

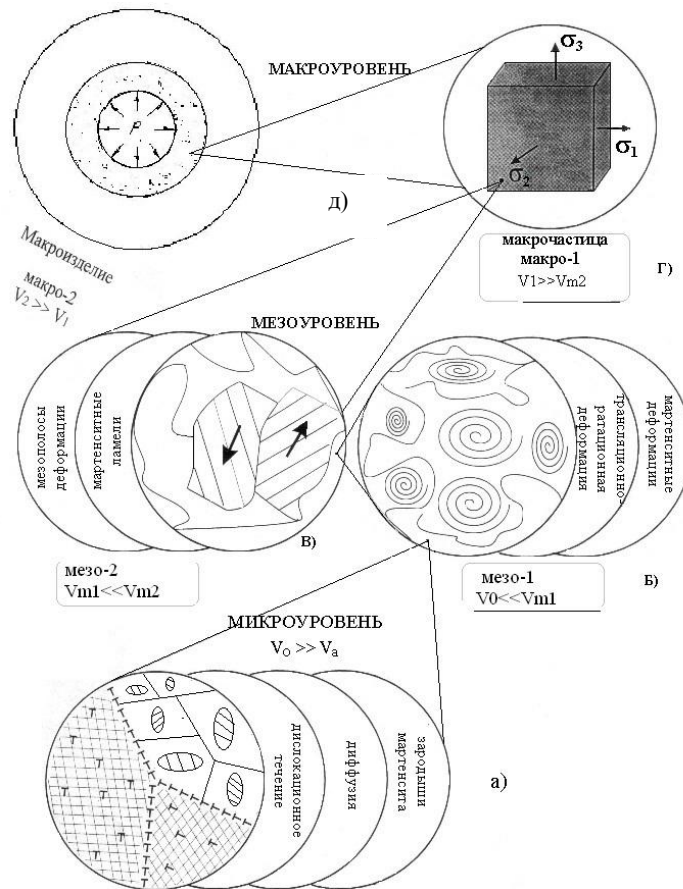
### 1. СЦЕНАРИЙ РАЗВИТИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И СТРУКТУРНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Деформацию материала с эффектом памяти формы, возникшую за счет инициирования обратимых мартенситных реакций и пластических сдвигов, можно представить как многоуровневый релаксационный процесс. Рассмотрим основные этапы зарождения и развития деформационного массопереноса при обратимых фазовых превращениях мартенситной природы. На рисунке 1 изображена схема масштабных и структурных уровней, принятая при построении модели.

Согласно данным физических исследований [1-3], вначале потеря сдвиговой устойчивости происходит на микроуровне в локальных областях кристалла, где возникают зародыши мартенситной фазы или дислокационные сдвиги. На структурных неоднородностях микроконцентраторы напряжений вызывают мартенситную трансформацию кристаллической решетки в определенных кристаллографических плоскостях и направлениях. Такое локальное структурное превращение проявляется как возникновение и развитие мартенситных зародышей в аустенитной матрице. Обозначенный этап изображен на рисунке 1а, где заштрихованными областями схематически показаны зародыши мартенсита. Так как влияние микрокон-



центраторов является близкодействующим, то возникающие дисторсии превращений с хорошим приближением можно характеризовать трансляционными модами деформации.



**Рисунок 1 – Схема масштабных и структурных уровней в деформируемом объекте из материалов с эффектом памяти формы**

*а – микроуровень, заштрихованные области означают зародыши мартенситных кристаллов, фрагменты, содержащие символ  $\perp$  характеризуют локализации дислокационных сдвигов; б – мезо-1, в – мезо-2, г – макро-1, д – макро-2*

Как отмечалось в работах [1-3,6], при инициировании пластической деформации весь объем кристаллической среды разбивается по характеру действия ориентированных структурных напряжений  $\rho_{ik}$  [2,3] на две подобласти, содержащие ориентированные напряжения противоположных «знаков». Появление в материале за счет пластической деформации внутренних напряжений с различной ориентацией по отношению к напряжениям от внешних нагрузок, значительно изменяет кинетику локальных мартенситных превращений, что необходимо учитывать при моделировании процесса деформации в средах, в которых инициируются как пластические сдвиги, так и деформации мартенситной природы.

В процессе деформации плотность образующихся мартенситных кристаллов возрастает, вовлекаются варианты мартенситных превращений не совпадающие с благоприятно ориентированными направлениями в поле напряжений, обусловленных траекториями нагружений в пространстве напряжений. Указанные обстоятельства вызывают необходимость самоорганизации мартенситных доменов в соответствии с заданными граничными условиями, т.е. с направлениями главных осей тензора деформаций в каждый момент процесса деформирования. Как следствие, возникают самоакомодированные группы мартенситных кристаллов, образующие диссипативные структуры в рамках исходной структуры материала (рис. 1,б). Такие диссипативные структуры способствуют появлению трансляционно-ротационных мод деформаций по схеме сдвиг +поворот и классифицируются как мезомасштабный уровень-1 [1, 4-6]. Аналогичная ситуация возникает в тех областях кристаллов, где происходят процессы самоорганизации дислокационных сдвигов, обеспечивающие пластическую деформацию.

На рассматриваемом масштабном и структурном уровне ярко проявляются гидродинамические характеристики вещества, зависящие от истории термомеханического воздействия и вида напряженно-деформированного состояния [1, 4-6].

По мере развития мартенситных реакций, нарастает плотность структурных несовершенств более высокого масштабного уровня и, при некотором критическом значении мезоконцентраторов, когда величина дисторсии превращения на уровне мезо-1 достигает предельной величины, теряется сдвиговая устойчивость в локальных зонах следующего мезоструктурного уровня, мезо-2 (рис. 1в). Таким образом, становятся возможными структурные изменения в областях значительной протяженности и в произвольных направлениях не обязательно совпадающих с кристаллографическими вариантами сдвигов при мартенситных превращениях. Появляются протяженные полосовые деформационные структуры, они зарождаются в мезоконцентраторах напряжений и распространяются на большие расстояния через многие структурные элементы независимо от кристаллографической ориентации в кристаллах. На данном масштабном уровне особое значение приобретают стохастические свойства формирования трансляционно-ротационного поля деформируемого материала.

Самоорганизация сложных стохастических процессов в различных объемах масштабного уровня мезо-2 приводит к формированию нетривиальных тензорных свойств на масштабном уровне макрочастицы вещества, т.е. на уровне макро-1 (рис. 1г). Неоднородное распределение макродеформаций в нагруженном реальном изделии требует анализа напряженно-деформированного состояния в рамках решения краевой задачи механики деформируемого твердого тела, т.е. рассмотрения масштабного уровня макро-2 (рис. 1д).

Отметим, что приведенная на рисунке 1 схема основных структурных и масштабных уровней процесса деформации весьма условна, однако, она позволяет, в целом, правильно представлять последовательность и основные этапы моделирования, которые в последующих разделах сформулированы в виде соответствующих связанных определяющих соотношений на микро-, мезо- и макромасштабных уровнях.

## 2. МИКРОМАСШТАБНЫЙ УРОВЕНЬ

Для анализа микроуровня введем объем усреднения  $V_0 \gg V_a$ , где  $V_a$  - объем атома. Следуя [1-3], сформулируем определяющие соотношения для описания соответствующих деформационных потоков и параметров, характеризующих кинетику фазовых превращений мартенситного типа и дислокационных сдвигов на микроуровне:

$$\dot{\beta}_{ik}^y = C_{ikpq} \dot{\tau}_{pq}; \quad \dot{\beta}_{ik}^T = \gamma_{ik} \dot{T}; \quad (1)$$

$$\dot{\beta}_{ik}^H = \dot{\beta}_{31}^H (\delta_{i3} \delta_{k1} + \delta_{k3} \delta_{i1}); \quad \dot{\beta}_{31}^H = \dot{\beta}_{31}^t + \dot{\beta}_{31}^a; \quad (2)$$

$$\dot{\beta}_{31}^t = A_t \exp \left[ -\frac{u_t - \gamma_t \tau'_{31} \text{sign} \tau'_{31}}{kT} \right] (\tau'_{31} \text{sign} \tau'_{31})^n \text{sign} \tau'_{31}; \quad (3)$$

$$\dot{\beta}_{31}^a = A_a (\dot{\tau}'_{31} - \dot{\tau}'_0 \text{sign} \tau'_{31}) H(\tau'_{31} \text{sign} \tau'_{31} - \tau^s) H(\dot{\tau}'_{31} \text{sign} \tau'_{31} - \dot{\tau}'_0); \quad (4)$$

$$\dot{\tau}^s = A_a^{-1} \dot{\beta}_{31}^a \text{sign} \dot{\beta}_{31}^a - \chi \dot{T} - A_s \exp \left[ -\frac{u_s - \gamma_s \tau'_{31} \text{sign} \tau'_{31}}{kT} \right] (\tau^s - \tau_0 + \chi T)^m \cdot H(\tau^s - \tau_0 + \chi T); \quad (5)$$

$$\dot{\tau}'_0 = \dot{\tau}^s - A_a^{-1} \dot{\beta}_{31}^a \text{sign} \dot{\beta}_{31}^a; \quad \tau'_0(s^\tau) = \tau_0 + s^\tau; \quad \Gamma_{\min}^\tau \leq s^\tau \leq \Gamma_{\max}^\tau; \quad (6)$$

$$\tau'_{ik} = \tau'_{31} (\delta_{i3} \delta_{k1} + \delta_{k3} \delta_{i1}); \quad \tau'_{31} = \tau_{31} - \psi_{31}^{(\rho)} + \nu_{31}^\Sigma; \quad \tau_{31} = \alpha_{p3} \alpha_{q1} \sigma_{pq}; \quad (7)$$

$$\psi_{ik}^{(\rho)} = \alpha_{pi} \alpha_{qk} \rho_{pq}. \quad (8)$$

В соотношениях (1) – (8) и далее, точка над символом означает производную по времени. Тензоры упругой деформации  $\beta_{ik}^y$ , коэффициентов упругости  $C_{ikpq}$ , деформации теплового расширения  $\beta_{ik}^T$  (1) и коэффициентов теплового расширения  $\gamma_{ik}$  отнесены к кристаллографическому базису. Тензор полной скорости неупругой деформации  $\dot{\beta}_{ik}^H$  (2) состоит из термоактивированной  $\dot{\beta}_{ik}^t$  (3) и атермической  $\dot{\beta}_{ik}^a$  (4) составляющих. Эволюционные уравне-

ния для начального  $\tau_0^s$  (6) и текущего  $\tau^s$  (5) напряжения течения кристаллографического сдвига учитывают деформационное упрочнение (первое слагаемое в (5)), температурный фактор (Т), а также способность к старению или возврату (второе и третье слагаемые в (5)). Эффективное напряжение  $\tau'_{ik}$  содержит, наряду с компонентами напряжений от внешних нагрузок  $\tau_{ik}$ , ориентированные  $\psi_{ik}^{(\rho)}$  и неориентированные  $v_{ik}^{\Sigma}$  структурные напряжения различной природы [1-3]. Среди неориентированных микронапряжений выделяются напряжения, обусловленные анизотропией теплового расширения и анизотропией упругой податливости кристаллов. Подробный вывод эволюционных уравнений для расчета неориентированных напряжений различной природы содержится в [1-3]. Отметим, что поля  $v_{ik}^{\Sigma}$  взаимно уравновешены, являются близкодействующими, а длина волны флуктуирующего поля напряжений соизмерима с характерным размером представительного объема  $V_0$ . Ориентированные напряжения  $\psi_{ik}^{(\rho)}$  являются дальнедействующими, отражают влияние на напряженное состояние кристаллов пространственной неравномерности зарождения и развития пластической деформации. Введение ориентированных структурных напряжений учитывает фактор релаксации напряжений в локальных объемах, где происходит пластический сдвиг. Рассматриваемые структурные напряжения  $\psi_{ik}^{(\rho)}$  формируются на мезо- и макромасштабных уровнях, поэтому подробный вывод эволюционных уравнений для их расчета будет представлен ниже при анализе соответствующих определяющих соотношений.

Рассмотрим вопрос нахождения деформации, обусловленной мартенситным каналом неупругости [3]. Если напряжения незначительны и в материале отсутствуют пластические сдвиги, то расчет деформационных эффектов, связанных с мартенситным каналом массопереноса, можно успешно проводить по хорошо апробированным соотношениям в [1,3-5] для сред с фазовыми реакциями, учитывающими специфику превращения (первого или второго рода), статистические свойства структуры и другие особенности. Практически не исследованы закономерности механических свойств для случаев, когда в материале инициируются одновременно, как пластические сдвиги, так и мартенситные реакции. В этом случае, как уже отмечалось при анализе пластичности, весь объем кристалла разбивается по характеру действия ориентированных микронапряжений  $\rho_{ik}$  на две подобласти. Развивая высказанные соображения, с целью учета влияния пластических сдвигов на мартенситные реакции будем считать, что весь представительный объем  $V$  можно разделить на две подобласти с удельными объемами  $a$  и  $b$ , содержащими ориентированные микронапряжения противоположных «знаков», т.е.  $a\rho_{ik}$  и  $b\rho_{ik}$ . Тогда при наличии напряжений  $\sigma_{ik}$  эффективные напряжения  $\sigma_{ik}^{\Phi}$ , действующие в различных областях при фазовых превращениях, можно представить в первом приближении в виде соотношений:

$$^+ \sigma_{ik}^{\Phi} = \sigma_{ik} + a \rho_{ik}, \tag{9}$$

$$^- \sigma_{ik}^{\Phi} = \sigma_{ik} - b \rho_{ik}, \tag{10}$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные, удовлетворяющие условию нормировки  $a + b = 1$ . Введение эффективных напряжений (9) и (10) позволяет сформулировать, следуя методике [3], аналитические соотношения для расчета деформаций в условиях пластических сдвигов и мартенситных превращений. В качестве примера рассмотрим случай мартенситных превращений 1-го рода. Определяющие соотношения будут иметь вид:

$$\dot{\beta}_{ik}^{\Phi} = a \dot{\beta}_{ik}^+ + b \dot{\beta}_{ik}^-; \tag{11}$$

$$\dot{\beta}_{ik}^+ = A_0 D_{ik} \dot{\Phi}^+; \tag{12}$$

$$\dot{\beta}_{ik}^- = A_0 D_{ik} \dot{\Phi}^-; \tag{13}$$

$$D_{ik} = D_{31} \epsilon_{i3} \delta_{k1} + \delta_{k3} \delta_{i1}; \tag{14}$$

$$\dot{\Phi}^+ = -\dot{T}_+^* \left\{ \begin{array}{l} H \ 1 - \Phi_m \ H \ -\dot{T}_+^* \ H [M_H - \Phi^+ \ M_H - M_K \ -T_+^*] \times \\ \times \ M_H - M_K \ ^{-1} + H \ \Phi_m \ H \ \dot{T}_+^* \ H [T_+^* + \Phi^+ \ A_K - A_H \ -A_K] \times \\ A_K - A_H \ ^{-1} \end{array} \right\}; \quad (15)$$

$$\dot{\Phi}^- = -\dot{T}_-^* \left\{ \begin{array}{l} H \ 1 - \Phi_m \ H \ -\dot{T}_-^* \ H [M_H - \Phi^- \ M_H - M_K \ -T_-^*] \times \\ \times \ M_H - M_K \ ^{-1} + H \ \Phi_m \ H \ \dot{T}_-^* \ H [T_-^* + \Phi^- \ A_K - A_H \ -A_K] \times \\ A_K - A_H \ ^{-1} \end{array} \right\}; \quad (16)$$

$$\dot{T}_+^* = \dot{T} - \frac{T_0}{q_0} \alpha_{ip} \alpha_{kq} D_{pq} + \dot{\sigma}_{ik}^\Phi; \quad (17)$$

$$\dot{T}_-^* = \dot{T} - \frac{T_0}{q_0} \alpha_{ip} \alpha_{kq} D_{pq} - \dot{\sigma}_{ik}^\Phi; \quad (18)$$

$$\Phi_m = \int_{S_\Gamma} F \ S_\Gamma \int_{S_D} F \ S_D \int_{\Omega} f \ \Omega \ a \ \Phi^+ + b \ \Phi^- \ dS_\Gamma dS_D d^3\Omega; \quad (19)$$

$$\int_{S_\Gamma} F \ S_\Gamma \ dS_\Gamma = 1 \quad \int_{S_D} F \ S_D \ dS_D = 1 \quad \int_{\Omega} f \ \Omega \ d^3\Omega = 1. \quad (20)$$

Здесь  $A_0, D_{31}, T_0, q_0$  – константы материала;  $M_K, M_H, A_H, A_K$  – характеристические температуры мартенситных превращений;  $S_\Gamma$  и  $S_D$  – статистические переменные;  $F(S_\Gamma)$  и  $F(S_D)$  – функции распределения  $S_\Gamma$  и  $S_D$ . Данные параметры подробно описаны в [3].

Структурно-аналитическая модель (1) – (20) представляет связанную систему уравнений, отражающих свойства реальных материалов на микромасштабном уровне. Данная модель позволяет формулировать и решать задачу определения конкретных структурно-кинетических параметров материала, обеспечивающих ему заданные механические свойства на мезо- и макро-масштабных уровнях. С целью формулировки определяющих соотношений для мезо- и макро-масштабных уровней воспользуемся методами предложенными в работах [1,3-6].

В работах [4-6] подробно изложены методики вывода определяющих соотношений для масштабных уровней мезо-1, мезо-2 и макро-1 в рамках представлений, когда инициируется только фазовый канал деформации [4,5] или только дислокационный механизм массопереноса [6]. Развивая приведенные выше методы моделирования процессов деформации необходимо учесть, что среднестатистические значения мартенситной микродеформации  $\langle \beta_{ik}^\Phi \rangle$  определяются с учетом влияния пластической деформации (9–20).

### 3. МЕЗОУРОВЕНЬ -1

Введем объем усреднения  $V_{m1}$  ( $V_0 \ll V_{m1} \ll V_{m2}$ ), где  $V_{m2}$  – характерный объем мезо-2. Деформация на мезоуровне-1  $L_{ik}^\Phi$  при мартенситных реакциях отождествляется с дисторсией  $B_{ik}^\Phi$  [5]. Определяющие уравнения на рассматриваемом масштабном уровне подчиняются уравнениям сохранения гидродинамического типа. Модификация названных уравнений представлена соотношениями:

$$B_{ik}^\Phi = B_{31}^\Phi \delta_{i3} \delta_{k1}, \quad \dot{B}_{31}^\Phi = -\bar{\nabla}_\Omega \cdot \bar{I}_\beta + \sigma_\beta, \quad L_{ik}^\Phi = L_{31}^\Phi \delta_{i3} \delta_{k1}, \quad L_{31}^\Phi = B_{31}^\Phi \Phi_{m1}^0; \\ \bar{I}_\beta = A_{1\Phi} \bar{\nabla}_\Omega \langle \beta_{31}^\Phi \rangle, \quad \langle \beta_{31}^\Phi \rangle = \int_0^t \langle \dot{\beta}_{31}^\Phi \rangle dS, \quad \sigma_\beta = K_{1\Phi} \langle \dot{\beta}_{31}^\Phi \rangle + l_{1\Phi} (\bar{\nabla}_\Omega \times \bar{a}_\Phi) \cdot \bar{e}_n; \quad (21) \\ \bar{a}_\Phi = \langle \dot{\beta}_{31}^\Phi \rangle \bar{e}_l; \quad l_{1\Phi} = \eta_{1\Phi} \left( \frac{\text{mod } \nabla_\Omega \langle \dot{\beta}_{31}^\Phi \rangle}{\nabla_\Omega^2 \langle \dot{\beta}_{31}^\Phi \rangle} \right).$$



$$\dot{\rho}_{ik}^i = \frac{1}{2} \int_{\Omega_i} f \left[ \alpha_{i3} \Omega_i \alpha_{k1} \Omega_i + \alpha_{i1} \Omega_i \alpha_{k3} \Omega_i \right] \dot{q}_{31}^\Phi d\Omega_i;$$

$$\dot{\varepsilon}_{ik}^\Phi V_{m2} = A_{ikpq}^\Phi \sigma_{pq}^* + M_{ikpq}^\Phi \varepsilon_{pq}^\Phi; \quad \sigma_{ik}^* = \sigma_{ik} - \rho_{ik}^i; \quad \dot{\rho}_{ik}^O = R_{ikpq}^O \dot{\varepsilon}_{pq}^\Phi.$$

Здесь  $\varepsilon_{ik}^\Phi \mathbb{H}_0, \mathbb{F}_{ik}^\Phi \mathbb{H}_{m1}, \mathbb{F}_{ik}^\Phi \mathbb{H}_{m2}$  – тензоры макроскопической деформации, характеризующие вклад процессов массопереноса на микро-, мезо-1 и мезо-2 масштабных уровнях, соответственно. Подробно вывод формул для  $A_{ikpq}^\Phi, M_{ikpq}^\Phi, R_{ikpq}^i$  и физическая природа этих функционалов обсуждается в [4,5].

Используя методику, изложенную в работе [6], получим окончательные выражения определяющих соотношений на масштабном уровне макро-1 для компонент пластической деформаций в виде:

$$\dot{\varepsilon}_{ik}^H \mathbb{V}_{m2} \mathbb{F} A_{ikmn} \dot{\sigma}_{mn}^* + B_{ikmn} \sigma_{mn}^*; \quad \dot{\varepsilon}_{ik}^y = \bar{C}_{ikmn} \dot{\sigma}_{mn}; \quad \dot{\varepsilon}_{ik}^T = \bar{\gamma}_{ik} \dot{T}; \quad (24)$$

$$\dot{\rho}_{ik} = G_{ikmn} \dot{\varepsilon}_{mn}^H - R_{ikmn} \rho_{mn}; \quad \dot{\varepsilon}_{ik}^\Sigma = \dot{\varepsilon}_{ik}^H + \dot{\varepsilon}_{ik}^T + \dot{\varepsilon}_{ik}^y.$$

В рамках данной модели выполнен прогноз основных механических свойств материалов с эффектом памяти формы. Для решения практических задач инженерной механики требуются дополнительные уравнения, учитывающие пространственное расположение объемов  $V$  (рассмотрение масштабного уровня макро-2), т.е. традиционные статические и геометрические уравнения краевой задачи механики, а также начальные и краевые условия для соответствующих переменных.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемой модели материала с ЭПФ учитывается многоуровневая и многостадийная природа трансляционно-ротационной пластической деформации и эволюции обратимых мартенситных превращений. Появляется возможность прогнозировать сложные механические свойства материала с ЭПФ в условиях деформирования по сдвиговому механизму в условиях фазовых превращений мартенситного типа, а также формулировать и решать краевые задачи механики деформируемого твердого тела с учетом пластических деформаций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинин, В.Г. Структурно-аналитическая модель физической мезомеханики для материалов с эффектом памяти формы / В.Г. Малинин // Научные труды I международного семинара "Актуальные проблемы прочности" им. В.А.Лихачева. Новгород. 1997 т.2 ч.1. С.26-32.
2. Малинин, В.Г. О расчете межфазовых структурных напряжений, возникающих на фронте мартенситных превращений / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина // Сб. трудов I Междунар. семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева. Новгород, 1997. т.2, ч.1. - С.33-37.
3. Лихачев, В.А. Структурно-аналитическая теория прочности / В.А. Лихачев, В.Г. Малинин. – С. – Петербург. – "Наука", 1993. – 471с.
4. Малинин, В.Г. Механические свойства материалов с эффектом памяти формы при сложных режимах изотермического нагружения / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, Г.В. Малинин // Приложение к Инженерному журналу: Справочник.– Москва: Изд-во Машиностроение, 2002. №10, ч.1.– 27 с.; - №10, ч.2.– 25с.
5. Малинин, Г.В. Структурно-аналитическая мезомеханика наноструктурных состояний среды с обратимыми мартенситными превращениями / Г.В. Малинин // Наноинженерия, 2012. – №5. – С. 22-29.
6. Малинин, В.Г. Структурно-аналитическая мезомеханика среды с трансляционно-ротационными модами деформации и разрушения / В.Г. Малинин // Наноинженерия, 2012. – №5. – С. 29-37.

### Малинин Георгий Владиславович

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»,

г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. 8 (4862) 41-98-13

E-mail: malinin2002@yandex.ru

G.V. MALININ

## STRUCTURAL AND ANALYTICAL MESOMECHANICS OF MATERIALS, EXPERIENCING ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION AND MARTENSITE TRANSFORMATIONS

*In present article methods structurally-analytical mesomechanics, based on the concept multilevel (micro, meso and macro) plastic current and returnable martensitica transformations develop. For the first time the system of determining ratio for the description of translational-rotational mode of the deformations considering interference of plastic deformations and structural phase transformations martensitica of the nature for materials with shape memory effect is deduced.*

**Keywords:** *structured-analytical mesomechanical, reversible martensitica of the conversion, shift plastic deformation, the translational-rotational modes of deformation, determining ratio, materials with shape memory effect, micro, meso and macroscale levels.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Malinin, V.G. Strukturno-analiticheskaja model' fizicheskoj mezomehaniki dlja materialov s jeffektom pamjati formy / V.G. Malinin // Nauchnye trudy I mezhdunarodnogo seminar "Aktual'nye problemy prochnosti" im. V.A.Lihacheva. Novgorod. 1997 t.2 ch.1. S.26-32.
2. Malinin, V.G. O raschete mezhfazovyh strukturnyh naprjazhenij, vznikajuwih na fronte marten-sitnyh prevrawenij / V.G. Malinin, N.A. Malinina // Sb. trudov I Mezhdunar. seminar «Aktual'nye pro-blemy prochnosti» im. V.A. Lihacheva. Novgorod, 1997.t.2, ch.1.- S.33-37.
3. Lihachev, V.A. Strukturno-analiticheskaja teorija prochnosti / V.A. Lihachev, V.G. Malinin. – S. – Peterburg. – "Nauka", 1993. – 471s.
4. Malinin, V.G. Mehanicheskie svojstva materialov s jeffektom pamjati formy pri slozhnyh rezhimah izotermicheskogo nagruženija / V.G. Malinin, N.A. Malinina, G.V. Malinin // Prilozhenie k Inzhenernomu zhurnalu: Spravochnik.– Moskva: Izd-vo Mashinostroenie, 2002. №10, ch.1.– 27 s.; - №10, ch.2.– 25s.
5. Malinin, G.V. Strukturno-analiticheskaja mezomehanika nanostrukturnyh sostojanij sredy s obra-timymi martensitnymi prevrawenijami / G.V. Malinin // Nanoinzhenerija, 2012. – №5. – S. 22-29.
6. Malinin, V.G. Strukturno-analiticheskaja mezomehanika sredy s transljacionno-rotacionnymi mo-dami deformacii i razrushenija / V.G. Malinin // Nanoinzhenerija, 2012. – №5. – S. 29-37.

#### **Malinin George Vladislavovich**

State University – ESPC

Candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department «Dynamics and strength of machines»,

g. Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8 (4862) 41-98-13

E-mail: malinin2002@yandex.ru

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 66.066.73.066.77

Г.К. ИВАХНЮК, Е.И. ДАВЫДОВ, Б.Ф. ЛЯМАЕВ

## **УСТРОЙСТВО И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТСТОЙНИКА СО СПИРАЛЬНО-НАВИТОЙ НАСАДКОЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

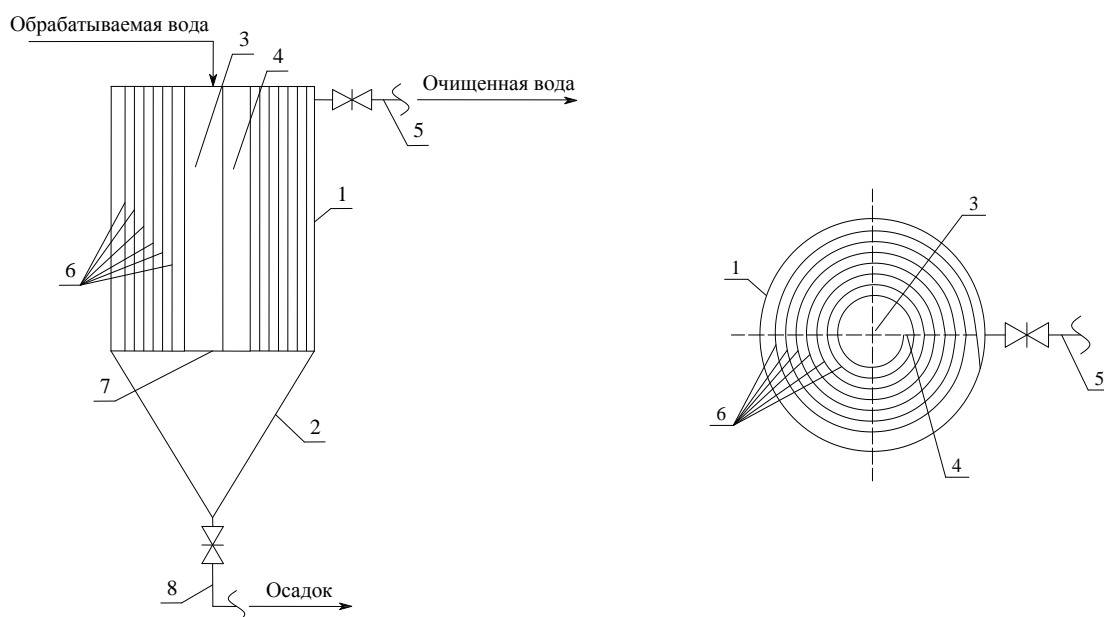
*В статье рассмотрена новая конструкция вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой. Разработана математическая модель осаждения взвешенных веществ в отстойнике. Изложена методика его расчета.*

**Ключевые слова:** отстойник, очистка сточных вод, математическая модель.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В практике водоподготовки природных и очистки сточных вод получили распространение вертикальные отстойники. Преимущество этих отстойников в простоте устройства и эксплуатации. Недостатком их является большая глубина, что значительно удорожает их строительную стоимость, и низкий эффект осветления. Обычно он не превышает 30%, в то время как в горизонтальных и радиальных отстойниках эффективность очистки достигает 50-60% [1,2]. В связи с этим особую значимость приобретают задачи интенсификации работы первичных отстойников и сокращения занимаемых ими площадей. Поэтому научные исследования были направлены на разработку новой конструкции вертикального отстойника и методики его расчета.

Данный отстойник представляет собой резервуар с днищем в виде усеченного конуса и спирально-навитой насадки, установленной в этом резервуаре. На рисунке 1 представлена схема.

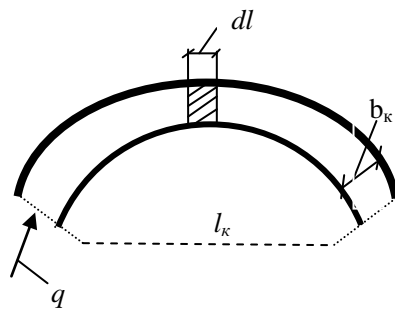


**Рисунок 1 – Схема вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой**  
1 – вертикальный цилиндрический корпус; 2 – конусное днище; 3 – центральная труба;  
4 – щелевое отверстие; 5 – трубопровод очищенной воды; 6 – спирально-навитая насадка;  
7 – заглушка; 8 – трубопровод для удаления осадка



Очищаемая вода подается по центральной трубе, проходит через щелевое отверстие и далее поступает в канал спирально-навитой насадки. Канал насадки является устройством, увеличивающим путь движения очищаемой воды, следовательно, увеличивается время отстоя обрабатываемой жидкости в отстойнике. Насадка так же служит для увеличения площади соприкосновения очищаемой жидкости с ее стенкой. Необходимо отметить, что в данном отстойнике, как и в других типах отстойников, основной движущей силой процесса осветления является сила тяжести, под действием которой происходит осаждение взвеси. Выпавшая взвесь на стенке насадки, либо в канале поступает в нижнюю часть отстойника, откуда периодически удаляется, а очищенная вода отводится из верхней части отстойника.

Методика расчета данного отстойника заключается в определении его конструктивных размеров. При расчете данного отстойника нами разработана математическая модель, которая описывает процесс осаждения взвеси в отстойнике со спирально-навитой насадкой. С целью создания такой модели рассмотрим канал спирально-навитой насадки отстойника рисунка 2.



*Рисунок 2 – Канал спирально-навитой насадки отстойника*

На произвольно выбранном участке по длине канала  $l_k$  выделим элементарный участок  $dl$ .

Запишем уравнение для изменения массового расхода взвеси, в элементарном участке

$$dG = Ub_k(C - C_{np})dl, \tag{1}$$

где  $G$  - массовый расход взвеси;

$U$  - коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность частиц);

$b_k$  - ширина канала спирально-навитой насадки отстойника;

$C$  - концентрация взвеси в элементарном объеме;

$C_{np}$  - предельная концентрация взвеси (концентрация не оседающих примесей).

Одновременно с уравнением (1) для изменения массового расхода взвеси, поступающей с обрабатываемой водой, является справедливым выражение

$$dG = -qdC, \tag{2}$$

где  $q$  - расход обрабатываемой воды.

Зависимости (1) и (2) дают возможность получить дифференциальное уравнение, описывающее процесс осаждения взвеси в данном отстойнике

$$-qdC = Ub_k(C - C_{np})dl. \tag{3}$$

Решение уравнения (3) при граничных условиях  $l = 0, C = C_{np}$  позволяет получить зависимость для определения концентрации взвеси на выходе из отстойника (в очищенной воде)

$$C = C_{np} + (C_o - C_{np}) \cdot e^{-\frac{U \cdot b_k \cdot l_k}{q}}. \tag{4}$$

Если выразить скорость движения обрабатываемой воды  $V$  в канале спирально-навитой насадки отстойника формулой

$$V = \frac{q}{b_k \cdot H_k}, \quad (5)$$

где  $H_k$  – высота канала спирально-навитой насадки, то получим

$$C = C_{np} + (C_o - C_{np}) e^{-\frac{U \cdot l_k}{H_k \cdot V}}. \quad (6)$$

Результаты исследований кинетики осаждения принято представлять в виде зависимости эффекта осветления  $\mathcal{E}$  от изменения концентрации. Эффект осветления определяется по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{C_o - C}{C_o}. \quad (7)$$

С учетом этого формулы (4 и 6) преобразуем к виду

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{np} \left( 1 - e^{-\frac{U \cdot l_k \cdot b_k}{q}} \right) \quad (8)$$

или 
$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{np} \left( 1 - e^{-\frac{U \cdot l_k}{H \cdot V}} \right), \quad (9)$$

где  $\mathcal{E}_{np}$  – предельный эффект осветления определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{np} = \frac{C_o - C_{np}}{C_o}. \quad (10)$$

При выводе соотношений (4), (6) и (8 - 9) никаких ограничений на условие осаждения взвеси не накладываются.

Таким образом, полученная зависимость (9) используется для расчета данного отстойника

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{np} \left( 1 - e^{-\frac{U \cdot l_k}{H \cdot V}} \right),$$

где  $\mathcal{E}$  – требуемый эффект осветления, доли единиц;

$U$  – коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность) взвешенных веществ, м/с, задерживаемых в отстойнике;

$l_k$  – длина канала спирально-навитой насадки, м;

$H$  – высота цилиндрической части отстойника со спирально-навитой насадкой, м;

$V$  – скорость движения очищаемой воды, в канале спирально-навитой насадки отстойника, принимаем согласно [4] как для горизонтального отстойника  $(5 - 10) \cdot 10^{-3}$  м/с;

$\mathcal{E}_{np}$  – предельный эффект осветления, доли единиц.

В зависимости (9) коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность) взвешенных веществ  $U$ , мм/с, определяется по формуле

$$U = \frac{1000 \cdot H}{t_{set} \left( \frac{H}{h_1} \right)^{n_2}}, \quad (11)$$

где  $H$  – высота цилиндрической части отстойника, в которую вставлена спирально-навитая насадка, м, принимаемая на основе возможных глубин типовых вертикальных отстойников  $H = 2,7-3,8$  м;

$t_{set}$  – продолжительность отстаивания, сек., соответствующая заданному эффекту осветления и полученная в лабораторном цилиндре в слое  $h_1$ , определяется по таблице 30 [4];

$h_1$  – глубина воды при отстаивании в покое (высота слоя воды в лабораторном цилиндре), принимаемая равной 0,5м;

$n_2$  – показатель степени, зависящий от способности взвешенных веществ к агломерации, принимаемый по черт. 2 [4].

Далее из формулы (9) определяется длина канала  $l_k$ , м, спирально-навитой насадки, которая должна обеспечивать требуемый эффект осветления очищаемой воды в отстойнике

$$l_k = - \frac{\ln\left(1 - \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{np}}\right) \cdot H \cdot V}{U} . \quad (12)$$

Необходимая площадь живого сечения  $F$ , м<sup>2</sup>, цилиндрической части определяется по выражению

$$F = \frac{\pi (D_{om}^2 - d_{ц.м.}^2)}{4} , \quad (13)$$

где  $D_{om}$  – диаметр отстойника со спирально-навитой насадкой, м;

$d_{ц.м.}$  – диаметр центральной трубы, м, к которой прикреплена спирально-навитая насадка.

Следует заметить, что площадь живого сечения  $F$ , м<sup>2</sup>, цилиндрической части отстойника со спирально-навитой насадкой есть произведение длины канала на ширину канала насадки

$$F = b_k \cdot l_k , \quad (14)$$

где  $b_k$  – ширина канала спирально-навитой насадки отстойника, принимается конструктивно.

Подставив зависимость (14) в (13) можно определить диаметр отстойника со спирально-навитой насадкой  $D_{om}$ , м.:

$$D_{om} = \sqrt{\frac{4 \cdot l_k \cdot b_k}{\pi} + d_{ц.м.}^2} . \quad (15)$$

Диаметр центральной трубы  $d_{ц.т.}$ , м, определяется по формуле

$$d_{ц.м.} = \sqrt{\frac{q_{set}}{2,82 \cdot v_{ц.м.}}} , \quad (16)$$

где  $q_{set}$  – расчетный максимальный часовой расход сточных вод, м<sup>3</sup>/ч;

$v_{ц.м.}$  – скорость движения воды в центральной трубе, принимаем 30 мм/с, согласно [2].

Количество витков спирально-навитой насадки  $n$  определяется по формуле:

$$n = \frac{D_{om} - d_{ц.м.}}{2 \cdot b_k} . \quad (17)$$

Высота конусной части отстойника  $H_k$ , м, при угле наклона ее стен к горизонту 50° определяется по формуле

$$H_k = \frac{D_{om}}{2} \cdot \operatorname{tg} 50^\circ . \quad (18)$$

## **ВЫВОД**

Спирально-навитая насадка существенно увеличивает эффект осветления по сравнению с обычным вертикальным отстойником. Использование насадки при проектировании новых отстойников или реконструкции существующих позволит, снизить капитальные затраты на строительство, так как существенно уменьшаются объемы проектируемого отстойника и увеличить эффективность очистки бытовых сточных вод на 15-20%.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Государственный - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров, Н.Ф. Канализация / Н.Ф. Федоров, С.М. Шифрин. – М.: Изд. «Высшая школа» 1968. – 592с.
2. Яковлев, С.В. Механическая очистка сточных вод / С.В. Яковлев, В.И.Калицун. – М.: Стройиздат, 1972. – 200с.
3. Болдырев В.В., Давыдов Е.И. Отстойный резервуар. Патент RU №2182508, МПК В01D21/02.
4. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. – М.: Изд-во стандартов, 1986.

#### **Ивахнюк Григорий Константинович**

Санкт-Петербургского Государственного технологического института (Технического университета)  
Доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной защиты ОС  
E-mail: fireside@inbox.ru

#### **Давыдов Евгений Иванович**

Санкт-Петербургского Государственного технологического института (Технического университета)  
Соискатель кафедры инженерной защиты ОС СПбГТИ (ТУ)  
E-mail: davydov.1967@mail.ru

#### **Лямаев Борис Федорович**

СПб Военного инженерно-технического университета  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: blymaev@mail.ru

---

G.K. IVAKHNYUK, E.I. DAVYDOV, B.F. LYAMAEV

## **THE DEVICE AND MATHEMATICAL MODEL OF THE VERTICAL SEDIMENT BOWL WITH THE SPIRALLY-WOUND NOZZLE FOR WASTEWATER TREATMENT**

*A new design of vertical sediment bowl with the spirally-wound nozzle is considered. The mathematical model of sedimentation process of weighed substances in a sediment bowl is developed. The technique of its calculation is stated.*

**Keywords:** vertical sediment bowl, wastewater treatment, mathematical model.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Fedorov, N.F. Kanalizacija / N.F. Fedorov, S.M. Shifrin. – M.: Izd. «Vysshaja shkola» 1968. – 592s.
2. Jakovlev, S.V. Mehanicheskaja ochistka stochnyh vod / S.V. Jakovlev, V.I.Kalicun. – M.: Strojizdat, 1972. – 200s.
3. Boldyrev V.V., Davydov E.I. Otstojnyj rezervuar. Patent RU №2182508, MPK B01D21/02.
4. SNiP 2.04.03-85. Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija. – M.: Izd-vo standartov, 1986.

#### **Ivakhnyuk Gregory Konstantinovich**

St. Petersburg State Technological Institute (Technical university)  
Doctor of Chemical Sciences, Professor Head of the Department of Environmental Engineering  
E-mail: fireside@inbox.ru

#### **Davydov Evgeny Ivanovich**

St. Petersburg State Technological Institute (Technical university)  
Seeker of the Department of Environmental Engineering  
E-mail: davydov.1967@mail.ru

#### **Lyamaev Boris Feodorovich**

St. Petersburg Military Engineering and Technology University  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
E-mail: blymaev@mail.ru

УДК: 621.1.001: 621.438

А.М. ПОРТЕР, С.А. БУКАТЫЙ, А.А. ОКРУГИН, А.Л. ВОДОЛАГИН

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛОВ И ДИСКОВ ГТД В УСЛОВИЯХ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

*В статье рассматриваются процессы разрушения деталей газотурбинных двигателей, работающих в условиях совместного действия малоциклового усталости и длительной прочности при повышенных температурах. Установлен «эффект циклического упрочнения» материалов, зависящий от длительности действия максимальных нагрузок в цикле нагружения.*

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость, длительная прочность, детали ГТД, длительность цикла нагружения, напряжённо-деформированное состояние, эффект циклического упрочнения.

В настоящее время широко используется эксплуатация авиадвигателей по техническому состоянию. Практика показывает, что экспериментально установленный ресурс валов и дисков компрессора ГТД, работающих в условиях малоциклового усталости и длительной прочности, значительно превышает ресурс, определяемый расчётным путем. Очевидно, требуется уточнение расчётных методик на основе результатов испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ) как стандартных образцов, так и эквивалентно-циклических испытаний (ЭЦИ) натуральных деталей. В работе [1] тоже указывается, что экспериментально установленный ресурс дисков компрессора ГТД из титановых сплавов более чем в 6 раз превышает ресурс, определяемый расчётным путем. Следовательно, основные детали – валы и диски имеют дополнительные резервы прочности и на взлётном режиме для двигателей можно назначать более высокий по сравнению с расчётным уровень нагрузок. Так как расчёт долговечности деталей выполняется на основе гипотезы линейного суммирования повреждений [2, 3], то для проверки гипотезы в ОАО «НПО «Сатурн» проведён ряд исследований, как на стандартных образцах, так и на натуральных деталях – валах ТНД (рис. 1, материал ЭИ 961-Ш) на специальной установке УИВ-2.

Для испытаний были подобраны два вала с приблизительно одинаковой наработкой в эксплуатации: вал № 1 – 7877 часов, 2042 циклов и вал № 2 – 6058 часов, 2567 циклов. Перед испытаниями валы были отремонтированы по серийной технологии и прошли контроль. Исследования механических свойств материала обоих валов показали приблизительно одинаковый уровень, удовлетворяющий требованиям ТУ.

Испытания проводили в условиях, максимально приближенных к реальным. Вал № 1 проходил испытание на МЦУ, затем на длительную прочность. Вал № 2 подвергался только циклическим испытаниям с увеличенной длительностью действия максимальных нагрузок, моделирующих взлётный режим. Циклические испытания проводили по отнулевому трапецеидальному циклу: для вала № 1 – с периодом  $T = 11$  с и выдержкой на максимальной и минимальной нагрузках соответственно  $\Delta\tau_{\max} = 6$  с и  $\Delta\tau_{\min} = 2$  с; для вала № 2 аналогично  $T = 100$  с,  $\Delta\tau_{\max} = 80$  с и  $\Delta\tau_{\min} = 18$  с. В процессе испытаний контролировались остаточные углы закручивания валов до момента их разрушения (рис. 2).

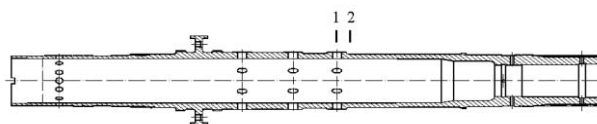


Рисунок 1 – Вал турбины низкого давления

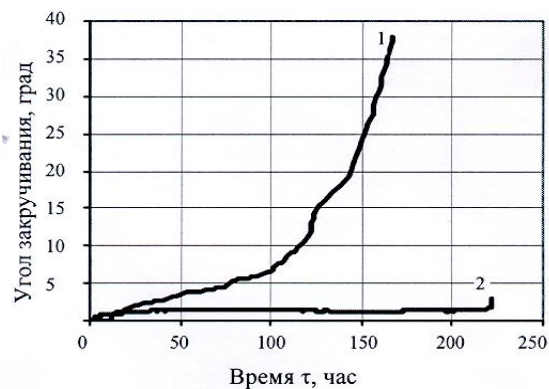


Рисунок 2 – Диаграмма остаточных углов закручивания валов: 1 – вал № 1; 2 – вал № 2

Из диаграммы вала № 1 видно, что на первом этапе при циклировании  $N = 7000$  циклов (суммарная длительность нагружения максимальной нагрузкой составила  $\tau = 11,6$  часа) остаточная деформация закручивания вала практически отсутствует ( $\sim 0,08^\circ$ ). Но при дальнейшем нагружении на втором этапе статической нагрузкой остаточная деформация закрутки непрерывно растет и при  $\tau = 166,6$  часа и достижении деформации закручивания  $\sim 38^\circ$  вал разрушился.

При циклировании вала № 2 контроль остаточной деформации показал, что в течение первых 500 циклов ( $\tau = 11,1$  часа) угол закручивания вала достиг  $\sim 1,5^\circ$  (рис. 2). При увеличении числа циклов нагружения до  $N = 9900$  циклов и суммарном времени нагружения максимальной нагрузкой  $\tau = 220$  часов, несмотря на более тяжелые условия нагружения, увеличения остаточной деформации закручивания вала не наблюдалось. Разрушение вала произошло при  $N = 10250$  циклов,  $\tau = 222$  часа и увеличении остаточного угла закручивания до  $\sim 3,5^\circ$ . В соответствии с гипотезой о линейном накоплении повреждений оба вала должны достигать предельного состояния приблизительно в одинаковых условиях и расчётные значения долговечности для обоих валов составили  $\tau = 88,5$  часов. На практике наблюдается значительное различие по остаточным углам закручивания и расхождение расчётных и экспериментальных данных по долговечности, которые можно объяснить сложным взаимодействием циклического нагружения и ползучести. Очевидно, механизм разрушения материала при отдельных испытаниях на длительную и циклическую прочность и при совместном действии циклических нагрузок и ползучести существенно отличается. При циклическом нагружении в процессе увеличенной выдержки под действием нагрузки в материале протекают процессы ползучести и релаксации напряжений. Это подтверждают проведенные нами испытания стандартных круглых образцов из материала ЭП609Ш на растяжение при  $T = 400^\circ\text{C}$  с выдержкой на каждой ступени нагружения в течение 2 минут (рис. 3). Из диаграммы (рис. 3, б) видно, что наиболее интенсивно процессы релаксации протекают в течение первых 20 секунд. Далее процесс замедляется и стабилизируется.

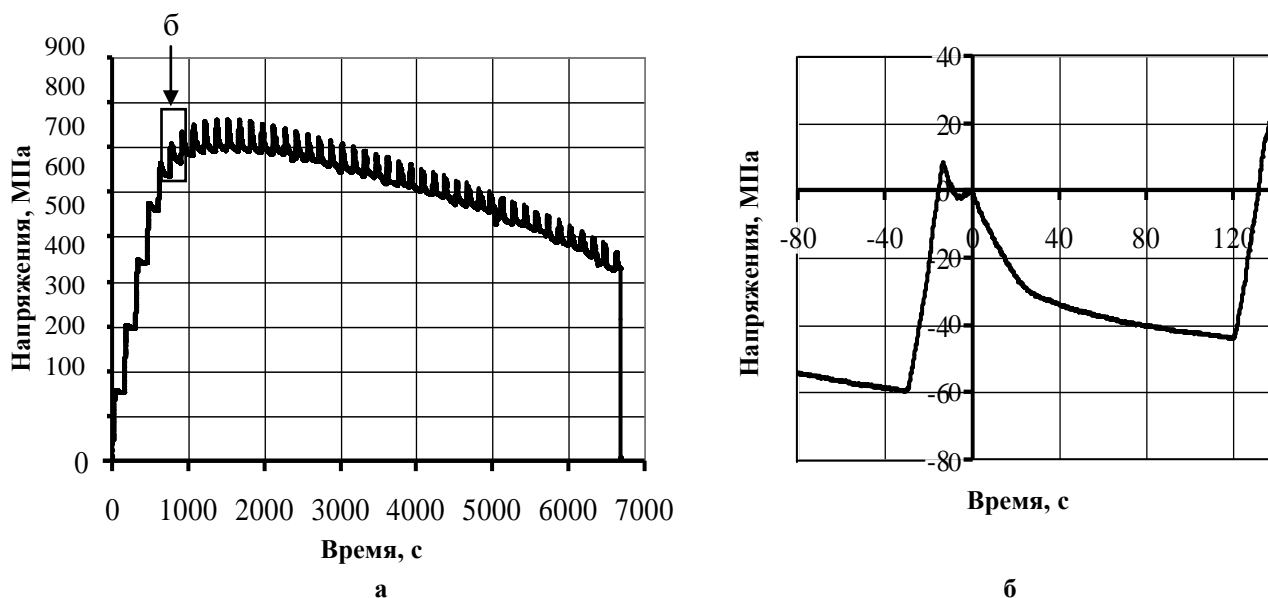


Рисунок 3 – а – диаграмма растяжения образцов из ст. ЭП609Ш;  
б – диаграмма релаксации напряжений в течение 120 с при выдержке под нагрузкой

Исследование напряжённо-деформированного состояния вала проводилось методом конечных элементов в системе ANSYS с использованием объёмных 8-узловых элементов SOLID 45. Результаты расчёта хорошо подтверждают характер разрушения: вала № 1 – пластический сдвиг по месту, где сосредоточены максимальные эквивалентные напряжения (рис. 4, б); для вала № 2 – трещины по суфлирующим отверстиям, где находятся максимальные главные напряжения (рис. 4, а). Следовательно, релаксационные процессы в течение бо-



скольку при повторном нагружении долговечность материалов понижается [4], то можно считать, что разность между единицей и повреждаемостью  $\Delta L_c = 1 - 0,888 = 0,112$  характеризует влияние повторности нагружения.

Анализ результатов, приведенных в таблице 1.

1. При циклическом нагружении напряжениями 686 МПа образца № 9 (без предварительной «тренировки») с выдержками  $\Delta\tau_{\max} = 120$  с и  $\Delta\tau_{\min} = 60$  с долговечность  $\tau_{ц}$  (суммарное время циклического нагружения максимальными напряжениями до разрушения) значительно – в 7,3 раза превышает время до разрушения при повторно-статическом нагружении ( $\tau_{ст}$ ) для образца № 10. Кроме того, циклические испытания на максимальном уровне 712 МПа образца с предварительной «тренировкой» № 6 показали  $\tau_{ц} = 24,89$  часа, что в 13,6 раза больше статической долговечности  $\tau_{ст} = 1,83$  часа образца № 11 без предварительной циклической «тренировки». Также приблизительно в 12 раз больше циклической и статической долговечности образца № 22 без предварительной «тренировки». Это свидетельствует о существовании «эффекта циклического упрочнения» (ЭЦУ), заключающегося в увеличении пластических свойств материала и увеличении статической и циклической долговечности. Очевидно, при циклическом нагружении и пластическом деформировании в материале внешние напряжения уравниваются внутренними напряжениями. В результате упругие свойства материала – пределы



**Фотография 5 – Образование шейки в образцах при разрушении**  
*а – образец № 6; б – образец № 12*

пропорциональности и текучести материала при циклической «тренировке» увеличиваются, что приводит к существенному уменьшению величины пластической деформаций в цикле при увеличении резерва пластичности материала. Во всех рассмотренных выше случаях происходит квазистатическое разрушение при существенных пластических деформациях ( $\Psi = 68 - 71,5$  %) с образованием шейки (фотография 5, а).

2. В отличие от ЭЦУ предварительное повторно-статическое нагружение на уровне 600 и 660 МПа (образец № 2) при испытаниях на длительную прочность на уровне рабочих напряжений 686 МПа приводит не к увеличению, а к уменьшению времени до разрушения (по сравнению с образцом 10):  $\tau_2 = 11,38$  и  $\tau_{10} = 16,25$  часов.

3. Количественная оценка по формулам (1) и (2) повреждаемости материала показывает, что во всех рассмотренных выше вариантах преобладает статическая составляющая повреждений, многократно превышающая 1. Полученные результаты совместных испытаний на циклическую и длительную прочность подтверждают несостоятельность гипотезы о линейном накоплении повреждений, а также опровергают известное положение [5] о том, что все материалы с  $\sigma_B/\sigma_{0,2} < 1,2$  при циклическом деформировании разупрочняются (в нашем случае для ЭП-609Ш  $\sigma_B/\sigma_{0,2} = 1,08$ ).

4. Циклическое нагружение образцов № 12 и 13 напряжениями 686 МПа при температуре 400 °С с периодом  $T = 2$  с и выдержками  $\Delta\tau_{\max} = \Delta\tau_{\min} = 0,5$  с по сравнению с образцами № 6 и 9 приводит к значительному росту количества циклов до разрушения при одновременном уменьшении суммарного времени  $\tau_{ц}$ :  $\tau_{ц12} = 6,7$  часа и  $\tau_{ц13} = 6,4$  часа, что существенно меньше  $\tau_{ц}$  образцов № 6 и 9 (171,49 и 118,64 часов). При этом преобладает усталостный тип разрушения – циклическая составляющая повреждений в  $\sim 3$  раза больше статической, наблюдается снижение пластических свойств материала ( $\Psi_{12,13} \sim 31$  %), и разрушение образцов происходит с незначительным образованием шейки (фотография 5, б).



Таблица 1 – Результаты испытаний стандартных образцов из ЭП609Ш при циклическом, повторно-статическом и статическом нагружении

№ образца и тип нагружения	Длительность нагружения $\Delta\tau_{\max}/\Delta\tau_{\min}$ , с	Количество циклов нагружений и длительность наработки на заданных уровнях $\sigma_{\max}$ , N циклов / $\tau$ час				Суммарные количество циклов и длительность наработки до разрушения N циклов/ $\tau_{\text{ц}}$ час	Относительное сужение в шейке образца $\Psi$ , %	Количество повреждений		
		600 МПа	660 МПа	686 МПа	712 МПа			Цикл. $P_{\text{ц}}$	Стат. $P_{\text{с}}$	Полные $P = P_{\text{ц}} + P_{\text{с}}$
6 циклич.	120/60	536/16,87	407/13,57	3455/114,16	747/24,89	5145/171,49	68,56	0,115	20,727	20,842
9 циклич.	120/60	–	–	3560/118,64	–	3560/118,64	67,88	0,083	7,301	7,384
22 циклич.	120/60	–	–	–	60/2,00	60/2,00	71,41	0,002	1,093	1,095
12 циклич.	0,5/0,5	–	–	48345/6,71	–	48345/6,71	31,63	1,121	0,413	1,534
13 циклич.	0,5/0,5	–	–	45224/6,40	–	45224/6,4	30,56	1,049	0,394	1,442
14 циклич.	20/20	–	–	14600/81,11	–	14600/81,11	69,36	0,339	4,991	5,330
2 повт.-стат.	–	7/30,83	5/25,76	3/11,38	–	15/67,97	71,39	–	0,891	0,891
10 повт.-стат.	–	–	–	4/16,25	–	4/16,25	71,54	–	1	1
11 статический	–	–	–	–	1/1,83	1/1,83	71,46	–	1	1
Расчетные данные	–	98720/4300	54060/140	43130/16,25	34820/1,83	–	–	–	–	–

Увеличение в цикле напряжений длительности выдержки под нагрузкой до  $\Delta\tau_{\max} = 20$  с приводит к значительному росту – до 93,7 % статической составляющей повреждения.

Дальнейшее увеличение длительности выдержки до  $\Delta\tau_{\max} = 120$  с приводит к росту доли статической составляющей повреждаемости до 99,4 и 98,9 % соответственно у образцов № 6 и 9. Следовательно, с целью сокращения длительности испытаний при проведении исследований достаточно использовать циклы нагружения с  $\Delta\tau_{\max}$  и  $\Delta\tau_{\min}$  меньшими 120 с.

5. Расчёты, основанные на модифицированной формуле Мэнсона (3), дают удовлетворительные результаты только при малой длительности нагружения в цикле. При  $\Delta\tau_{\max} = 0,5$  с расхождение с экспериментом составляет в среднем ~7,8 %. При увеличении длительности цикла нагружения ошибка расчёта по формуле (3) становится недопустимо большой: при  $\Delta\tau_{\max} = 20$  с (образец № 14) расчётное количество циклов превышает фактическое в 3 раза, а при  $\Delta\tau_{\max} = 120$  с соответствующие ошибки составляют для образца № 9 более чем в 12 раз и для образца № 22 в 580 раз. В реальных условиях при взлёте длительность действия максимальных нагрузок составляет около 2 минут и оценка долговечности основных деталей по формуле Мэнсона будет давать большую погрешность.

С целью исследования влияния ЭЦУ на малоцикловую долговечность при жёстком нагружении в нормальных условиях были проведены испытания 36 образцов из материала ВТЗ-1, из которого изготавливаются диски компрессора низкого давления. Испытания проводились с периодами  $T = 1$  с и  $T = 26$  с соответственно для треугольного и трапецеидального с  $\Delta\tau_{\max} = 20$  с и  $\Delta\tau_{\min} = 5$  с отнулевых циклов нагружения. Результаты испытаний, приведённые в таблице 2, показывают, что при нормальных или близких к ним условиях и жёстком нагружении действие ЭЦУ понижается.

Таблица 2 – Результаты испытаний

Размах относительных деформаций	Долговечность образцов в циклах	
	Треугольный цикл	Трапецеидальный цикл
0,0065	14480	12170
0,008	10420	8940

## ВЫВОДЫ

1. Гипотеза о линейном суммировании статической и циклической составляющих повреждений не подтверждается.

2. Статическая и циклическая долговечность деталей при повышенной температуре существенно зависит от длительности действия максимальных и минимальных напряжений в цикле нагружения –  $\Delta\tau_{\max}$  и  $\Delta\tau_{\min}$ . Увеличение длительности  $\Delta\tau_{\max}$  с 0,5 до 20 и 120 с снижает число циклов до разрушения, но приводит к значительному росту статической долговечности. Поэтому при разработке программ и проведении эквивалентно-циклических испытаний на МЦУ необходимо учитывать длительность работы деталей на уровне максимальных нагрузок.

3. Предварительное циклическое нагружение – «циклическая тренировка» материала с увеличением длительности действия максимальных напряжений в диапазоне  $\sigma_{\text{мц}} < \sigma_{\max} < \sigma_{0,2}$  существенно повышает длительную прочность и циклическую долговечность деталей в малоцикловой области, что подтверждает существование «эффекта циклического упрочнения». При увеличении уровня максимальных напряжений (в указанном диапазоне) и длительности  $\Delta\tau_{\max}$  их действия «циклическая тренировка» усиливает эффект циклического упрочнения материала.

4. Метод универсальных наклонов (модифицированная формула Мэнсона) не учитывает длительность действия максимальных и минимальных напряжений в цикле нагружения. Для определения области применения этого метода требуется проведение дополнительных исследований.

5. При нормальных условиях и жёстком нагружении действие ЭЦУ уменьшается.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Государственный университет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шереметьев, А.В. Прогнозирование циклической долговечности и установление ресурсов основных деталей авиационных ГТД / Шереметьев А.В. // Материалы X Международного конгресса двигателестроителей. Авиационно-космическая техника и технология, № 8, 2005 г. – С. 5
2. Демьянушко, И.В. Расчёт на прочность вращающихся дисков / И.В. Демьянушко, И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 247 с.
3. Научный вклад в создание авиационных двигателей. В двух книгах. Книга 1 НЗ4 / Колл. авторов; Под общей научной редакцией В.А. Скибина и В.И. Солониной. – М.: Машиностроение, 2000. – 725 с.
4. Кузнецов, Н.Д. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин. [Текст] – М., Машиностроение, 1976. – 216 с.
5. Роней, М. Усталость высокопрочных материалов / М. Роней. [Текст] – в кн.: Разрушение. Т.3 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. С. 471–527.

### Портер Александр Маркович

«ОАО НПО «Сатурн»

Кандидат технических наук, начальник конструкторского отдела АиУР

Тел: (4855)296-012

E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru

### Букатый Станислав Алексеевич

ФГОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва»

Доктор технических наук, профессор

Тел: (4855) 210-374;

+7 9108137542

E-mail: bukaty\_sa@mail.ru

### Округин Александр Александрович

ФГОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва»

Ведущий специалист ОЭП «ОАО НПО «Сатурн», аспирант

Тел: (4855) 296-845;

+7 9611550448

E-mail: aleks.okrugin@mail.ru

### Водолагин Алексей Львович

«ОАО НПО «Сатурн»

Кандидат технических наук, начальник бригады прочности конструкторского отдела АиУР

Тел: (4855) 296-012

E-mail: vodolagin@inbox.ru

---

A.M. PORTER, S.A. BUKATYI, A.A. OKRUGIN, A.L.VODOLAGIN

## RESEARCH OF DURABILITY OF SHAFT AND DISKS GAS-TURBINE ENGINE IN THE CONDITIONS OF JOINT ACTION OF LOW-CYCLIC FATIGUE AND LONG DURABILITY

*In article processes of destruction of details of the gas-turbine engines working in the conditions of joint action of low-cyclic fatigue and long durability at increased temperatures are considered. «The effect of cyclic hardening» the materials, depending on duration of action of the maximum loadings in a loading cycle is established.*

**Keywords:** low-cyclic fatigue, long durability, GTE details, duration of a cycle of loading, intense the deformed condition, effect of cyclic hardening.

## BIBLIOGRAPHY

1. Sheremet'ev, A.V. Prognozirovanie ciklicheskoj dolgovechnosti i ustanovlenie resurov osnovnyh detalej aviacionnyh GTD / Sheremet'ev A.V. // Materialy H Mezhdunarodnogo kongressa dvigatelestroitelej. Avacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija, № 8, 2005 g. – S. 5

2. Dem'janushko, I.V. Raschjot na prochnost' vrawajuwihsja diskov / I.V. Dem'janushko, I.A. Birger. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 247 s.
3. Nauchnyj vklad v sozdanie aviacionnyh dvigatelej. V dvuh knigah. Kniga 1 N34 / Koll. avtorov; Pod obvej nauchnoj redakciej V.A. Skibina i V.I. Solonina. – M.: Mashinostroenie, 2000. – 725 s.
4. Kuznecov, N.D. Jekvivalentnye ispytaniya gazoturbinyh dvigatelej / N.D. Kuznecov, V.I. Cejtlin. [Tekst] – M., Mashinostroenie, 1976. – 216 s.
5. Ronej, M. Ustalost' vysokoprochnyh materialov / M. Ronej. [Tekst] – v kn.: Razrushenie. T.3 / Per. s angl. – M.: Mir, 1976. S. 471–527.

### **Porter Alexander Markovich**

Candidate of Technical Sciences, Chief of Design Department of the Analysis and Management of a Resource "NPO"Saturn" Inc.  
Phone: (4855) 296-012  
E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru

### **Bukatyi Stanislav Alekseevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor of FSEE HPE «Rybinsk State Aviation Technical University University in the name of P.A. Solovyev »  
Phone: (4855) 210-374;  
+7 9108137542  
E-mail: bukaty\_sa@mail.ru

### **Okrugin Alexander Aleksandrovich**

Key Specialist Department of Experimental Strength "NPO"Saturn" Inc., Graduate student of FSEE HPE «Rybinsk State Aviation Technical University University in the name of P.A. Solovyev »  
Phone: (4855) 296-845;  
+7 9611550448  
E-mail: aleks.okrugin@mail.ru

### **Vodolagin Alexey Lvovich**

Saturn" Inc.  
Phone: (4855) 296-012  
E-mail: vodolagin@inbox.ru

Л.А. САВИН, Е.В. СЛИВИНСКИЙ, С.Ю. РАДИН, Е.А. СУЗДАЛЬСКАЯ

**ПОВЫШЕНИЕ ПЛАВНОСТИ ХОДА ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ**

*В статье рассматриваются вопросы колебаний и силового нагружения рессорного подвешивания локомотив, а также рассмотрены вопросы повышения плавности хода пассажирского вагона, снабжённого перспективным гидромеханическим демпфером адаптивного типа.*

*Ключевые слова:* рессорное подвешивание, демпфером адаптивного типа, плавность хода.

Экипажная часть современных локомотивов и пассажирских вагонов обычно состоит из колёсных пар, которые связаны с рамой тележек и кузовом через рессорное подвешивание, представляющим собой систему состоящую из упругих элементов, балансиров, надрессорных балок и элементов, поглощающих энергию колебаний. При прохождении колёсных пар через стыки рельс, детали стрелочных переводов, пучины и т.д. в рессорном подвешивании возникают динамические нагрузки, в том числе и ударные. Появлению динамических нагрузок способствуют так же дефекты колёсных пар, местные пороки поверхности катания, эксцентричная посадка колеса на ось, разбалансировка колёсной пары и т.д. Поэтому, именно рессорное подвешивание, уменьшая ускорения обрессоренного строения и вертикальные нагрузки на него и путь, обеспечивает плавность хода подвижному составу. К основным характеристикам рессорного подвешивания относят суммарную жёсткость ступеней рессорных комплектов, степень демпфирования и распределение демпфирования по ступеням. Демпфирование колебаний осуществляется как в самих элементах подвешивания, так и в специально предназначенных для этого устройствах-гасителях колебаний. В настоящее время наиболее распространёнными и эффективными в эксплуатации являются гидравлические гасители колебаний, принцип действия которых заключается в последовательном перемещении вязкой жидкости поршнем через дроссельные отверстия снабжённые клапанами, в результате чего происходит переход механической энергии в тепловую с последующим её рассеиванием в окружающую среду. Для повышения плавности хода локомотивов и вагонов гидравлические гасители колебаний устанавливаются наклонно во второй ступени рессорного подвешивания, что позволяет гасить не только динамические составляющие вертикальных нагрузок, но и горизонтальных [1,2].

Несмотря на свою эффективность использования такие гасители обладают рядом недостатков и наиболее существенными из них являются – сложность конструкции, за счёт наличия клапанных устройств, а следовательно и низкая надёжность, невозможность в автоматическом режиме изменять свою демпфирующую характеристику, и самое главное то, что в рассеивании энергии не все его детали участвуют в этом процессе.

Учитывая вышеизложенное в ЕГУ им. И.А. Бунина, на кафедре прикладной механики и инженерной графики, совместно с кафедрой мехатроники и инженерный инжиниринг ОрёлГТУ проводится бюджетная НИР на тему «Динамика, прочность и надёжность транспортных, сельскохозяйственных, строительно-дорожных машин и промышленного оборудования, применительно к Чернозёмному региону РФ», и одним из её разделов, является разработка перспективных гидравлических гасителей колебаний для магистральных, маневровых и промышленных локомотивов, а так же пассажирских вагонов и ВСНТ.

Анализ научно-исследовательских отчётов в этой области техники, литературных источников, отечественных, и зарубежных патентов позволил разработать более простую и эффективную конструкцию гидравлического амортизатора, которая может быть использована не только в рессорном подвешивании рельсовых экипажей но и безрельсовых транспортных средствах.

Такая конструкция признана изобретением (RU2371617) и представлена на рисунках, где на рисунке 1 показан гидравлический демпфер в продольном разрезе, на рисунке 2 такой же разрез, но его плоскость расположена повернутой на угол  $180^\circ$ ,

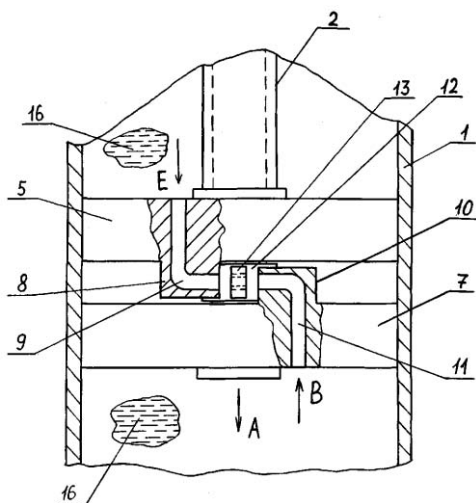


Рисунок 1 - Гидравлический демпфер в продольном разрезе 1

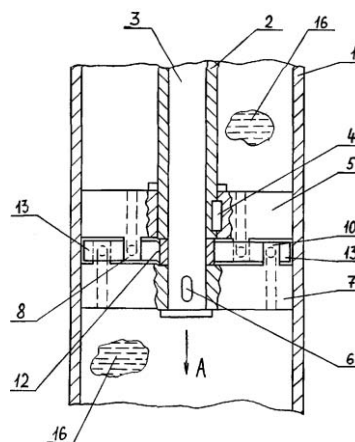


Рисунок 2 - Гидравлический демпфер в разрезе 2

Гидравлический демпфер состоит из рабочего цилиндра 1, в котором расположен полый шток 2 и сплошной шток 3. На полым штоке 2 с помощью шпонки 4 закреплена одна часть поршня 5, а на сплошном штоке 3 также при помощи шпонки 6 установлена другая часть поршня 7. Часть поршня 5 снабжена выступами 8 с расположенными в них изогнутыми под прямым углом каналами 9, другая же часть поршня 7 также имеет выступы 10, в которых выполнены подобные каналы 11. Между частями поршня 5 и 7 подвижно на сплошном штоке 3 установлено лопастное колесо 12, в лопастях 13 которого выполнены отверстия малого диаметра 14 и отверстия большего диаметра 15. В рабочем цилиндре 1 находится рабочая жидкость 16.

Работает гидравлический демпфер следующим образом. При движении штоков 2 и 3, а, следовательно, и частей поршня 5 и 7 по стрелке *A* (рабочий ход гидравлического демпфера), рабочая жидкость 16 перемещается по стрелкам *B* в каналах 9 и 11 и ее поток, истекая под давлением из выступов 10, взаимодействует с лопастями 13 лопастного колеса 12, которое получает угловой поворот по стрелкам *C*. Получив такой угловой поворот, лопасти 13 плотно прижимаются к выступам 8 части поршня 5, что способствует току рабочей жидкости 16 в каналы 9 только через отверстия большего диаметра 15. При этом протекающий объем рабочей жидкости 16 через отверстие 10 является относительно значительным, что способствует возникновению вращающего момента  $T$ , воспринимаемого полым штоком 2. Под действием этого момента происходит упругая угловая деформация полого штока 2 и, следовательно, демпфирование составляющей нагрузки приложенной к демпферу в этом направлении. При движении штоков 2 и 3, а также вместе с ними частей поршня 5 и 7 в направлении обратном стрелке *A* (режим отдачи демпфера), рабочая жидкость 16 поступает в каналы 9 выступов 8 по стрелке *E* и, протекая по ним, взаимодействует с лопастями 13 лопастного колеса 12, поворачивая его по стрелкам *F* примыкая к выступам 10. В этом случае отверстия 14 лопастей 13, имея меньший диаметр, снижают расход жидкости 16, протекающей по каналам 11 выступов 10 в направлении противоположном стрелке *B*, а, следовательно, давление ее возрастает и на части поршня 7 возникает вращающий момент  $T_1$ , который будет по величине большим момента  $T$ . Такой момент обеспечит упругий угловой поворот сплошного штока 3, который повысит эффект гашения нагрузки, действующей в режиме отдачи за счет своей повышенной крутильной жесткости. Далее описанные процессы могут повторяться неоднократно.

Известно [3], что важнейшим эксплуатационным критерием при оценке эффективности работы железнодорожного подвижного состава является показатель плавности хода, особенно для пассажирских вагонов, где комфортность пассажиров имеет важнейшее значение. Проведёнными многочисленными исследованиями в этой области как в нашей стране так и за рубежом установлено, что организм человека по-разному воспринимает колебания возникающие с различными частотами и реакциями на эти колебания проявляются в виде утомления нервной системы и различных болевых ощущений. Наиболее неблагоприятными для человека являются колебания с частотами в пределах 4-6гц, которые оказываются резонансными для человека как механической системы. В тоже время организм человека чувствителен как к ускорениям, так и скорости их изменения, так как они характеризуют инерционность воздействия на человека вызванного ими толчка. Обычно в практике пользуются тремя методами оценки плавности хода это показатель по частоте и ускорениям колебаний кузова рельсового транспортного средства, показатель по времени утомляемости пассажиров и показатель по преобладающим и максимальным ускорениям. В первом случае для оценки плавности хода принята величина  $z_0^3 2\pi n^5$ , представляющая собой произведение наибольшего значения показателя меры интенсивности толчка, на величину энергии колебательного процесса, а энергия колебательного процесса пропорциональна произведению амплитуды  $z_0$  на амплитуду ускорения  $\ddot{z}_m$ , т.е.  $z_0 \ddot{z}_m = z_0^2 2\pi n^2$ . Тогда связь между интенсивностью раздражителя и силой вызывающего им ощущения оценивается величиной параметра  $W$  называемым показателем плавности хода рельсового транспортного средства, который определяется по зависимости  $W = 2,7k^{10}\sqrt{z_0^3 n^5}$ , где  $k$  коэффициент учитывающий влияние частоты и направление колебаний на утомляемость человека.

Второй метод оценки плавности хода основан на повышении утомляемости человека не только от режимов колебаний рельсовых транспортных средств (ускорения, частоты) но и от времени пребывания его в пути следования. Учёт такого фактора позволяет наиболее правильно оценить плавность хода рельсового экипажа. Этот метод основан на экспериментальных исследованиях, проводимых в эксплуатационных условиях с регистрацией параметров колебаний и дальнейшей обработкой их методом математической статистики. В этом случае время утомления определяют по зависимости [3]:

$$T = \frac{2T_0 n}{m_{a1} \frac{1}{\tau_1} + m_{a2} \frac{1}{\tau_2} + \dots + m_{ai} \frac{1}{\tau_i}},$$

где  $T_0 = L/v$  – время движения экипажа со скоростью  $v$  на участке пути длиной  $L$ ;

$1/\tau$  – функции, определяющие время наступления утомляемости человека в процессе колебаний рельсового экипажа.

Как показывают экспериментальные исследования утомление людей находящихся в пути в пассажирских вагонах до 10-12ч,  $T > 6ч$ , а при более суток -  $T > 10-12ч$ .

И третий метод оценки плавности хода подвижного состава основан на том, что ходовые качества рельсовых экипажей в первом приближении могут быть оценены по значениям ускорений или же по величине коэффициентов динамики.

В качестве примера произведём сравнительный расчёт с использованием первого метода оценки плавности хода пассажирского вагона межобластного сообщения собственным весом кузова  $m_k = 43,4тс$  снабжённого серийным амортизатором типа КВЗ, у которого критический коэффициент демпфирования равен  $\alpha = 108кН·с/м$  [2] и перспективным у которого критический коэффициент демпфирования гасителя выполненный по патенту RU2371617

равен  $216 \text{ кН} \cdot \text{с} / \text{м}$  определённый по известной зависимости  $\alpha = \frac{128 \mu \text{лS}^2}{\pi d^4}$ . При этом эквивалентное одноступенчатое рессорное подвешивание у такого вагона в вертикальном направлении, имеет жёсткость  $c_z = 575 \text{ кН} / \text{м}$ , а в поперечном направлении  $c_y = 252 \text{ кН} / \text{м}$  [3].

Применив известные зависимости [3], получим следующие численные значения резонансных амплитуд при воздействии на пассажирский вагон сосредоточенной силы  $F$  и микропрофиля рельсового пути  $h$  вызывающие колебания кузова в вертикальной его плоскости при частоте неблагоприятных для людей колебаний 4-6  $\text{гц}$  при установке в его рессорное подвешивание серийного гидравлического амортизатора и перспективного:

$$z_{0F}^{pez} = \frac{F_0 \sqrt{m_0}}{\alpha \sqrt{c}} = \frac{20 \cdot \sqrt{43,4}}{108 \cdot \sqrt{575}} = 0,05 \text{ м} = 50 \text{ мм}$$

$$z_{0F}^{pez} = \frac{F_0 \sqrt{m_0}}{\alpha \sqrt{c}} = \frac{20 \cdot \sqrt{43,4}}{216 \cdot \sqrt{575}} = 0,025 = 25 \text{ мм}$$

$$z_{0h}^{pez} = \frac{h}{2} \sqrt{1 + \frac{cm_0}{\alpha^2}} = 0,02 \sqrt{1 + \frac{43,4 \cdot 575}{108^2}} = 0,035 \text{ м} = 35 \text{ мм}$$

$$z_{0h}^{pez} = \frac{h}{2} \sqrt{1 + \frac{cm_0}{\alpha^2}} = 0,02 \sqrt{1 + \frac{43,4 \cdot 575}{216^2}} = 0,024 \text{ м} = 24 \text{ мм}$$

Исходя из полученных численных значений резонансных амплитуд вычислим показатель плавности хода  $W$  вагона, который можно определить по зависимости [2]:

$$W = 2,7 k^{10} \sqrt{z_0^3 n^5},$$

$$W_{C1} = 2,7 k^{10} \sqrt{z_0^3 n^5} = 2,7 \cdot 0,85^{10} \sqrt{5,0^3 \cdot 1,15^5} = 3,91$$

$$W_{C2} = 2,7 k^{10} \sqrt{z_0^3 n^5} = 2,7 \cdot 0,85^{10} \sqrt{3,5^3 \cdot 1,15^5} = 3,67$$

$$W_{ПП1} = 2,7 k^{10} \sqrt{z_0^3 n^5} = 2,7 \cdot 0,85^{10} \sqrt{2,5^3 \cdot 1,15^5} = 3,15$$

$$W_{ПП2} = 2,7 k^{10} \sqrt{z_0^3 n^5} = 2,7 \cdot 0,85^{10} \sqrt{2,4^3 \cdot 1,15^5} = 3,16$$

где  $k$  – коэффициент учитывающий влияние частоты и направление колебаний на утомляемость пассажиров выбран в среднем равным 0,85 [2];

$z_0$  – соответствующее значение резонансной амплитуды.

Известно [2], что плавность хода пассажирского вагона тем лучше, чем меньше величина показателя  $W$  и согласно ГОСТ 12406-66 допустимым её пределом для данного вида подвижного состава является величина  $W = 3 \div 3,25$ . Анализ полученных результатов показывает, что при использовании предложенной конструкции гидравлического гасителя колебаний показатель плавности хода пассажирского вагона, составил 3,15 и 3,16, что в среднем соответствует ГОСТ 12406-66. В тоже время он ниже таких же показателей 3,91 и 3,67 плавности хода для подвески с серийным гасителем соответственно в 1,24 и 1,16 раза.

Определим теперь коэффициент сопротивления предложенной конструкции демпфера установленного в рессорном комплекте центрального подвешивания для гашения вертикальных колебаний кузова вагона по известной зависимости [2]:

$$\beta_{1z} = 0,25 \alpha = 0,25 \cdot 216 = 54 \text{ кН} \cdot \text{с} / \text{м}.$$

В тоже время известно [2], что для гашения горизонтальных колебаний кузова рассматриваемого нами пассажирского вагона коэффициент сопротивления демпфера равен 22,9



$\kappa H \cdot c/m$  и тогда коэффициент сопротивления гидравлического гасителя колебаний расположенного наклонно к горизонту, как это имеет место в серийных конструкциях пассажирских вагонов составит  $54 + 22,9 = 76 \kappa H \cdot c/m$ , а угол его установки будет равен

$$\operatorname{tg} \gamma = \sqrt{\frac{\beta_{1Z}}{\beta_{1Y}}} = \sqrt{\frac{54}{22,9}} = 1,53 = 56^{\circ}50'.$$

В заключении следует отметить, что представленные расчёты являются предварительными и не позволяют в полной мере рекомендовать предложенную конструкцию гасителя колебаний к сиюминутному внедрению, так как для этого необходимо изготовление макетного образца перспективного гидравлического демпфера и испытания его в стендовых условиях. Однако на первом этапе его синтеза представляется возможным говорить о его эффективной работе в части повышения плавности хода описанного рельсового экипажа.

Результаты исследования переданы службе технической политики управления ЮВЖД ОАО «РЖД» и рекомендуются как отечественным, так и зарубежным НИИ, конструкторским и в частности производственным структурам тяжёлой промышленности и локомотиво и вагоностроения для дальнейшего изучения и доработки предложенного гидравлического гасителя колебаний с целью возможного внедрения его в практику.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. ред. Н.С. Конарев. – М.: Большая Российская энциклопедия 1994. -559 ст.
2. Челноков, И.И. Гасители колебаний вагонов / И.И. Челноков и др. – М.: Трансжелдориздат, 1963-165с.
3. Вершинский, С.В. Динамика вагона / С.В. Вершинский, Д.Н. Данилов, И.И. Челноков. – М.: Транспорт, 1972 - 304с.
4. Сливинский, Е.В. Перспективная конструкция гидравлического гасителя / Е.В. Сливинский, А.А. Зайцев, С.Ю. Радин //Локомотив. №10,- М.: Транспорт, 2007 - С. 15

### **Савин Леонид Алексеевич**

Госуниверситет – УНПК, г. Орел

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг» г. Орел, Наугорское шоссе, 29

E-mail: savin@ostu.ru

### **Сливинский Евгений Васильевич**

ФГОБУ ВПО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика и инженерная графика»

Тел. +7 (47467) 63931

E-mail: evgeni\_sl@mail.ru

### **Радин Сергей Юрьевич**

ФГОБУ ВПО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

К.т.н., кафедра «Прикладная механика и инженерная графика»

E-mail: radin81@mail.ru

### **Суздальская Ева Анатольевна**

ФГОБУ ВПО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

Ассистент кафедры «Прикладная механика и инженерная графика»

E-mail: suzdal'skaya@rambler.ru

---

L.A. SAVIN, E.V. SLIVINSKII, S.J. RADIN, E.A. SUZDALTSVA

## IMPROVED RIDE PASSENGER CARS

*The report deals with the vibration and force loading spring suspension locomotive, and also consider the increasing smoothness of passenger cars equipped with adaptive damping fluid mechanics perspective type.*

**Keywords:** *spring suspension, adaptive damping type, ride.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Zheleznodorozhnyj transport: Jenciklopedija / Gl. red. N.S. Konarev. – M.: Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija 1994. -559 st.
2. Chelnokov, I.I. Gasiteli kolebanij vagonov / I.I. Chelnokov i dr. – M.: Transzheldorizdat, 1963-165s.
3. Vershinskij, S.V. Dinamika vagona / S.V. Vershinskij, D.N. Danilov, I.I. Chelnokov. – M.: Trans-port, 1972 - 304s.
4. Slivinskij, E.V. Perspektivnaja konstrukcija gidravlicheskogo gasitelja / E.V. Slivinskij, A.A. Zajcev, S.Ju. Radin //Lokomotiv. №10,- M.: Transport, 2007 - S. 15

#### **Savin Leonid Alekseevich**

State University – ESPC

Doctor Sc. Technical, Head of the Department “Mechatronics and International Engineering”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

E-mail: savin@ostu.ru

#### **Slivinsky Yevgeny Vasilyevich**

FSEI HVT " Elets State University of I.A. Bunin "

Doctor of Technical Sciences, professor, head of "Applied Mechanics and Engineering Graphics"

Tel. +7 (47467) 63931

E-mail: evgeni\_sl@mail.ru

#### **Radin Sergey Yurievich**

FSEI HVT " Elets State University of I.A. Bunin "

Candidate of Engineering Science of "Applied Mechanics and Engineering Graphics"

Tel. +7 (47467) 63931

E-mail: radin81@mail.ru

#### **Suzdalskaya Eva Anatolievna**

FSEI HVT " Elets State University of I.A. Bunin "

Assistant of "Applied Mechanics and Engineering Graphics"

E-mail: suzdal'skaya@rambler.ru

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНОВ С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СТЕКЛОФОРМ

*Разработана высокоэффективная комплексная технология получения низколегированного термостойкого чугуна с вермикулярным графитом для деталей, работающих в условиях сложного термомеханического воздействия, в частности деталей стеклоформ. Приведены рекомендации по получению микроструктуры отливок, обеспечивающей высокую эксплуатационную стойкость деталей стеклоформ.*

**Ключевые слова:** чугун, вермикулярный графит, микроструктура, стеклоформа, термостойкость.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Тенденции современного производства чугунных деталей требуют существенного повышения их эксплуатационных свойств, обусловленного значительным ростом контактных термических, химических и механических нагрузок. В связи с этим в последние годы усилился интерес к разработкам, связанным со снижением термонапряжений и повышением усталостной прочности деталей, работающих в агрессивных средах и сложных термомеханических условиях. В подобных условиях эксплуатируются детали формовых комплектов для производства стеклянных изделий.

Проблема повышения эксплуатационной надежности стеклоформ приобретает в настоящее время большое значение и имеет комплексный характер. Однако ее изучение осложняется многообразием факторов, влияющих на изменение структуры и свойств деталей формового комплекта и эффективность их работы. Поэтому необходимо исследование не только температурного состояния стеклоформ, но и изучение материалов, обладающих высокой стойкостью в условиях циклических температурных воздействий. Для успешного решения поставленных проблем необходимо использование современных теоретических методов с учетом конкретных требований, предъявляемых к деталям стеклоформ, и условий их эксплуатации.

### 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ СТЕКЛОФОРМ И ОЦЕНКА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

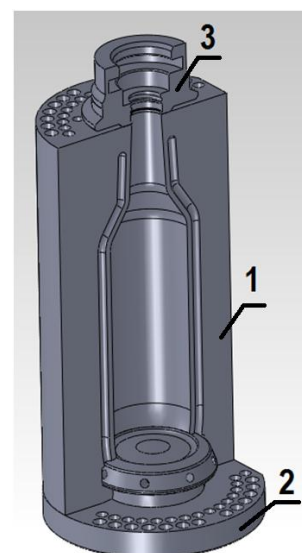
Детали стеклоформ (рис. 1) работают в условиях сложного термомеханического воздействия со стороны стекломассы.

В процессе эксплуатации в стеклоформе возникают значительные термические напряжения вследствие чередующихся резких нагревов при соприкосновении стекломассы с формой и охлаждения.

Кроме знакопеременных термических напряжений в материале формы могут протекать сложные структурные изменения, химические процессы. Основными причинами выхода из строя чугунных деталей при воздействии циклических температурных перепадов является выгорание углерода, рост и интенсивное окисление деталей. Рост чугуна в процессе эксплуатации в сложных термомеханических условиях может достигать 5%. Из-за растяжения, возникающего в металле, основной материал ослабевает около границ графитных включений и дает возможность проникнуть внутрь кислороду.

Подобное нарушение структуры чугуна особенно заметно при переменном нагреве и охлаждении стеклоформы как проявление внутреннего напряжения, особенно у чугуна с малой сопротивляемостью росту.

В процессе циклического нагрева в поверхностных слоях



**Рисунок 1 – Детали формового комплекта для производства стеклофары**  
(1 – полуформа, 2 – поддон, 3 – кольцо горловое)

чугунной стеклоформы происходит обезуглероживание матрицы (при температуре выше 450°C). Интенсивность этого процесса зависит от теплового нагружения формы. Глубина обезуглероживания формы может составлять от 0,2 до 3 мм. В местах частичного или полного выгорания графита создаются благоприятные условия для образования зон окисления различной плотности и глубины залегания. Глубина распространения окислительных процессов зависит во многом от наличия и природы несплошностей в чугуне.

При этом наиболее нагруженным в ходе эксплуатации деталей является поверхностный рабочий слой толщиной от 1 до 10 мм, который испытывает не только значительный тепловой удар при выдуве стеклоизделия, но и подвержен механическому и химическому воздействию стекломассы. В этом слое наблюдается максимальный температурный перепад по толщине стенки детали, а интенсивность теплового удара может превышать 250°C/(мм·с).

Поэтому материалы для деталей стеклоформ, непосредственно соприкасающихся со стекломассой, должны хорошо противостоять термической усталости и коррозии, иметь высокие механические свойства и минимальные структурные превращения при температурах эксплуатации, обладать повышенной ростоустойчивостью и окалиностойкостью, иметь минимальную диффузию отдельных элементов при циклическом воздействии температур, хорошо обрабатываться. Кроме того, теплопроводность материала, определяющая уровень термонапряжений в деталях в ходе эксплуатации, должна быть не менее 40 Вт/м·К.

Все эти свойства зависят, в первую очередь, от технологии изготовления отливок деталей стеклоформ, определяющей микроструктуру литого металла: исходных шихтовых и формовочных материалов, технологии плавки и заливки, условий кристаллизации, теплофизических параметров применяемых холодильников и противопопригарных красок и т.д.

Поэтому задача обеспечения качества стеклоформ сводится к разработке технологических способов управления формированием микроструктуры отливок, обеспечивающих стабильное получение требуемых параметров, химического состава и механических свойств чугуна.

Наиболее распространенным материалом для изготовления деталей стеклоформ на сегодняшний день является чугун с включениями графита пластинчатой формы. Однако, детали, изготовленные из такого чугуна, обладают рядом недостатков: низкой окалиностойкостью и прочностью, слабой ростоустойчивостью. Крупные пластинчатые включения графита в рабочем слое при работе форм постепенно выгорают, что приводит к образованию сетки мелких разгарных трещин на стеклоформирующей поверхности. Полированная поверхность становится шероховатой, теряет блеск. Как известно, пластинчатый графит является концентратором напряжений в металлической матрице, поэтому чугун с таким графитом обладает низкими механическими свойствами, а также плохо сопротивляется образованию трещин и сетки разгара при повышенных температурах и термоциклах.

Детали стеклоформ, изготовленные из чугуна с шаровидной формой включений графита, обладают пониженной теплопроводностью, что также снижает ресурс их работы по причине коробления и трещин, возникающих вследствие высоких термических нагрузок и внутренних напряжений.

Основываясь на данных положениях, в рамках исследовательской работы на ЗАО «Завод «Флак-Орел» пришли к выводу, что оптимальным материалом для производства стеклоформ (в частности предназначенных для изготовления изоляторов) является чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), который является на сегодняшний день наиболее перспективным конструкционным материалом для деталей, работающих в сложных термомеханических условиях (изложниц, блок-картеров, головок цилиндров ДВС, тормозных колодок, выхлопных коллекторов, корпусов турбонагнетателей и т.д.), ввиду оптимального сочетания физико-механических, технологических и эксплуатационных характеристик данного чугуна [1].

## 2 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ

Существующие технологические процессы получения ЧВГ характеризуются более узкими, чем при производстве ВЧШГ, интервалами остаточных концентраций элементов-модификаторов и реализуются в следующих основных вариантах обработки расплава чугуна:

1. одновременно сфероидизирующими и антисфероидизирующими элементами;
2. сплавами на основе РЗМ;
3. магний-цериевыми лигатурами.

Основными элементами, подавляющими формирование шаровидных включений графита, способствуя тем самым получению ЧВГ, являются титан и алюминий.

Титан оказывает отрицательное влияние на образование шаровидного графита, начиная с 0,02%. При содержании титана в чугуна в количестве 0,10...0,15% графит выделяется преимущественно в вермикулярной форме, а при 0,30% и более графит выделяется в виде пластинок.

Алюминий оказывает положительное влияние на стабильность объема чугуна и не повышает его твердости. В окислительной атмосфере на поверхности деталей образуется плотный слой  $Al_2O_3$ , предохраняющий металл от дальнейшего окисления, коррозии. Алюминий несколько повышает теплопроводность чугуна, а также снижает степень отбела (при содержании ~0,1%).

Однако, как показывает опыт производства стеклоформ ЗАО «Завод «Флакс-Орел», содержание алюминия в чугуна в присутствии титана должно быть ограничено вследствие склонности чугунов, легированных алюминием, к образованию водородных газовых пор, скопление которых может привести при определенных условиях к возникновению газовых раковин (рис. 2).

Источниками, увеличивающими остаточное содержание алюминия в чугуна, являются ферросилиций и скрап из раскисленной алюминием стали.

Количество газовых пор при модифицировании чугуна в ковше в зависимости от содержания алюминия в сплаве определяется по следующей формуле [2]:

$$NP = -5,97 + 0,81522(Al)^{1/2},$$

где  $NP$  – количество пор на  $см^2$ ;

$Al$  – содержание алюминия в чугуна,  $ppm^1$

Еще одним недостатком способа получения ЧВГ путем обработки антисфероидизирующими элементами является потенциальная опасность загрязнения возврата титаном, что исключает его применение при производстве высокопрочных чугунов с шаровидным графитом.

Неблагоприятной особенностью модифицирования чугунов модификаторами на основе РЗМ является появление в структуре материала безграфитных областей с включениями свободного цементита, а также так называемого чанкового («chunk» - отколовшийся) графита, приводящих к снижению механических свойств отливок и повышению склонности к горячему растрескиванию. Появление такой структуры объясняется ликвацией РЗМ в объеме расплава, затвердевающие последними [3]. Для устранения подобного дефекта наряду с РЗМ в расплав необходимо вводить примерно 0,02% Sn, являющегося сильным карбидообразующим элементом.

С учетом вышесказанного, в рамках исследовательской работы, проводимой на ЗАО «Завод «Флакс-Орел», было принято решение о применении магний-цериевых модификаторов для стабильного получения чугуна с вермикулярным графитом.

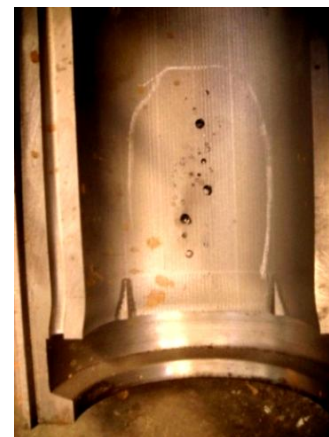


Рисунок 2 – Газовые раковины на рабочей поверхности стеклоформы

### 3 ПОЛУЧЕНИЕ ЗАДАННОГО СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЧУГУНА С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ

Согласно [4], для получения чугуна с вермикулярным графитом остаточное содержание магния должно составлять 0,015...0,022% (рис. 3).

<sup>1</sup> 1 ppm=0,0001%

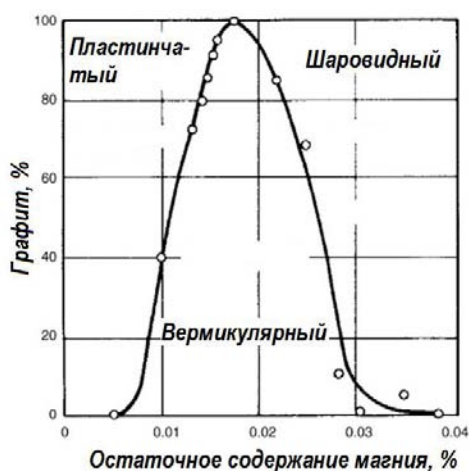


Рисунок 3 – Пределы содержания остаточного магния в чугунах

Наряду с магнием, большое влияние на образование вермикулярного графита оказывает сера. Количество серы, удаляемое в ходе десульфурации, сопровождающей процесс модифицирования, определяется по формуле [2]:

$$\Delta S = \%S - 0,34(\%RE) - 1,34(\%Mg),$$

где  $\%S$  – остаточное содержание серы в чугунах, %;

$\%RE$  – остаточное содержание редкоземельных металлов, %;

$\%Mg$  – остаточное содержание магния, %.

Зависимость между содержанием серы в чугунах и долей образующегося в нем вермикулярного графита, выражается следующим уравнением:

$$\%CG = 278,31 - 8617,55\Delta S,$$

где  $\%CG$  – доля вермикулярного графита в чугунах, %.

Согласно данной зависимости количество серы, необходимое для формирования вермикулярного графита (доля включений шаровидного графита не превышает 30%), должно находиться в пределах от 180 до 250 ppm (0,018...0,025%).

Тогда начальное содержание серы в базовом чугунах с учетом ее остаточного содержания в модифицированном чугунах (0,015%max) не должно превышать 0,040%.

В рамках ЗАО «Завод «Флак-Орел» была подготовлена и реализована программа работ по отработке технологии выплавки и оптимизации химического состава низколегированного чугуна с вермикулярным графитом для деталей стеклоформ.

Чугун выплавляли в индукционной печи емкостью 400 кг. Заливка производилась с модифицированием чугуна в ковше емкостью 50 кг модификатором CompactMag™ (фирма Elkem, Норвегия) (таблица 1) в количестве 0,4%вес от металлоемкости формы. Температура выпуска металла из печи составляла 1450...1470°C. Для стабилизации шлакообразования использовался кварцевый песок (ГОСТ 2138-91), вводимый в расплав в количестве не более 2% от массы шихты. Шихта состояла из:

1. литейного чугуна марки Л6 гр.1;
2. лома стального марки 1А;
3. возврата от ВЧ50;
4. ферросилиция марки ФС75;
5. ферромolibдена марки ФМо60;
6. графита искусственного измельченного.

Массу карбюризатора увеличивали на 5-8% с учетом расхода части его на раскисление металла. Удаление серы из расплава осуществляли присадкой в печь с расплавом кальцинированной соды или карбида кальция.

В качестве термостойкого материала для деталей стеклоформ на основании проведенного теоретического исследования был выбран низколегированный чугун следующего состава (заводская марка ЧФ-8): 3,5...3,8%С, 2,3...2,7%Si, 0,2...0,4%Mn, до 0,015%S, до 0,04%P, до 0,15%Cr, до 0,4%Ni, 0,2...0,4%Mo, до 0,1%Cu, 0,1...0,2%Mg.

По данным проведенных исследований повышение содержания молибдена с 0,1 до 0,4% позволяет повысить эксплуатационную стойкость деталей стеклоформ на 70%. При этом дальнейшее увеличение содержания молибдена не оказывает значительного влияния на термостойкость деталей, но является нецелесообразным с экономической точки зрения.

Полученные отливки подвергались отжигу по режиму, обеспечивающему получение ферритной металлической основы, которая является предпочтительной по причине высоких показателей износо- и окислительной стойкости, ростустойчивости. В ферритном чугунах трещины зарождаются позже и распространяются медленнее, чем в перлитном, что обусловлено как температурной стабильностью ферритной матрицы, так и высокой ее пластичностью. Перлитная

структура неустойчива, особенно в условиях многократного нагрева до высоких температур и охлаждения.

Таблица 1 – Химический состав применяемого модификатора

Si	Mg	PЗМ	Ca	Al	Fe
44-48	5.0-6.0	5.5-6.5	1.8-2.3	1.0max	ост.

В ходе проведения исследовательской работы была установлена зависимость массы модификатора (для получения в чугуна остаточного содержания магния 0,015%) от температуры обрабатываемого расплава и процентного содержания магния в модификаторе, показанная на рисунке 4.

Из графика видно, что влияние температуры расплава на массу вводимого модификатора является незначительным и составляет 9г/10°С для модификатора ФСМг4 при массе обрабатываемого расплава 50 кг.

Температура расплава, подвергаемого модифицированию, является важным фактором. Она должна быть как можно ниже в целях уменьшения пироэффекта и, соответственно, повышения степени усвоения магния и получения его необходимого содержания в чугуна при меньшей массе модификатора. Однако температура расплава не должна быть ниже определенного предела, чтобы обеспечить необходимую жидкотекучесть чугуна, равномерное распределение легирующих элементов благодаря интенсификации конвекционных потоков. Некоторое повышение температуры чугуна необходимо еще и потому, что на нагрев и растворение ковшевых добавок затрачивается теплота жидкого чугуна. При введении 1% различных добавок снижение температуры чугуна составляет 6...10°С [5]. Поэтому температуру чугуна, подвергаемого ковшевой обработке, необходимо строго контролировать.

Отливки стеклоформ изготавливались в разовых песчано-глинистых формах с применением холодильников, получаемых из нелегированного серого чугуна. В целях предупреждения дефектов газового происхождения формы окрашивали краской на спиртовой основе с последующим ее поджиганием. На холодильники также наносили защитное покрытие, предупреждающее приваривание отливки к холодильнику.

Химический состав исследуемого чугуна определяли методом эмиссионного спектрального анализа на приборе ДФС-51.

Модифицирование комплексным магний-цериевым модификатором обеспечивает наиболее стабильные результаты при получении ЧВГ.

Магний выступает как рафинирующая (направленная на десульфурацию чугуна) и модифицирующая добавка. Редкоземельные металлы (церий, лантан), обладающие меньшим сфероидизирующим действием, способствуют получению ЧВГ, а также нейтрализуют действие вредных примесей (Pb, As и др.), формируя устойчивые металлические соединения, оказывающие положительное воздействие на процесс модифицирования в течение всего времени затвердевания отливки.

Благодаря наличию кальция наряду с несколько заниженным содержанием магния, процесс обработки чугуна происходит с меньшим пироэффектом и минимальным дымовыделением.

Было установлено, что церий в составе лигатуры расширяют интервал остаточного содержания магния, при котором происходит образования вермикулярного графита в чугуна. Этот интервал составляет 0,012...0,026%Mg при содержании в чугуна 0,03%Ce.

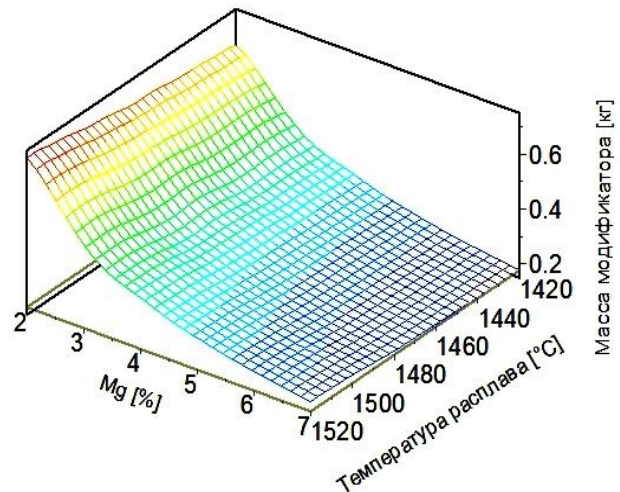


Рисунок 4 – Зависимость массы вводимого модификатора от содержания в нем магния и температуры обрабатываемого расплава

Однако церий является элементом, тормозящим графитизацию чугуна [3]. Поэтому для получения бескарбидной структуры ЧВГ и с целью устранения отбела после ввода модификатора проводилась обработка расплава ферросиликобарием ФС65Ва4.

Для повышения степени усвоения магния температура металла при выпуске в ковш была несколько снижена (до 1450°С), что в итоге привело к сокращению не только расхода модификатора, но и уменьшению газонасыщенности расплава.

### ВЫВОДЫ

Результаты исследований микроструктуры (табл. 2) показали, что навеска модификатора ComrastMag™ в объеме 0,4%вес. обеспечивает формирование преимущественно графита вермикулярной формы по всему объему отливки (рис. 5).

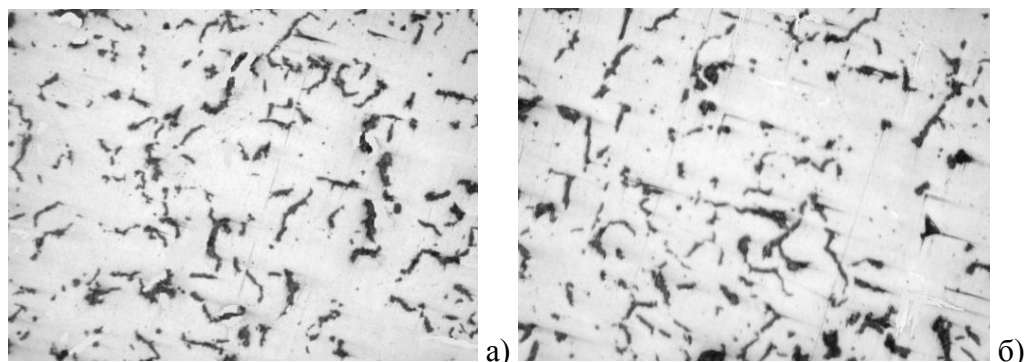


Рисунок 5 – Микроструктура опытных отливок,  $\times 100$ : а – на глубине 20 мм, б – на глубине 25 мм от поверхности, формируемой внешним холодильником

При этом 93% отливок содержали в структуре 97...100% феррита. У части отливок (7%) феррит составлял 75...96%, остальное – перлит.

Таблица 2 – Микроструктура опытных отливок

№ образца	Микроструктура (по ГОСТ 3443-87)
1	ВГф3 - ВГр2 - ВГ92 - Ф94
2	ВГф2 - ВГр1 - ВГ92 - Ф
3	ВГф2 - ВГр1 - ВГ98 - Ф
4	ВГф3 - ВГр1 - ВГ92 - Ф

Таким образом, по результатам исследований была разработана и в рамках ЗАО «Завод «Флакс-Орел» внедрена комплексная технология, позволяющая получить в условиях мелкосерийного производства отливки с необходимой структурой и оптимальными эксплуатационными свойствами, обеспечивающими повышение стойкости деталей стеклоформ на 25-30% по сравнению с ранее выпускаемыми деталями.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таран, С.Б. Повышение термической выносливости материалов поршней форсированных двигателей [Текст] / С.Б. Таран, О.В. Акимов, А.П. Марченко // Литейное производство, №12, 2010. – с.9-12.
2. Elbel, T. Influence of Al and Ti on microstructure and quality of compacted graphite iron castings [Текст] / T. Elbel, J. Hampl // Metallurgy, vol.48, 2009. – p.243-247.
3. Болдырев, Д.А. Технология получения чугуна с вермикулярным графитом в отливках при внутриформенном модифицировании сплавами Fe-Si-PЗМ [Текст] / Д.А. Болдырев, С.В. Давыдов // Литейщик России, №1, 2009. – с.24-27.
4. Davis, J.R. Cast irons [Текст] / J.R. Davis. – ASM International, 1996. – 494 p.
5. Клецкин, Г.И. Чугунное литье в станкостроении [Текст] / Г.И. Клецкин, Г.Г. Абрамов, И.М. Воловик. – М.: Машиностроение, 1975. – 320 с.



**Александров Максим Валерьевич**

Госуниверситет-УНПК, г. Орел  
Аспирант кафедры «Автопласт»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.8-960-694-34-22  
E-mail: aleksandrov86@live.ru

**Корнев Лев Павлович**

Госуниверситет-УНПК, г. Орел  
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автопласт»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.8-953-623-29-25

M.V. ALEXANDROV, L.P. KORENEV

**TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF COMPACTED GRAPHITE  
CAST IRONS FOR GLASS MOULDS**

*The chemical composition of low-alloy heat-resistant compacted graphite cast iron for parts exposed to complex thermo-mechanical conditions, such as glass moulds, is presented. Technology of production of developed cast iron is described. Guidelines for achieving the casting microstructure providing high durability of glass moulds are given.*

**Keywords:** cast iron, compacted graphite, microstructure, glass mould, heat resistance.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Taran, S.B. Povyshenie termicheskoj vynoslivosti materialov porshnej forsirovannyh dvigatelej [Tekst] / S.B. Taran, O.V. Akimov, A.P. Marchenko // Litejnoe proizvodstvo, №12, 2010. – s.9-12.
2. Elbel, T. Influence of Al and Ti on microstructure and quality of compacted graphite iron castings [Tekst] / T. Elbel, J. Hampl // Metallurgy, vol.48, 2009. – p.243-247.
3. Boldyrev, D.A. Tehnologija poluchenija chuguna s vermikuljarnym grafitom v otlivkah pri vnutrifornennom modifizirovanii splavami Fe-Si-RZM [Tekst] / D.A. Boldyrev, S.V. Davydov // Litejvik Rossii, №1, 2009. – s.24-27.
4. Davis, J.R. Cast irons [Tekst] / J.R. Davis. – ASM International, 1996. – 494 p.
5. Kleckin, G.I. Chugunnoe lit'e v stankostroenii [Tekst] / G.I. Kleckin, G.G. Abramov, I.M. Volovik. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 320 s.

**Aleksandrov Maksim Valerievich**

State University-ESPC  
Post-graduate student of the Department «Autolayer»  
302020, str. Orel, Naugorskoe shosse, 29  
Tel.8-960-694-34-22  
E-mail: aleksandrov86@live.ru

**Korenev Lev Pavlovich**

State University-ESPC  
Candidate of technical Sciences, Professor of the chair «Автопласт»  
302020, str. Orel, Naugorskoe shosse, 29  
Tel.8-953-623-29-25

# МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.9.011

С.К. АМБРОСИМОВ, А.Н. БОЛЬШАКОВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕКУЧЕСТИ ПРИ ВЫХОДЕ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ИЗ ЗОНЫ ОБРАБОТКИ

*В статье приводятся теоретические и экспериментальные исследования напряжений текучести возникающих в зоне выхода режущей кромки из зоны обработки при свободном ортогональном резании*

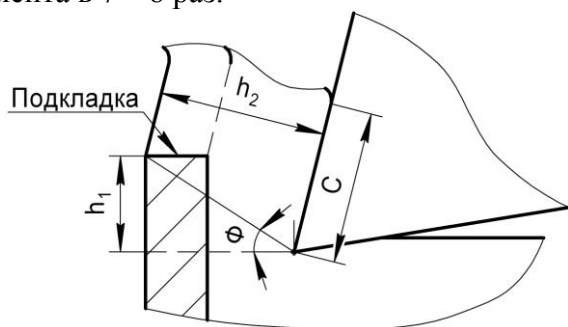
**Ключевые слова:** выход режущего зуба из зоны обработки, напряжение текучести.

### ВВЕДЕНИЕ

Большое влияние на стойкость металлорежущего инструмента оказывают условия выхода режущей части из зоны обработки. На сегодняшний день этот процесс недостаточно изучен и представляет интерес.

В работе [1] представлена теоретическая модель процесса свободного ортогонального прерывистого резания в зоне выхода режущего клина из заготовки, а также методика расчёта напряжений, действующих на режущий клин. При моделировании разгрузочного удара было сделано несколько предположений и допущений [1] позволяющих математически описать этот процесс, а также доказать резкое увеличение напряжений в зоне выхода зуба из зоны обработки, используя общеизвестную схему резания с условной плоскостью сдвига.

В работе [2], для снижения напряжений возникающих при разгрузочном ударе использовалась чугунная пластина, плотно прижатая к торцу заготовки (рис. 1), обрабатываемой протягиванием, таким образом, процесс выхода режущих зубьев протяжки происходил не в материале заготовки, а в чугунной пластине снижая напряжения, за счет чего достигалось увеличение стойкости твердосплавной протяжки более чем в 10 раз. В работе [3] автор, также применял чугунные подкладки на выходе инструмента из зоны обработки для процесса торцового фрезерования, что по данным автора, позволяет повысить стойкость инструмента в 7 – 8 раз.



**Рисунок 1 – Принципиальная схема применения подкладки**

На основе разработанной авторами [1] модели произведены приближённые вычисления нормального давления, действующего на режущий клин при его выходе из зоны обработки высоколегированной стали 08X17T, являющейся аналогом стали 12X18H9T (X18H9T), упоминаемой в работе [3].

Вычисления проводились в интервале значений коэффициента усадки стружки  $K_c = 2 \dots 3$ , а для чугуна  $K_c = 1,2 \dots 1,5$  [4], для зубьев с передним углом  $\gamma = 0^\circ$ , задним углом  $\alpha = 5^\circ$ , со скоростью резания  $v_{рез} = 1,0$  м/с, и толщиной срезаемого слоя  $h_1 = 1$  мм при минимальной толщине срезаемого слоя на выходе 0,005 мм по выражению [5]:

$$\sigma = 1,155 \cdot \sigma_s \cdot \left[ 0,5 + \mu \cdot 1 - \operatorname{tg} \gamma + \frac{u}{K_c} \cdot \left( \frac{\mu}{u \cdot \cos \gamma} + 0,5 \right) \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести;

$\mu$  – коэффициент трения по напряжению текучести (предельная величина  $\mu$  равна 0,5);

$u$  – безразмерный коэффициент, равный  $u = 1$  при  $\gamma \geq 0$  и  $u = 1 - \sin \gamma$  при  $\gamma < 0$ ;

Результаты вычислений нормального давления составляют: для вышеуказанной стали 2529-3865 МПа, для чугуна СЧ 20 – 482-589 МПа. Можно сделать заключение, что для стали

нормальное давление в 4,3-8 раз выше по сравнению с чугуном, что объясняет значительное повышение стойкости твердосплавного инструмента, полученное в экспериментах, описанных в работах [2] и [3] и более точно поясняет эффективность применения чугунной подкладки чем выдвинутое в работе [2] объяснение связывающее это снижение с хрупкостью чугуна. В качестве подкладки можно использовать пластину из любого материала, для которого нормальное давление, действующее на острие режущего клина, в момент выхода его из зоны обработки будет меньше, соответствующего давления обрабатываемого материала. Так, при замене чугунной подкладки на свинцовую, нормальное давление на режущий клин при его выходе будет 86МПа, что в 29-45 раз ниже по сравнению со сталью 08Х17Т. Т.е. эффект разгрузочного удара будет проявляться в подкладке, а величина возросшего напряжения будет обусловлена её материалом.

Для подтверждения построенной модели была проведена серия экспериментов, в которых использовались цилиндрические образцы из стали 20 с пазом прямоугольного профиля параллельным оси и чередующимися кольцевыми канавками, образующими бурты. Ширина бурта (глубина резания) меньше ширины главной режущей кромки отрезного резца для обеспечения условий свободного резания.

Напряжение текучести для процесса прерывистого свободного ортогонального резания при различных значениях скорости резания, переднего угла  $\gamma$  и толщины срезаемого слоя были получены методом измерения микротвердости на поверхности стружки. Для этого из образцов стружки для каждого режима резания были изготовлены микрошлифы по известной методике [6]. Измерения микротвёрдости производились на микротвердомере ПМТ-3 на поверхности образца стружки со стороны, прилегающей к передней поверхности резца.

В работе [7] приведён график зависимости напряжения текучести от твёрдости по Виккерсу (см. рис. 2) кривая 1.

Известный график [7] (кривая 1) рисунок 2 ограничен значением микротвёрдости 1770 МПа, что не позволяет оценить значение напряжения, соответствующее большим значениям микротвёрдости, полученным при проведении данных экспериментов. Для этого получена аппроксимационная зависимость напряжения текучести от микротвердости, при значениях микротвердости от 1770 до 4984 МПа, соответствующим экспериментальным значениям, которая имеет вид:  $\sigma_s = -416,42 + 0,5323 \cdot HV$ , на рисунке 2 представлена в виде прямой 2.

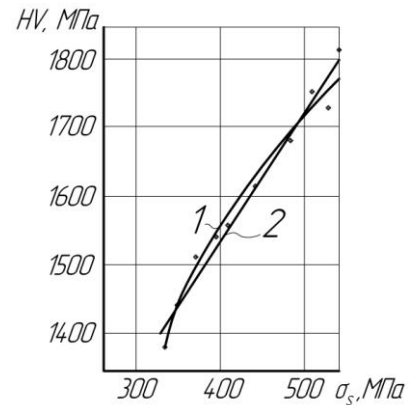


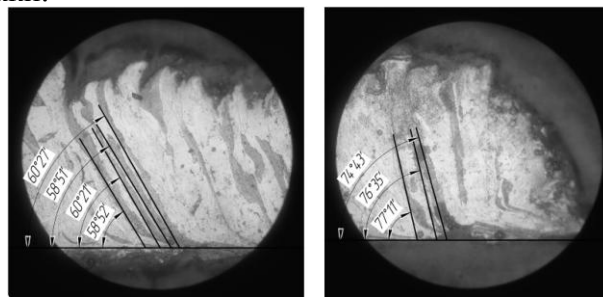
Рисунок 2 – Связь между твёрдостью по Виккерсу и напряжением текучести стали 20

Расчитанный по фотографиям текстуры стружки (рис. 3) угол наклона условной плоскости сдвига  $\Phi$  в зоне выхода меньше на 24 % по сравнению с зоной установившегося резания и принят одинаковым для всех экспериментов. Угол наклона условной плоскости сдвига  $\Phi$  связан с углом между касательной к прирезцовой стороне стружки и направлением текстуры  $\chi$  следующими зависимостями:

$$\psi = 90^\circ - \hat{O} - \chi - \gamma ; \tag{2}$$

$$ctg\psi = tg \hat{O} - \gamma + ctg\hat{O} + 1; \tag{3}$$

где  $\psi$  – угол текстуры стружки.

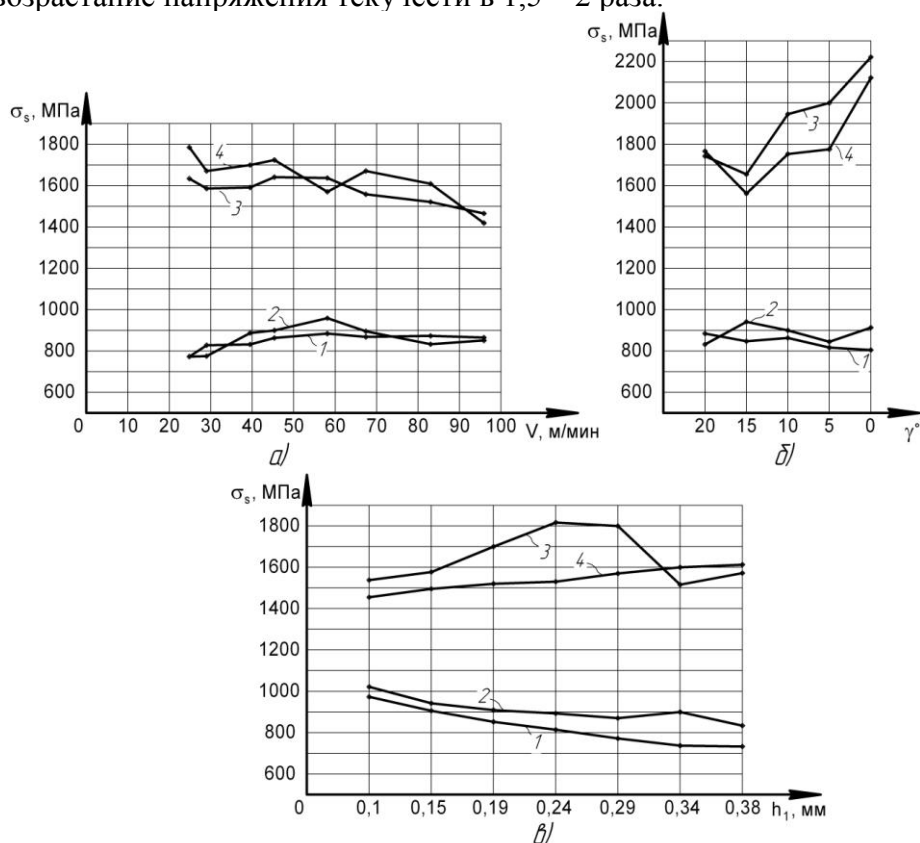


а)

б)

Рисунок 3 – Фотографии для определения угла наклона текстуры  $\psi$  стружки соответствующие зонам а – установившегося резания; б – зоне выхода режущего клина из заготовки

По результатам экспериментов построены графики напряжений текучести, представленные на рисунке 4, из которых видно, что при выходе режущего клина из зоны обработки происходит возрастание напряжения текучести в 1,5 – 2 раза.



**Рисунок 4 – Зависимость напряжения текучести**

*а – от скорости резания; б – от переднего угла  $\gamma$ ; в – от толщины срезаемого слоя; 1, 2 – на участке установившегося резания; 3, 4 – на участке выхода режущего клина из зоны обработки. Кривые 1 и 3 получены теоретическим расчётом, 2 и 4 экспериментально*

Такое значительное возрастание напряжения текучести приводит к возрастанию внутренних напряжений в режущем клине, и к его повышенному износу.

### ВЫВОД

Теоретическая модель расчёта нормального напряжения, действующего на режущий зуб при его выходе из зоны обработки подтверждена экспериментально и доказывает возникновение разгрузочного удара, приводящего к резкому возрастанию напряжения.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Государственный университет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбросимов, С.К. Динамические изменения происходящие в процессе резания при разгрузочном ударе [Текст] / С.К. Амбросимов, А.Н. Большаков // ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ сборник трудов 2 – ой Международной научно – практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 525 с.
2. Чигодаев, Н.Е. Повышение стойкости твердосплавных протяжек на основе уменьшения выкрашивания зубьев в краевой зоне обрабатываемой детали. Диссертация на соискание учёной степени кандидат технических наук [Текст] / Н.Е. Чигодаев. Пермь, 2007. – 139 с.
3. Симонян, М.М. Влияние ударных воздействий и адгезионных явлений на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании [Текст] / М.М. Симонян, М.О. Навоян, К.С. Кочарян // Вестник машиностроения. – 2006, №9. – С.67 – 69.
4. Рубенштейн, С.А. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент [Текст] / С.А. Рубенштейн, Г.В. Левант, Н.М. Орнис, Ю.С. Тарасевич. М.: Машиностроение, 1968. – 392 с.
5. Воронцов, А.Л. Разработка новой теории резания. 5. Определение кинематического, напряжённого и деформационного состояния обрабатываемой заготовки [Текст] / А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-Заде, Ю.А. Албагачиев // Вестник машиностроения – 2008, №5. С.61 – 69.

6. Вашуль, Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов [Текст] / Х. Вашуль.: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1988. – 320 с.
7. Дель, Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости [Текст] / Г.Д. Дель. М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.

**Амбросимов Сергей Константинович**

ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. 8 (4742) 74-39-36

**Большаков Алексей Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
Тел: 8-951-305-36-62  
E-mail: atbasarets@mail.ru

S.K. AMBROSIMOV, A.N. BOLSHAKOV

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH THE YIELD STRESS  
IN A MOMENT OUTLET CUTTING EDGE FROM THE ZONE  
OF TREATMENT**

*In this article represented theoretical and experimental research the yield stress in a moment outlet cutting edge from the zone of treatment during free orthogonal cutting process.*

**Keywords:** *a moment outlet cutting edge from the zone of treatment, yield stress.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Ambrosimov, S.K. Dinamicheskie izmenenija proishodjavie v processe rezanija pri razgruzochnom udare [Текст] / S.K. Ambrosimov, A.N. Bol'shakov // INNOVACII V MASHINOSTROENII sbornik trudov 2 – oJ Mezhdunarodnoj nauchno – prakticheskoj konferencii / pod red. V.Ju. Bljumenshtejna – Kemerovo: KuzGTU, 2011. – 525 s.
2. Chigodaev, N.E. Povyshenie stojkosti tverdosplavnyh protjazhek na osnove umen'shenija vykrashivanija zub'ev v kraevoj zone obrabotyvaemoj detali. Dissertacija na soiskanie uchjonnoj stepeni kandidat tehniceskikh nauk [Текст] / N.E. Chigodaev. Perm', 2007. – 139 s.
3. Simonjan, M.M. Vlijanie udarnyh vozdejstvij i adgezionnyh javlenij na stojkost' tverdosplavnogo instrumenta pri preryvistom rezanii [Текст] / M.M. Simonjan, M.O. Navojan, K.S. Kocharjan // Vestnik mashinostroenija. – 2006, №9. – S.67 – 69.
4. Rubenshtejn, S.A. Osnovy uchenija o rezanii metallov i rezhuvij instrument [Текст] / S.A. Ruben-shtejn, G.V. Levant, N.M. Ornis, Ju.S. Tarasevich. M.: Mashinostroenie, 1968. – 392 s.
5. Voroncov, A.L. Razrabotka novoj teorii rezanija. 5. Opredelenie kinematičeskogo, naprjazhjonogo i deformacionnogo sostojanija obrabotyvaemoj zagotovki [Текст] / A.L. Voroncov, N.M. Sultan-Zade, Ju.A. Albagachiev // Vestnik mashinostroenija – 2008, №5. S.61 – 69.
6. Vashul', H. Praktičeskaja metallografija. Metody izgotovlenija obrazcov [Текст] / H. Vashul': Per. s nem. – M.: Metallurgija, 1988. – 320 s.
7. Del', G.D. Opredelenie naprjazhenij v plasticheskoj oblasti po raspredeljoniju tvjrdosti [Текст] / G.D. Del'. M.: Mashinostroenie, 1971. – 200 s.

**Amdrosimov Sergey Konsnantinovich**

Lipetsk state technical university, Lipetsk  
Doc.Sc. Tech., Professor.  
Phone. 8 (4742) 74-39-36

**Bolshakov Alexey Nicolaevich**

Lipetsk state technical university, Lipetsk  
Postgraduate student of chair of machine building technology  
Phone. 8-951-305-36-62  
E-mail: atbasarets@mail.ru

## К ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ ВИБРОУПРОЧНЯЮЩИХ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*В статье рассматривается необходимость, возможность и пути создания виброупрочняющих станков с числовым программным управлением. Приведен фрагмент программный интерфейс для проектирования режимов работы вибростанка.*

**Ключевые слова:** виброударное упрочнение, числовое программное управление.

### ВВЕДЕНИЕ

В авиационной и ракетостроительной отраслях машиностроения при производстве деталей сложной формы, содержащих обрабатываемые поверхности с недоступным расположением, наиболее эффективным, а порой и единственным методом ППД является виброударное упрочнение (ВУ). Особенности данных деталей является ограничение по массе, а также использование высокопрочных материалов, чувствительных к концентраторам напряжений. Применение станков виброударного упрочнения резонансного типа сталкивается с невозможностью технологического обеспечения равномерной обработки таких деталей, т.к. отсутствует возможность управления траекторией колебания контейнера, что приводит к короблению и разбросу эксплуатационных характеристик. На сегодняшний день не сформулированы нормативные требования к допускам на режимы упрочнения, стабильность формы траектории и амплитуды колебаний. Нет численных методов расчета и конструирования, оценки стабильности и надежности работы вибростанков. Вместе с этим научная база для решения этих проблем имеется [1-3]. Решить проблему технологической стабильности, а, следовательно, и повышения надежности деталей, возможно лишь за счет станков нового типа, позволяющим осуществлять управление технологическим процессом.

Основная идея при создании вибростанков состоит в том, что при упрочнении деталей сложной формы, необходимо, чтобы каждый элементарный участок наружных и внутренних поверхностей детали получал необходимую порцию энергетического виброударного воздействия, за счет периодических соударений с ними инструментальной среды.

Для того, чтобы реализовать эту идею, необходимо следующее:

1. решить задачу контроля и управления над процессом виброударного упрочнения;
2. обеспечить амплитуду скоростей колебаний от 70-80 до 100-120 см/с;
3. реализовать ступенчатую и/или плавную регулировку амплитуды и смену траектории колебаний контейнера и детали;
4. гарантировать ресурс работы вибростанков не менее 2000-2500 часов машинного времени;
5. осуществить автоматизацию и механизацию основных и вспомогательных процессов;
6. обеспечить соблюдение нормативных требований по уровню шума и вибрации.

Значительное изменение амплитуды и траектории движения контейнера возможно лишь в близкорезонансной области. Близость резонанса во время работы предъявляет жесткие требования к сбалансированности и устойчивости таких станков. В силу отсутствия серьезной практики разработки и применения станков близкорезонансного типа необходим системный подход к проектированию и разработке данного оборудования. Для этого:

1. работу вибростанка необходимо реализовывать в близкорезонансном режиме;
2. конструктивная схема вибростанка должна быть динамически уравновешенной;
3. компоновка вибростанка должна обеспечивать управление амплитудой на всех этапах движения периода колебаний.
4. должны быть предусмотрены средства автоматического поддержания стабильности параметров колебаний в пределах допустимых значений за счет конструктивного исполнения и/или аппаратного обеспечения.

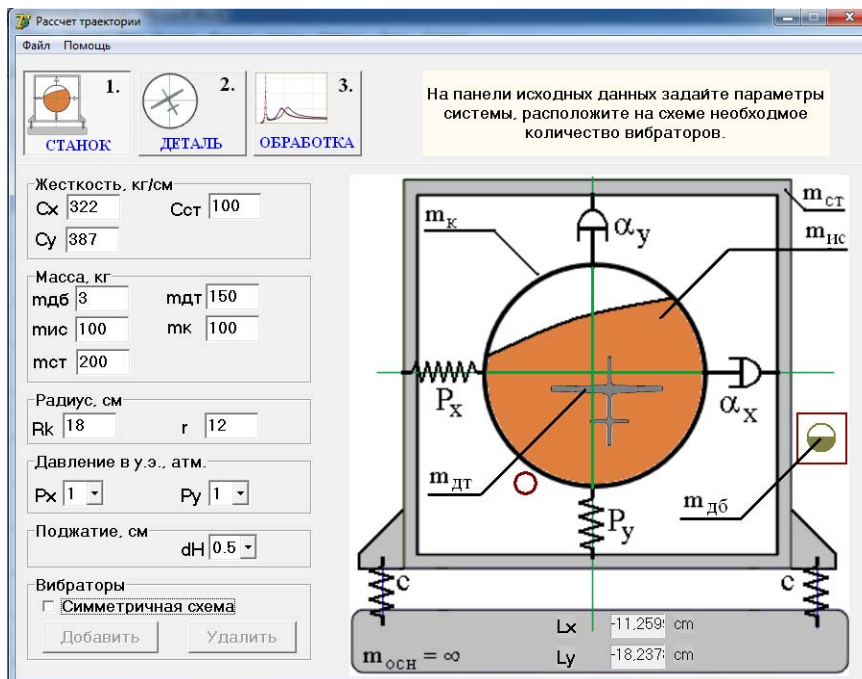


Рисунок 1 – Установка параметров динамической системы

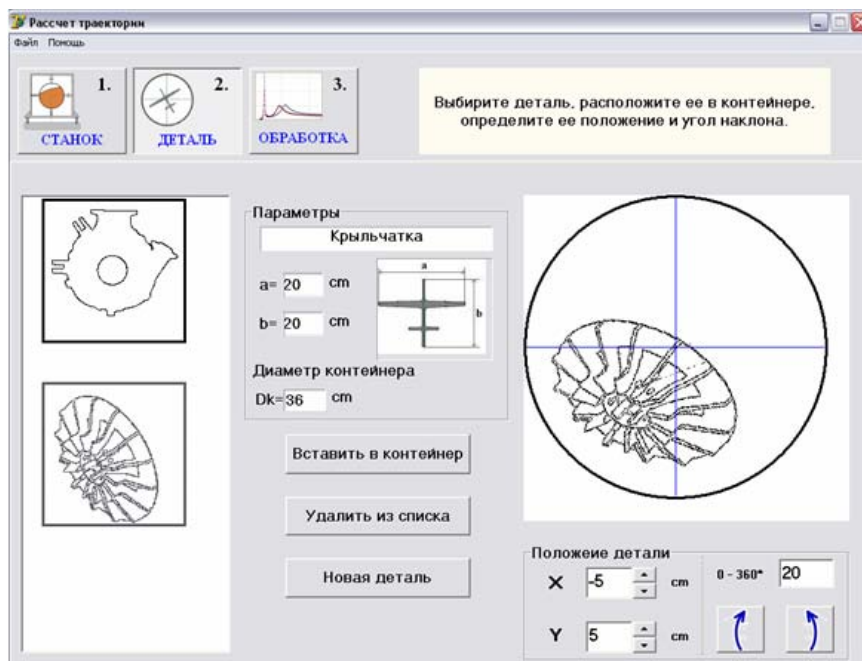


Рисунок 2 – Выбор и расположение детали в контейнере

Для проектирования режимов работы, базирования детали в контейнере, заполнения инструментальной средой внутренней полости детали или контейнера разработана программа, реализующая аналитическую модель [2] динамики вибростанка. Через пользовательский интерфейс задаются параметры модели: жесткость упругих элементов и контейнера, масса детали, контейнера, инструментальной среды и др. (рис. 1). Существует возможность выбора места расположения эксцентрикового вибратора. Далее пользователь должен выбрать контур исследуемой детали и разместить ее в контейнере (рис. 2). Пред началом моделирования необходимо на схеме станка с деталью расставить точки, для которых будет осуществляться моделирование траектории. При нажатии кнопки «Старт» происходит расчет и осуществляется визуализация динамики траектории выбранной точки (рис. 3). Интерфейс позволяет подробно рассмотреть вид траектории на поле с масштабом 1см/деление. Также для выбранной точки можно получить амплитудо-фазо-частотные характеристики (рис. 4).

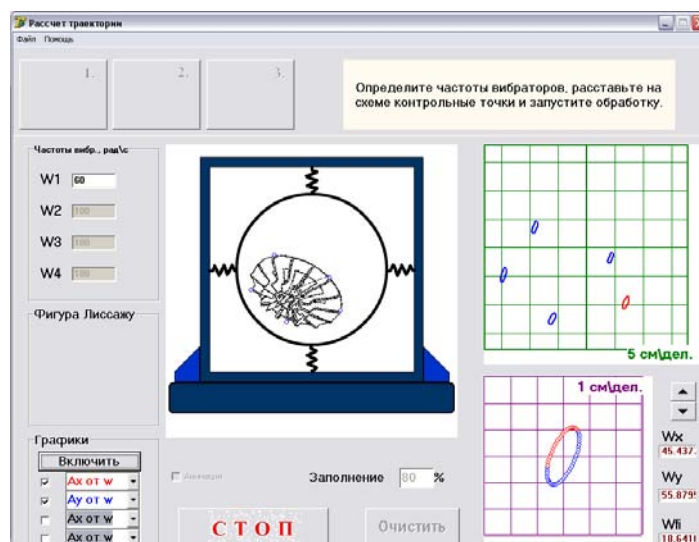


Рисунок 3 – Синтез траекторий колебаний выбранных точек

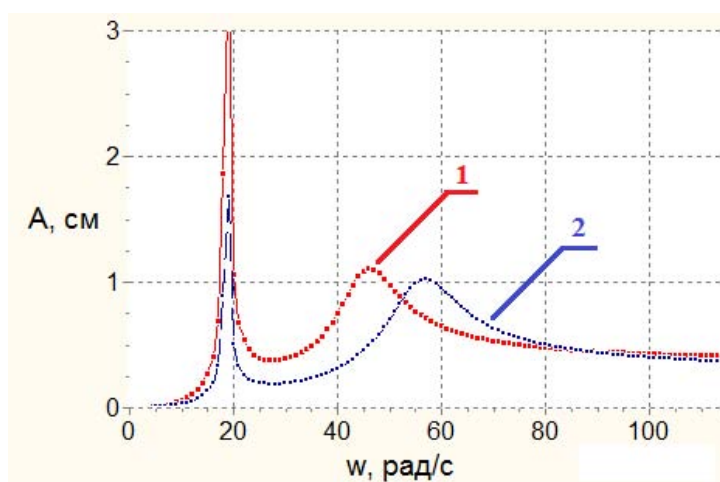
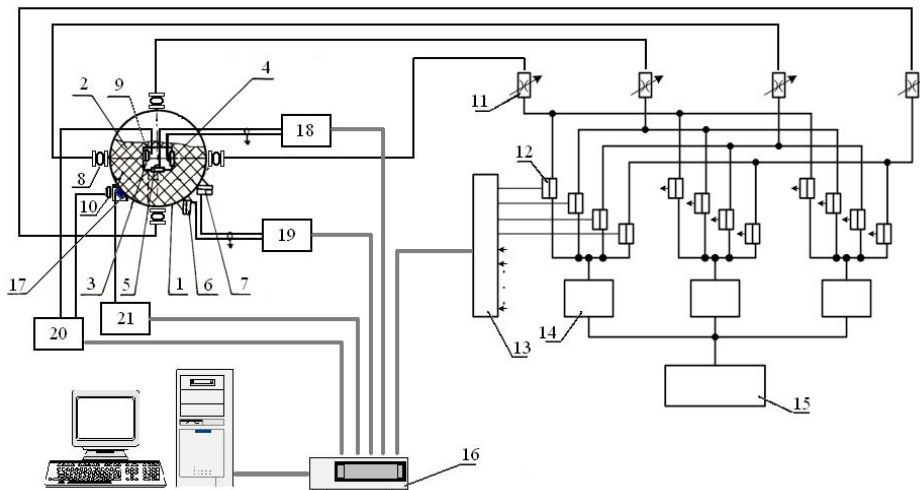


Рисунок 4 – Амплитудно-частотные характеристики колебаний вдоль горизонтальной (1) и вертикальной (2) оси

В качестве воздействующего элемента в близкорезонансных станках применяются пневмоупругие элементы [1], позволяющие при одной частоте вибратора с изменением жесткости смещать резонансный пик колебаний. Использование таких элементов вдоль трех координат позволяет осуществлять управление траекторией движения контейнера. Тем не менее, практика показала, что управление, заданное жестким алгоритмом, хоть и позволяет выдержать заданную траекторию, но не обеспечивает необходимое качество обработки. Это связано в первую очередь с отсутствием жесткой кинематической связи инструмента (рабочей среды) со станком (контейнером) и обрабатываемой деталью, что обеспечивает при одинаковых исходных условиях различный результат. Применение пожатия [1] в качестве средства динамического управления обрабатываемыми свойствами инструментальной среды позволяет улучшить стабильность обработки, но не снимает вопрос качественного упрочнения всех поверхностей деталей сложной формы. Решение проблемы повышения качества обработки связано с адаптивным управлением процессом виброударного упрочнения при условии обеспечения устойчивости в близкорезонансной области под воздействием дестабилизирующих факторов. Такими дестабилизирующими факторами являются: монотонное и скачкообразное изменение массы подвижной системы (до 25-30%), виброударное гашение амплитуд колебаний за счет периодических соударений вибрирующей инструментальной среды с контейнером и деталью. В результате этого технологические параметры обработки деталей могут изменяться в сторону ухудшения. Суть адаптивного управления заключается в постоянном контроле над параметрами технологической системы и своевременной выработке управляющих воздействий, возвращающих систему в нужный режим, что не всегда возможно осуществить вручную. Числовое программное управление (ЧПУ) позволяет автоматизировать технологический процесс качественного виброударного упрочнения.





**Рисунок 5 – Схема контроля и управления траекторией колебаний и параметрами соударений инструментальной среды с деталью**

- 1 – контейнер; 2 – рабочая среда; 3 – обрабатываемая деталь; 4, 5 – датчики соударения; 6, 7 – датчики виброускорений; 8 – пневмоупругий элемент; 9, 10 – акустические датчики; 11 – регулируемый дроссель; 12 – электроклапан; 13 – блок мощных электрических ключей; 14 – регулятор давления; 15 – компрессор; 16 – микроконтроллерное устройство; 17 – датчик температуры; 18, 19, 20, 21 – аппаратура усиления и согласования сигнала

Представленная на рисунке 5 схема реализована на основе двух систем: управления и контроля за инструментальной средой, и контроля за состоянием обрабатываемых деталей. Первая система работает следующим образом. Программное управление виброударной системой «деталь - инструментальная среда - станок» реализуется за счет переключения по алгоритму заранее установленных при настройке параметров обработки – давления воздуха в пневмоупругих элементах по координатам управления. При этом программное обеспечение с ПК через микроконтроллерное устройство 16 подает управляющие сигналы на блок мощных ключей 13, включая таким образом соответствующие электроклапаны 12, что позволяет изменить давление в пневмоупругих элементах 8. Состояние вибросистемы фиксируется датчиками соударения 4 и 5, а также датчиками виброускорений 6 и 7. Через аппаратуру согласования 18 и 19 аналоговый сигнал с датчиков поступает на АЦП микроконтроллера 16, который передает информацию в ПК. Таким образом осуществляется управление и контроль параметрами соударений. Экстремальное управление реализуется за счет пошагового поиска и удержания оптимальных параметров технологической системы в зоне экстремальных значений посредством экстремального оптимизатора со встроенной логикой.

Вторая система представлена датчиками акустических колебаний 9 и 10, датчиком температуры 17, и аппаратурой согласования и усиления 20 и 21. Усиленный сигнал с акустических датчиков после оцифровки на АЦП микроконтроллера 16, поступает в ПК. Из полученных данных, посредством быстрого преобразования Фурье, формируется спектр акустических колебаний. Характер изменения спектра и температуры со временем определяется состоянием обрабатываемых деталей, что позволяет программным образом влиять на систему управления и контроля за инструментальной средой, с целью выбора оптимальных режимов обработки.

Таким образом, станок, удовлетворяющий перечисленным требованиям, может быть создан на основе следующих критериев:

1. управление траекторией движения контейнера возможно только в близкорезонансной области, поскольку только здесь незначительное изменение жесткости упругих элементов сопровождается заметным изменением амплитуды колебаний вдоль соответствующей степени свободы;

2. близкорезонансные режимы работы сопровождаются повышенными амплитудами движения, что приводит к увеличению воздействия на фундамент; снизить данное отрицательное воздействие может уравнивание рабочего органа по всем трем координатам;

3. динамическая схема станка строится по трехмассной модели (рис. 1): первая масса – станина ( $m_{ст}$ ), вторая – контейнер, прикрепленная к нему деталь и дебалансный вибратор ( $m_k + m_{дг} + m_{дб}$ ), третья – инструментальная среда ( $m_{ис}$ ); задача уравнивания решается размещением центра масс рабочего органа (контейнер+деталь+среда) в геометрическом центре приложения жесткости упругих элементов (рис. 1);

4. компоновка станка включает в себя: эксцентриковый вибратор, пневмоупругие элементы, систему пневмоагрегатов управления, аппаратуру согласования, микроконтроллерное устройство, ПК (рис. 5).

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов, Ю.Р. Виброударное упрочнение [Текст]. / Ю.Р. Копылов // Воронеж: Изд.-во ВГУМВД. – 1999. – 386 с.
2. Копылов, Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения [Текст]. / Ю.Р. Копылов // Воронеж: Научная книга. – 2011. – 569 с.
3. Сергиев, А. П. Отделочная обработка в абразивных средах [Текст]: Монография / А. П. Сергиев // Старый Оскол: Научное издание. – 1998. – 220 с.

**Копылов Юрий Романович**

ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»  
Доктор технических наук, профессор,  
Тел: 8-4732-70-27-20  
E-mail: urkopulov@mail.ru

**Кожевников Алексей Александрович**

ФГОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения»  
Кандидат физико-математических наук, доцент,  
Тел: 8-909-211-0674  
E-mail: akozhev@yandex.ru

---

Y.R. KOPYLOV, A.A. KOZHEVNIKOV

## TO PROBLEM OF CREATION OF VIBROCONSOLIDATING MACHINE-TOOLS WITH PROGRAMMATIC MANAGEMENT

*In the article possibility of creation of vibroshock work-hardening machine-tools is examined with numerical control. A programmatic interface over is brought for planning of the modes of operations of vibromachine-tool.*

**Keywords:** vibroshock hardening, programmatic management.

### BIBLIOGRAPHY

- 1.Kopylov, YR Vibro-impact hardening [text]. / YR Kopylov // Voronezh Ed.of VGUMVD. - 1999. - 386 p
- 2.Two. Kopylov, YR The dynamics of the processes of hardening vibroshock[text]. / YR Kopylov / Voronezh Science. - 2011. - 569 p.
- 3.Three. Sergiev, AP Finishing in abrasive environments [Text] Monograph /AP Sergiev / Old Oskol: Scientific publication. - 1998. - 220.

**Kopylov Yuri Romanovich**

«Voronezh state technical university»  
Doc. sc. tech., professor,  
Phone: 8-4732-70-27-20  
E-mail: urkopulov@mail.ru

**Kozhevnikov Alexey Aleksandrovich**

«Moscow state university of railway engineering (MIIT)»  
Can. sc. phys. and math.,  
Phone: 8-909-211-0674  
E-mail: akozhev@yandex.ru

М.В. ПЕСИН

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ ГОРНЫХ МАШИН, НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВОГО И БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*В статье рассматривается опыт российских предприятий в обеспечении и повышении надежности деталей с резьбовой поверхностью, испытывающей значительные нагрузки. Выявлены экономический эффект и актуальность применения технологии упрочнения высоконагруженных поверхностей резьбового соединения.*

**Ключевые слова:** упрочнение, резьба, резьбовое соединение, переводники буровых труб.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что детали нефтегазовых изделий испытывают значительные нагрузки, так вращающийся буровой инструмент внедряется в породу под действием осевой нагрузки, а также ударов, наносимых с помощью специальных механизмов с определенной частотой. Основной проблемой в применении вращательно-ударного способа бурения является недостаточная работоспособность буровых труб и, прежде всего, соединительных узлов, которая приводит не только к необходимости увеличения производства и расхода стали, но и вызывает большие потери времени на замену вышедших из строя труб. В связи с этим необходимо разработать такую конструкцию соединительного узла и его резьбовое соединение, которое позволило бы увеличить работоспособность колонны труб и повысить производительность труда при бурении скважин [1]. Таким образом, проблема повышения надежности резьбовых соединений буровых колонн является одной из актуальных в современном мире.

Далее рассмотрим буровую колонну, которая является связующим звеном между долотом, находящимся в забое скважины и буровым оборудованием, расположенным на поверхности. Она предназначена для подвода энергии (механической, гидравлической, электрической) к долоту, обеспечения подачи бурового раствора к забою, создания осевой нагрузки на долото, восприятия реактивного момента долота и забойного двигателя. Резьбовые соединения являются «узлами», связывающими между собой элементы буровой колонны, испытывающие значительные эксплуатационные нагрузки. Так при проектировании резьбовых соединений буровых колонн к ним предъявляют ряд требований, обусловленных необходимостью обеспечения прочности, долговечности, герметичности, быстроты свинчивания и др. Указанные требования привели к преимущественному применению конических резьб для соединения буровых труб [2].

Как правило, все эти резьбы во всем мире выполняются по стандартам Американского Института Нефти (API). Аналогичные по назначению резьбы, выполненные по отечественному ГОСТу, имеют некоторые параметры резьбы, отличные от резьб API. Главным преимуществом конической резьбы является ее герметичность [3]. В России существует стандарт на наружную и внутреннюю коническую замковую резьбу, применяемую в соединениях элементов буровой колонны: замков (для буровых труб), ведущих буровых труб, переводников различного назначения, утяжеленных буровых труб (УБТ), погружных забойных двигателях, шарошечных и лопастных долот, алмазных долот и коронок. Государственный Стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 50864-96 разработан и внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 242 «Допуски и средства контроля». Утвержден и внедрен Постановлением России от 5 марта 1996 г. №150.

Различаются буровые трубы: ведущие, обычные, утяжеленные [5, 6 и 7]. Классификация резьб на ведущих буровых трубах показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация резьб на ведущих бурильных трубах

Ведущая бурильная труба – предназначена для передачи вращения от ротора к бурильным трубам. Представляют собой толстостенную трубу, имеющую в сечении квадратную, шестигранную или крестообразную форму с концентрично расположенным круглым или квадратным отверстием для прохода бурового раствора. Наиболее распространены ведущие трубы с квадратным сечением. Обычные бурильные трубы (БТ) – из стальных или алюминиевых сплавов цельнотянутые круглого поперечного сечения, соединяются между собой при помощи бурильных замков или полузамков со специальной крупной конической резьбой. Концы бурильных труб утолщают для увеличения их прочности. УБТ составляют основную часть колонны [8, 9, 10, 11, 13 и 14] схема представлена на рисунке 2. Утяжеленная бурильная труба (УБТ) – стального или квадратного поперечного сечения; они также соединяются при помощи резьбы и служат для увеличения жесткости нижней сжатой части колонны, поддержания колонны бурильных труб в растянутом состоянии и создания нагрузки на породоразрушающий инструмент [4, 12 и 13]. Резьбовые соединения утяжеленных труб показаны на рисунке 3. Резьбовые соединения используют в таких деталях, как замки бурильных труб, предназначенных для соединения в колонну бурильных труб, в зависимости, от конструкции которых имеют разные типы.

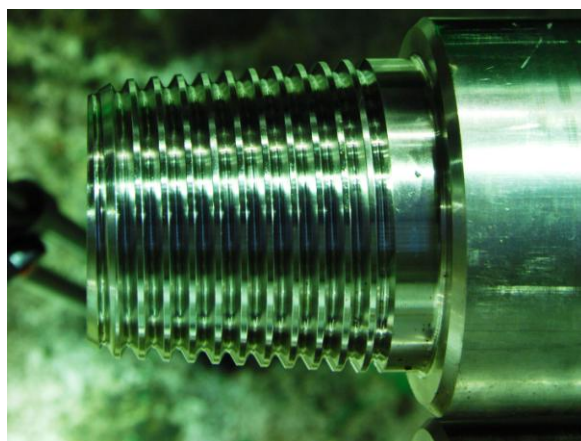
Замки состоят из замкового ниппеля с наружной резьбой и замковой муфты с внутренней крупной резьбой. Для соединения с бурильными трубами на замковых деталях нарезана мелкая трубная резьба. Для цельнозамковых сварных труб замок вместо трубной резьбы имеет хвостовик.

Переводники для бурильных скважин представляют собой разновидность соединительных элементов бурильной колонны. Применяют пять основных типов переводников. Их подразделяют на две группы: штанговые - для соединения трубы бурильной ведущей с вертлюгом и бурильными трубами; промежуточные - для соединения других элементов колонны. По конструкции, материалам и размерам переводники для колонн бурильного инструмента имеют много общего с бурильными замками, а замковые резьбы их одни и те же. Также резьбовые соединения применяют в забойном двигателе, буровом долоте, долото и головках бурильных алмазных.

Таким образом, представлена широкая гамма изделий, где используются резьбовые соединения, для изготовления основных их размеров ЗАО «Пермская компания нефтяного машиностроения» разработаны технологические процессы упрочнения высоконагруженных резьбовых поверхностей соединительных переводников бурильных и других изделий. Проведены научно-исследовательские работы по упрочнению замковых резьб УБТ, ВБТ и ТБТ. Изготовлены опытно-промышленные партии и проводятся испытания винтовых забойных двигателей.



*Рисунок 2 – Утяжеленная бурильная труба*



*Рисунок 3 – Ниппельная часть утяжеленной бурильной трубы*

Повышение качества труб УБТ в их замковой части также обеспечивает большой экономический эффект. Обрыв трубы (в большинстве случаев это связано с поломкой в замковой части трубы) приводит к возможной потере колонны бурильных труб и телеметрической аппаратуры - это убытки в размере 30-40 млн. рублей.

Далее рассмотрим классификацию резьбовых соединений бурильных колонн по производителям рисунок 4.

Для специалистов в области строительства скважин не является секретом, что до распада Советского Союза в мире параллельно существовали две школы бурения скважин – американская и советская. Одним из основных отличий школ было применение турбобуров при бурении скважин в России и бурение роторным способом в США. Отсюда и различные требования к трубам и оборудованию скважин. В силу технологических особенностей роторного способа бурения на Западе наибольшим спросом пользуются высокопрочные бурильные трубы с пределом текучести 931МПа и более, в то время как в России рынок бурильных труб до недавнего времени состоял в основном из труб групп прочности Д и Е.



*Рисунок 4 – Классификация резьбовых соединений бурильных колонн по производителям*

С приходом на отечественный рынок буровых услуг иностранных подрядчиков с передовыми технологиями горизонтального бурения и заканчивания скважин структура спроса на бурильные трубы изменилась, и сегодня сегмент высокопрочных труб занимает уже около 70% данного рынка. Кроме того, к бурильным трубам, учитывая их высокую стоимость, предъявляются дополнительные требования в части нанесения внутренних гладкостных покрытий, армирования бурильных замков противоизносной наплавкой, удлиненными бурильными замками [2].

Вывод. Суммируя вышеизложенное, можно утверждать о высокой актуальности применяемых в ЗАО «ПКНМ» технологий упрочнения высоконагруженных резьб для соединения труб используемых для бурения скважин.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков, И.А. Формирование упругих волн в волноводах при ударе по ним полукатеноидальными бойками: дис. канд.техн. наук. / И.А. Жуков. – Томск, 2005. – 132с.
2. Сароян, А.Е. Проектирование бурильных колонн / А.Е. Сароян. – М.: «Недра», 1971. – 181с.
3. www. Remiz-99.ru/it/catalog
4. Каталог «Бурение» [Электронный ресурс] / Режим доступа: www. bur.oilru.ru
5. НГС Холдинг [Электронный ресурс] / Режим доступа: www. Ngsholding.ru.
6. Комплексное нефтяное снабжение [Электронный ресурс] / Режим доступа: www. kngc.ru.
7. Трубы бурильные [Электронный ресурс] / Режим доступа: www. Gazneftnet.ru.
8. Тяжелая и обрабатывающая промышленность [Электронный ресурс] / Режим доступа: www. Promti.ru.

9. ГОСТ Р 50278-92 Трубы бурильные с приваренными замками. Технические условия. – Введ. 1994-01-01. – 16 с.
10. ГОСТ Р 51245-99 Трубы бурильные стальные универсальные. Общие технические условия. – Введ. 2000-01-01. – 10 с.
11. <http://www.drillings.ru/utiagel>
12. ГОСТ 5286-75 Замки для бурильных труб. – Введ. 1978-01-01. – 26 с.
13. Газпром ВНИИГАЗ [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www.Tmk-group.ru](http://www.Tmk-group.ru).
14. [www.Vamservices.com/library/files/639\\_RUSSIAN\\_VAM\\_Book\\_Blue.pdf](http://www.Vamservices.com/library/files/639_RUSSIAN_VAM_Book_Blue.pdf).
15. Руководство по эксплуатации VAM.

**Песин Михаил Владимирович**

ЗАО «Торговый дом ПКНМ» г. Пермь (ЗАО «Пермская компания нефтяного машиностроения» г. Краснокамск), Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)  
Кандидат технических наук, доцент, первый заместитель директора по нефтепромысловому оборудованию, доцент кафедры «Технология машиностроения» Пермского государственного технического университета  
Тел. (342) 265-15-22, 265-06-70, 263-11-52  
E-mail: M.Pesin@mail.ru

M.V. PESIN

## INCREASE OF RELIABILITY OF CARVING CONNECTIONS OF OIL-AND-GAS PRODUCTS

*Experience of the Russian enterprises in maintenance and improvement of quality of a superficial layer pumps of API Specification 11 AX and subs, accuracy of performance of the sizes, and increases in durability high-load surfaces is shown. Economic benefit and a urgency of application of technology of hardening of carving connection are revealed.*

**Keywords:** *hardening, groove, carving connection, subs drill pipes*

### BIBLIOGRAPHY

1. Zhukov, I.A. Formirovanie uprugih voln v volnovodah pri udare po nim polukatenoidal'nymi bojkami: dis. kand.tehn. nauk. / I.A. Zhukov. – Tomsk, 2005. – 132s.
2. Sarojan, A.E. Proektirovanie buril'nyh kolonn / A.E. Sarojan. – M.: «Nedra», 1971. – 181с.
3. [www.Remiz-99.ru/it/katalog](http://www.Remiz-99.ru/it/katalog)
4. Каталог «Burenie» [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.bur.oilru.ru](http://www.bur.oilru.ru)
5. NGS Holding [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.Ngsholding.ru](http://www.Ngsholding.ru).
6. Kompleksnoe neftjanoe snabzhenie [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.kngc.ru](http://www.kngc.ru).
7. Truby buril'nye [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.Gazneftnet.ru](http://www.Gazneftnet.ru).
8. Tjazhelaja i obrabatyvajuwaja promyshlennost' [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.Promti.ru](http://www.Promti.ru).
9. GOST R 50278-92 Truby buril'nye s privarennymi zamkami. Tehnicheskie uslovija. – Vved. 1994-01-01. – 16 s.
10. GOST R 51245-99 Truby buril'nye stal'nye universal'nye. Obwie tehnicheskie uslovija. – Vved. 2000-01-01. – 10 s.
11. <http://www.drillings.ru/utiagel>
12. GOST 5286-75 Zamki dlja buril'nyh trub. – Vved. 1978-01-01. – 26 s.
13. Gazprom VNIIGAZ [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.Tmk-group.ru](http://www.Tmk-group.ru).
14. [www.Vamservices.com/library/files/639\\_RUSSIAN\\_VAM\\_Book\\_Blue.pdf](http://www.Vamservices.com/library/files/639_RUSSIAN_VAM_Book_Blue.pdf).
15. Rukovodstvo po jekspluatacii VAM.

**Pesin Mikhail Vladimirovich**

Deputy Director CJSC Trading house PKNM (Perm Oil Engineering Company), State National Research Polytechnical University of Perm  
Can. Sc. technic., Deputy Director for oil production equipment associate Prof. of the department «Technological of Machine building», Perm  
Phone: (342) 265-15-22  
E-mail: M.Pesin@mail.ru

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Приведены экспериментальные данные по сравнительной оценке обрабатываемости керамических материалов на основе корунда и карбида кремния*

**Ключевые слова:** керамический материал, шлифование, обрабатываемость, скорость снятия материала, затраты энергии на шлифование, эффективная мощность, шероховатость.

Высокие твердость, прочность, модуль упругости, износостойкость в аэро- и гидроабразивной среде при одновременно химической стойкости, низкая плотность по сравнению с металлами - все это позволяет широко применять изделия из керамики в различных областях техники - в химическом и сельхозмашиностроении, нефтяной и газовой отрасли, в спецтехнике.

Затраты на механическую обработку при обеспечении требуемого качества обработанных поверхностей любых материалов, определяются их физико-механическими свойствами, которые совокупно, в конечном итоге, характеризуются обрабатываемостью [1, 2, 3].

В лабораторных условиях Санкт-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ) проведена оценка обрабатываемости ряда керамических материалов.

Образцы керамических материалов представлены ООО «АЛОКС», технологи-материаловеды которого имеют многолетний опыт разработок и освоения производства специальных керамических материалов и изделий на их основе. На базе отечественных материалов и оборудования разработана технология и освоено производство изделий из корундовой керамики различного назначения. Ряд физико-механических параметров керамических материалов ООО «АЛОКС» марок АЛ на основе корунда приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Основные физико-механические свойства корундовых материалов

№. п/п	Свойства	Ед. изм.	Корундовый материал		
			АЛ1	АЛ3	АЛ1М
1.	Содержание $Al_2O_3$	%	97,0	94,0	95,0
2.	Плотность	г/см <sup>3</sup>	3,85	3,70	3,91
3.	Пористость открытая	%	0	0	0
4.	Модуль упругости	ГПа	340	310	375
5.	Скорость звука	м/с	9600	9300	9800
6.	Твёрдость	HV	15,0	14,2	18,0
		HRA	89	88	90
7.	Прочность при: - изгибе	МПа	250	300	400
	- сжатии		1500	1800	2100
8.	Вязкость разрушения	МПа·м <sup>1/2</sup>	3,8	4,2	5,6

Оценка обрабатываемости выполнялась на заточном станке мод. 3М642, оснащённом специальным приспособлением для обеспечения требуемого усилия прижима шлифуемого образца к рабочей поверхности круга. При испытаниях образец сечением 10x15 мм прижимался к периферии круга с усилием 60 Н, что обеспечивало давление в зоне контакта, равное 0,4 МПа (4 кгс/см<sup>2</sup>). Образец располагался большей стороной сечения вдоль образующей



круга. Скорость шлифования – 14,6 м/с. Использовался алмазный круг 1А1 125х16х32х5 характеристики АС6 125/100 100 В24, производства ОАО «Абразивы и шлифование». Оценка обрабатываемости шлифованием производилось с использованием масла «Индустриальное 20А» (И-20А), которое подавалось в зону обработки контактным методом с расходом 100+20 капель/мин. Для сравнения в таблице 2 приведены данные по обрабатываемости твердого сплава ВК8.

При проведении экспериментов измерялись:

- размер сошлифованной части материала, а затем рассчитывалась приведенная к 1 мм ширины образца скорость удаления (сошлифовывания) материала  $Q_m$ , мм<sup>3</sup>/(мм·мин);
- параметр шероховатости шлифованной поверхности  $Ra$ , мкм. Для измерений использовался профилометр Г – 148 мод. 283 завода «Калибр»;
- эффективная мощность шлифования  $N$ , а затем рассчитывались затраты энергии на удаление материала  $\mathcal{E}$ , Дж/мм<sup>3</sup>. Измерение мощности выполнялось ваттметром Metrix – 120.

Полученные экспериментальные данные вместе с 95% доверительными интервалами представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры обрабатываемости керамических материалов

Наименование материала	Скорость снятия материала $Q_m$ , мм <sup>3</sup> /(мм·мин)	Шероховатость $Ra$ , мкм	Затраты энергии на сошлифовывание материала $\mathcal{E}$ , Дж/мм <sup>3</sup>
АЛ1	7,1±0,4	0,84±0,06	64±4
АЛ1М	1,4±0,1	0,53±0,03	267±14
АЛ3	3,6±0,2	0,66±0,06	118±8
АЛ3 *	2,5±0,2	0,60±0,03	142±11
АЛС	0,79±0,07	0,54±0,03	451±23
SiC спеченный	4,5±0,3	0,57±0,03	130±11
SiC самосвязанный	3,4±0,3	0,59±0,04	159±12
БК-33	2,0±0,1	0,66±0,06	165±14
Твердый сплав ВК8	0,72±0,07	0,57±0,02	693±31

\*после специальной обработки

Наиболее существенно обрабатываемость характеризуют скорость снятия материала и затраты энергии на этот процесс.

Из приведенных данных следует, что высокой обрабатываемостью обладают материалы АЛ1, АЛ3, SiC спеченный и самосвязанный. Низкая обрабатываемость характерна для АЛ1М, АЛС и твердого сплава ВК8. Для материалов АЛ1, АЛ3, АЛ1М на рисунке 1 показана зависимость между их вязкостью разрушения и затратами энергии на сошлифовывания единицы объема материала.

Таким образом, установлен высокий уровень корреляции [5] скорости снятия материала и особенно затрат энергии на шлифования с вязкостью разрушения, а также прочностью на изгиб и сжатие.

Следует отдельно подчеркнуть, что абразивная износостойкость керамических материалов хорошо коррелируется с величинами обратными скорости снятия (сошлифовывания) материала и затратами энергии на этот процесс.

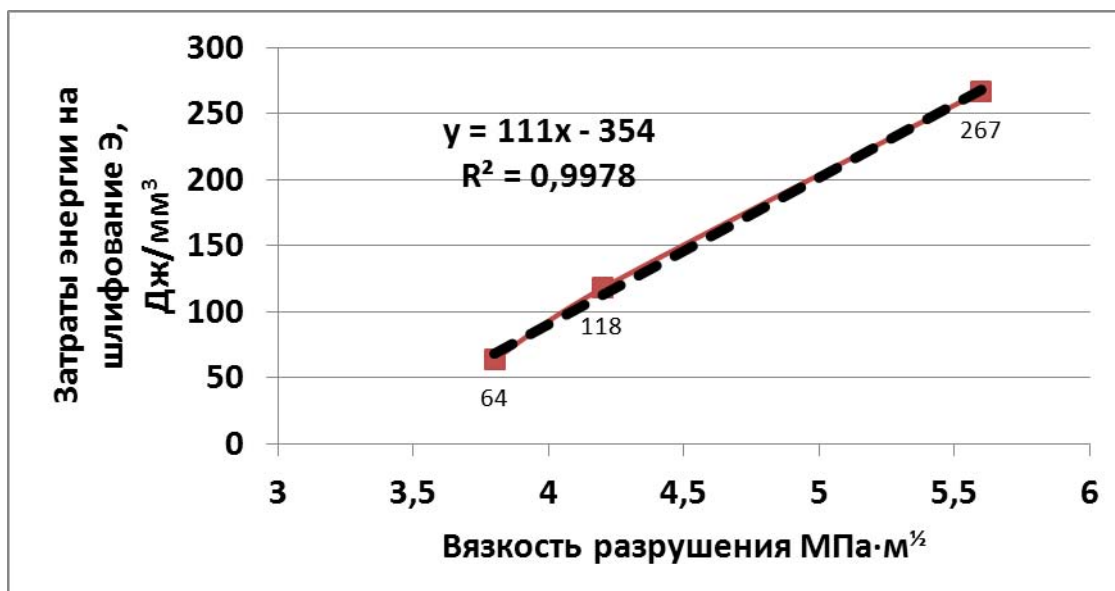


Рисунок 1 – Влияние вязкости разрушения на затраты энергии при шлифовании корундовых материалов

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Кремень, З.И. Технология шлифования в машиностроении / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин. – СПб.: Политехника, 2007. – 424 с.
3. Юрьев, В.Г. Влияние продолжительности обработки керамики алмазными лентами на показатели процесса / В.Г. Юрьев // Инструмент и технологии. 2000, № 2...3. – С. 34...35.
4. Зубарев, Ю.М. Современные инструментальные материалы: учебник / Ю.М. Зубарев. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 224 с.
5. Стратиевский, И.Х. Абразивная обработка: справочник / И.Х. Стратиевский, В.Г. Юрьев, Ю.М. Зубарев. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.

#### Юрьев Валентин Григорьевич

Санкт-Петербургского института машиностроения  
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология автоматизированного производства»  
E-mail: yurev\_mv@rambler.ru

#### Зубарев Юрий Михайлович

Санкт-Петербургского института машиностроения  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология автоматизированного производства»  
E-mail: kafedra.tap@yandex.ru

#### Зайцев Геннадий Петрович

ООО «АЛОКС»  
Кандидат технических наук, с. н. с.  
E-mail: GPZaitcev@mail.ru

V.G. YURIEV, Y.M. ZUBAREV, G.P. ZAITCEV

## COMPARATIVE APPRECIATION OF CERAMIC MATERIAL MACHINING

*There are some experimental data for comparative appreciation of ceramic material machining on the basis of corundum and silicon carbide given in the article*

**Keywords:** *ceramic material, grinding, machining, material removal rate, expenditure of energy for grinding, effective power, roughnes.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Maslov, E.N. Teorija shlifovanija materialov / E.N. Maslov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 319 s.
2. Kremen', Z.I. Tehnologija shlifovanija v mashinostroenii / Z.I. Kremen', V.G. Jur'ev, A.F. Baboshkin. – SPb.: Politehnika, 2007. – 424 s.
3. Jur'ev, V.G. Vlijanie prodolzhitel'nosti obrabotki keramiki almaznymi lentami na pokazateli processa / V.G. Jur'ev // Instrument i tehnologii. 2000, № 2...3. – S. 34...35.
4. Zubarev, Ju.M. Sovremennye instrumental'nye materialy: uchebnik / Ju.M. Zubarev. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2008. – 224 s.
5. Stratievskij, I.H. Abrazivnaja obrabotka: spravochnik / I.H. Stratievskij, V.G. Jur'ev, Ju.M. Zuba-rev. – M.: Mashinostroenie, 2010. – 352 s.

### **Yuryev Valentin Grigorievich**

Saint-Petersburg Institute of mechanical engineering

Candidate of technical Sciences, Professor of the Department «Technology of the automated manufacture»

E-mail: yurev\_mv@rambler.ru

### **Zubarev Yuri Mikhailovich**

Saint-Petersburg Institute of mechanical engineering

Doctor of technical Sciences, Professor, head of chair «Technology of the automated manufacture»

E-mail: kafedra.tap@yandex.ru

### **Zaitsev Gennady Petrovich**

LLC «АЛОКС»

Candidate of technical Sciences, S.N.S.

E-mail: GPZaitcev@mail.ru

## **МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

УДК 687.022

И.В. ФЕТИСОВ

### **РЕШЕНИЕ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ О СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПОДВЕСНОЙ ЧАСТИ СТИРАЛЬНОЙ МАШИНЫ**

*Решена слабо связанная система дифференциальных уравнений, описывающих динамический процесс колебаний неуравновешенного ротора в подвесной части стиральной машины барабанного типа и ее устойчивого состояния при случайных воздействиях.*

*Ключевые слова:* колебания, неуравновешенный ротор, стиральная машина барабанного типа.

Исследуется асимптотика процесса колебаний подвесной части стиральной машины при внешних случайных воздействиях. Большинство математических моделей, описывающих поведение подвесного блока стиральной машины барабанного типа, основано на предположении о детерминированном внешнем воздействии на неуравновешенный ротор блока и постоянстве параметров в рассматриваемой динамической системе (см., например, монографии [1-5] и диссертацию [3]). Решение же актуальной задачи о случайных вынужденных колебаниях подвесной части, ее устойчивого состояния, обусловленных изменением пространственных координат центра масс изделий при отжиме, учета крепления упругих элементов и демпферов, их ориентации в пространстве, коэффициентов жесткости и диссипации, вариации эксцентриситета, все еще далеко от завершения [5-9].

Целью работы является решение и проверка его адекватности для слабо связанной системы дифференциальных уравнений, описывающих вынужденные колебания неуравновешенного ротора в подвесной части стиральной машины барабанного типа и его устойчивого состояния при случайных внешних воздействиях, учитывающих изменение эксцентриситета центра масс отжимаемых изделий. Ранее некоторые результаты нами были опубликованы в соавторстве в работах [10-13].

Механические системы, нагруженные случайными возмущениями, имеют широкое применение в технике, например, в амортизаторах систем виброзащиты приборов, машин, конструкций. Решение такого типа нелинейных задач динамики, как правило, связано с большими трудностями. Как известно, получить решение нелинейного уравнения общего вида в аналитической форме (даже для наиболее простого уравнения второго порядка) нельзя, не говоря уже о решении системы нелинейных уравнений движения механических систем, нагруженных детерминированными или случайными силами.

Еще сравнительно недавно считалось, что при детерминированных нагрузках решение нелинейных уравнений является детерминированным, а при случайных нагрузках - случайным. Исследования в области нелинейной динамики, которые проводились в последние годы с использованием вычислительной техники, позволили установить новые физические явления, казавшиеся ранее просто невозможными в рамках традиционной нелинейной механики. Было установлено, что в детерминированной нелинейной системе возможны хаотические (непредсказуемые) движения, т.е. нелинейные системы без внешних случайных воздействий могут сами являться генераторами случайных процессов.

Учитывая, что построение расчетно-аналитической схемы в модельной задаче необходимо для нахождения амплитудно-частотных и вероятностных характеристик процесса случайных колебаний, нами были введены следующие допущения:

- подвесная часть стиральной машины представляла собой абсолютно твердое тело, связанное с корпусом машины посредством упругих элементов, параллельно которым действуют гасители колебаний—демпферы;

- корпус машины был выполнен в виде ориентированной конструкции в трехмерном пространстве и являлся абсолютно жесткой неподвижной системой (так называемый статор);
- внутреннее и внешнее трение отсутствует;
- в процессе динамики колебаний неуравновешенного ротора присутствует эксцентриситет центра масс отжимаемых изделий.

Для фиксации положения подвесной части в пространстве рассматривались две системы координат: неподвижная система координатных осей  $O\xi\eta\zeta$  и подвижная система координатных осей  $O_1XYZ$ , жестко связанная с центром масс подвесной части. В начальный момент времени полюса обеих систем совмещены. Ось  $O_1X$  направлена по оси вращения барабана, а направления двух других осей  $O_1Y$  и  $O_1Z$  совпадали с направлениями главных центральных осей жесткости подвесной части.

В качестве обобщенных координат служили линейные перемещения центра масс всей подвесной части  $q_1 = \xi$ ,  $q_2 = \eta$ ,  $q_3 = \zeta$  и три угла поворота тела относительно осей инерциальной (неподвижной) системы  $q_4 = \alpha$ ,  $q_5 = \beta$ ,  $q_6 = \gamma$ .

Упругий элемент и демпфер представляли собой на расчетной схеме параллельные элементы, которые расположены взаимно перпендикулярно, направлены по главным осям жесткости и образуют, таким образом, систему координатных осей  $O_sX_sY_sZ_s$ , где  $s$ - номер спаренного элемента.

Координаты точки крепления  $s$ -го спаренного элемента есть коэффициенты демпфирования и жесткости в направлении соответствующих осей  $b_{X_s}, b_{Y_s}, b_{Z_s}$  и  $c_{X_s}, c_{Y_s}, c_{Z_s}$ .

Предполагалось также, что каждый демпфер и упругий элемент не воспринимают вращательных воздействий.

Как видим, данная расчетная схема соответствует всем конструктивным схемам подвески моечного узла машин барабанного типа.

В частности, если упругая подвеска не имеет демпферов, то принимается, что все значения диссипации равны нулю  $b_{X_s} = 0, b_{Y_s} = 0, b_{Z_s} = 0$ . Если к тому же стиральная машина имеет упругую подвеску маятникового типа, то и соответствующие элементы жесткости могут быть равны нулю, кроме  $c_{X_s} \neq 0, c_{Y_s} \neq 0, c_{Z_s} \neq 0$ .

Рассматривается задача статистического анализа динамики случайных колебаний подвесной части стиральной машины с горизонтально расположенным неуравновешенным ротором, которая заключается в расчете вероятностных характеристик выходной реакции  $Y(t)$  по известным вероятностным характеристикам входного случайного воздействия  $X(t)$  и дальнейшей фильтрации процесса по схеме Калмана- Бьюси.

Исходной в расчетах служит слабо связанная система шести линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, имеющая следующий вид:

$$\begin{aligned}
 M\ddot{\zeta} + Nb_z \cdot \dot{\zeta} + N \cdot c_z \cdot \zeta &= U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t; \\
 J_z \cdot \dot{\gamma} + N(b_y \cdot \xi_1^2 + b_x \cdot \eta_1^2) \cdot \dot{\gamma} + N(c_y \cdot \xi_1^2 + c_x \cdot \eta_1^2) \cdot \gamma &= U_2(t) \cdot \omega^2 \cdot l_x \cdot \cos \omega t; \\
 M\ddot{\xi} + Nb_x \cdot \dot{\xi} + N \cdot c_x \cdot \xi &= 0; \\
 J_y \cdot \dot{\beta} + N(b_x \cdot \xi_1^2 + b_z \cdot \xi_1^2) \cdot \dot{\beta} + N(c_x \cdot \xi_1^2 + c_z \cdot \xi_1^2) \cdot \beta &= U_2(t) \cdot \omega^2 \cdot l_x \cdot \sin \omega t; \\
 M\ddot{\eta} + Nb_y \cdot \dot{\eta} + N \cdot c_y \cdot \eta &= U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t; \\
 J_x \cdot \dot{\alpha} + N(b_z \cdot \eta_1^2 + b_y \cdot \xi_1^2) \cdot \dot{\alpha} + N(c_z \cdot \eta_1^2 + c_y \cdot \xi_1^2) \cdot \alpha &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Однотипные первое, второе, четвертое и пятое уравнения исходной системы (1) описывают, как видим, вынужденные случайные колебания подвесного неуравновешенного

блока стиральной машины с одной степенью свободы в заданном направлении, а третье и шестое из уравнений отвечают случаям свободных колебаний.

Все уравнения системы (1) имеют постоянные коэффициенты, следовательно, возможны два режима динамики процесса колебаний при стационарных возмущениях. Стационарный режим имеет место при стационарных возмущениях после определенного интервала времени от начала колебаний, причем, как известно [1], стационарные колебания возможны в устойчивых динамических системах.

Кроме того, каждое из неоднородных ЛДУ содержит одну случайную функцию типа  $X(t) = U(t) \cdot \sin \omega t, (\cos \omega t)$ , где исходными данными служат известные параметры динамической системы и фиксированные реализации известного случайного воздействия  $X(t)$ .

Учитывая эти соображения, рассмотрим подробнее один из однотипных блоков, включающий первое и пятое уравнения системы (1):

$$\begin{cases} M \cdot \zeta''(t) + N \cdot b_z \cdot \zeta'(t) + N \cdot c_z \cdot \zeta(t) = X_1(t), & (2) \\ M \cdot \eta''(t) + N \cdot b_y \cdot \eta'(t) + N \cdot c_y \cdot \eta(t) = X_2(t), & (3) \\ \ddot{a} \ddot{a} \ddot{a} \quad X_2(t) = U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t; \\ X_1(t) = U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t. \end{cases}$$

Здесь работает вычислительная схема, имеющая следующий вид:  $X \rightarrow \boxed{A} \rightarrow Y$ , где  $X = X(t)$  - нестационарное внешнее случайное воздействие на подвесной блок стиральной машины, а  $Y(t)$  - результат.

Так как уравнения линейны, то достаточно рассмотреть случай, когда начальные условия процесса являются нулевыми. Действительно, переход к любым двум другим начальным условиям эквивалентен изменению правых частей уравнений (2) и (3) на некоторые слагаемые, которые будут неслучайными (случайными) функциями времени, если начальные условия неслучайны (случайны). Как в том, так и в другом случае вид уравнений (2) и (3) остается без изменения. Изменяются только математические ожидания (или математические ожидания и корреляционные функции случайных воздействий).

Без ограничения общности можно считать, что математические ожидания, корреляционные функции и корреляционные функции связи случайных процессов  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  нам также известны (достаточно иметь одну из реализаций правых частей системы (1)). Допустим, что эти функции стационарны и стационарно связаны, следовательно, известны средние статистики правых частей в ЛОДУ (2) и (3). Надо найти значения математических ожиданий, корреляционные функции и корреляционную функцию связи решений  $(\zeta, \eta)$  системы уравнений (2) – (3).

Используя дифференциальный оператор  $p$ , запишем ЛОДУ(2) и (3) в виде:

$$X_1(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \cdot d\Phi_1(\omega), \quad (4)$$

$$X_2(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \cdot d\Phi_2(\omega), \quad (5)$$

где  $Q_2(p)$  и  $P_2(p)$  представляют собой квадратные трехчлены  $otr$ .

Тогда каждое из уравнений (4) и (5) определяет неизвестную функцию как результат применения линейного оператора дифференцирования к правой части соответствующего уравнения (4) и (5).

Значит, для нахождения математических ожиданий решений  $\zeta(t)$  и  $\eta(t)$  уравнений (2) и (3) нужно правые части  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$  заменить их математическими ожиданиями  $\bar{X}_1$  и  $\bar{X}_2$  и решить получившиеся уравнения при заданных нулевых начальных условиях. Несмотря на

постоянство математических ожиданий  $\bar{x}_1$  и  $\bar{x}_2$  правых частей  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ , до тех пор, пока не закончится переходный процесс, математические ожидания решений  $\bar{\zeta}$  и  $\bar{\eta}$  будут зависеть от времени. После окончания переходного процесса (разгона барабана машины) для установившегося режима процесса отжима имеем равенства:  $\bar{\zeta} = \frac{1}{a_2} \cdot \bar{x}_1, \bar{\eta} = \frac{1}{b_2} \cdot \bar{x}_2$ .

Для простоты можно считать, что  $\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = 0$ .

Чтобы найти корреляционные функции решений  $\bar{\zeta}(t)$  и  $\bar{\eta}(t)$ , используем спектральные разложения правых частей в системе (2)- (3).

Полагаем:

$$X_1(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \cdot d\Phi_1(\omega), \quad (6)$$

$$X_2(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \cdot d\Phi_2(\omega). \quad (7)$$

Здесь дифференциалы первого порядка  $d\Phi_1(\omega)$  и  $d\Phi_2(\omega)$  подчиняются условиям- соотношениям вида:

$$M(d\Phi_1^*(\omega)d\Phi_1(\omega_1)) = \delta(\omega - \omega_1) \cdot S_{x_1}(\omega)d\omega d\omega_1, \quad (8)$$

$$M(d\Phi_2^*(\omega)d\Phi_2(\omega_1)) = \delta(\omega - \omega_1) \cdot S_{x_2}(\omega)d\omega d\omega_1, \quad (9)$$

$$M(d\Phi_1^*(\omega)d\Phi_2(\omega_1)) = \delta(\omega - \omega_1) \cdot S_{x_1x_2}(\omega)d\omega d\omega_1. \quad (10)$$

Переобозначив интегралы в формулах (6) и (7), получим для искоемых решений в исходной системе (2) формулы вида:

$$\zeta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta(\omega, t) \cdot d\Phi_1(\omega), \quad (11)$$

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(\omega, t) \cdot d\Phi_2(\omega). \quad (12)$$

Теперь подставим равенства (11) и (12) в формулы для корреляционной функции и для корреляционной функции связи и после перестановки операции интегрирования и операции математического ожидания и несложных преобразований получим следующие выражения для корреляционных функций и корреляционной функций связи искоемых решений  $\zeta(t)$  и  $\eta(t)$  соответствующие выражения:

$$K_{\zeta}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta^*(\omega, t_1) \zeta(\omega, t_2) S_{x_1}(\omega) d\omega, \quad (13)$$

$$K_{\eta}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \eta^*(\omega, t_1) \eta(\omega, t_2) S_{x_2}(\omega) d\omega, \quad (14)$$

$$R_{\zeta\eta}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta^*(\omega, t_1) \eta(\omega, t_2) S_{x_1x_2}(\omega) d\omega. \quad (15)$$

В данном случае функции  $\zeta(\omega, t)$  и  $\eta(\omega, t)$  имеют следующий вид:

$$\zeta(\omega, t) = \frac{e^{i\omega t}}{Q_2(i\omega)} + \sum_{j=1}^2 C_j(\omega) \cdot e^{\lambda_j t}, \quad (16)$$

$$\eta(\omega, t) = \frac{e^{i\omega t}}{P_2(i\omega)} + \sum_{k=1}^2 G_k(\omega) \cdot e^{\mu_k t}, \quad (17)$$

где  $\lambda_j$  и  $\mu_k$  - корни характеристических уравнений  $Q_2(\lambda) = 0$  и  $P_2(\mu) = 0$ , а функции  $C_j(\omega)$  и  $C_k(\omega)$  частоты определяются из систем квадратных алгебраических уравнений, полученных при условии обращения в нуль при  $t = 0$  функций  $\zeta(\omega, t)$ ,  $\eta(\omega, t)$  и их первых производных.

При достаточно большом значении времени  $t$ , когда переходный процесс можно считать закончившимся, формулы (13-15) принимают вид:

$$K_\zeta(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \cdot \frac{S_{x_1}(\omega)}{|Q_2(i\omega)|^2} d\omega, \quad (18)$$

$$K_\eta(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \cdot \frac{S_{x_2}(\omega)}{|P_2(i\omega)|^2} d\omega, \quad (19)$$

$$R_{\zeta\eta}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \cdot \frac{S_{x_1 x_2}(\omega)}{Q_2^*(i\omega) \cdot P_2(i\omega)} d\omega. \quad (20)$$

Отсюда видно, что решениями уравнений являются стационарные и стационарно связанные случайные функции, спектральные плотности  $S_\zeta(\omega)$  и  $S_\eta(\omega)$  и взаимная спектральная плотность  $S_{\zeta\eta}(\omega)$  которых определяются соответствующими выражениями:

$$S_\zeta(\omega) = \frac{S_{x_1}(\omega)}{|Q_2(i\omega)|^2}, \quad (21)$$

$$S_\eta(\omega) = \frac{S_{x_2}(\omega)}{|P_2(i\omega)|^2}, \quad (22)$$

$$S_{\zeta\eta}(\omega) = \frac{S_{x_1 x_2}(\omega)}{Q_2^*(i\omega) \cdot P_2(i\omega)}. \quad (23)$$

В частности, если правые части в системе уравнений (2) получены в результате преобразований одной и той же случайной функции  $X(t)$ , то можно упростить полученные формулы (21-23). А именно, пусть, например,  $X_1(t) = M_2(p) \cdot X(t)$ ,  $X_2(t) = N_2(p) \cdot X(t)$ , где  $M_2(p)$  и  $N_2(p)$  представляют собой квадратные трехчлены,  $p$ - оператор дифференцирования, а  $X(t)$  - стационарная случайная функция. В этом случае выражения (21-23) принимают следующий вид:

$$S_\zeta(\omega) = \frac{|M_2(i\omega)|^2}{|Q_2(i\omega)|^2} \cdot S_x(\omega), \quad (24)$$

$$S_\eta(\omega) = \frac{|N_2(i\omega)|^2}{|P_2(i\omega)|^2} \cdot S_x(\omega), \quad (25)$$

$$S_{\zeta\eta}(\omega) = \frac{M_2^*(i\omega) \cdot N_2(i\omega)}{Q_2^*(i\omega) \cdot P_2(i\omega)} \cdot S_x(\omega). \quad (26)$$

Таким образом, в стационарном случае формулы (24-26) дают требуемые результативные значения спектральных плотностей  $S_\zeta(\omega)$ ,  $S_\eta(\omega)$  решений  $\zeta(t)$  и  $\eta(t)$ , а также их взаимной спектральной плотности  $S_{\zeta\eta}(\omega)$ .



В ситуации, когда случайные воздействия (правые части  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$  в системе (2)) не являются стационарными случайными функциями, или же когда коэффициенты дифференциальных уравнений (2) и (3) зависят от времени  $t \geq 0$ , то общее решение  $\zeta(t)$  и  $\eta(t)$  не будут стационарными.

Вместе с тем, в случае, когда выражения (функциональные зависимости)  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$  есть результаты применения линейных операторов к стационарным случайным функциям (как собственно, и происходит в нашем случае для  $X_1(t) = U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$  и  $X_2(t) = U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t$ , представляющими произведения стационарных случайных процессов на неслучайную функцию), (16) и (17) останутся справедливыми, но только функции  $\zeta(\omega, t)$  и  $\eta(\omega, t)$  будут являться более сложными по виду.

В частности, для линейной комбинации стационарной случайной функции и ее первых двух производных, у которых коэффициентами служат многочлены от  $t$  (при условии постоянных параметров уравнений), рассматриваемые решения  $\zeta(\omega, t)$  и  $\eta(\omega, t)$ , (нестационарный режим), могут быть найдены аналогичным образом.

Вероятностные характеристики общего решения системы (1).

Рассматривая исходную систему (1), видим, что первое, второе, четвертое и пятое уравнения образуют подсистему, описывающую вынужденные колебания при наличии случайных стационарных возмущений, а третье и шестое уравнения отвечают случаю свободных колебаний блока.

В общем случае свободные колебания с учетом инерционной, диссипативной и упругой составляющих задаются однородным линейным ОДУ второго порядка, имеющим следующий вид:

$$M \cdot y''(t) + \beta \cdot y'(t) + c \cdot y(t) = 0, \quad (27)$$

где  $M$  - масса системы,  $\beta$  - коэффициент сопротивления среды,  $c$  - коэффициент упругости,  $y(t)$  - перемещение. Обозначим через  $2n = \frac{\beta}{M}$ ,  $p_0^2 = \frac{c}{M}$ . В частности, третье уравнение системы (1) имеет вид:

$$M \cdot \ddot{\xi} + N \cdot b_x \cdot \dot{\xi} + N \cdot c_x \cdot \xi = 0, \quad (28)$$

где  $2n = \frac{N \cdot b_x}{M}$ ,  $p_0^2 = \frac{N \cdot c_x}{M}$ ,  $\xi = y(t)$ ,  $\dot{\xi} = y'(t)$ ,  $\ddot{\xi} = y''(t)$ .

Уравнение (28) описывает свободные гармонические колебания подвешенного блока лишь при условии  $p_0 > n$  (см. подробнее справочник [14], уравнение 2.35 случай б), с. 375).

Действительно, обозначив через  $a = 2n = \frac{N \cdot b_x}{M}$ ,  $b = p_0^2 = \frac{N \cdot c_x}{M}$ , видим, что свободные колебания возможны при условии  $4 \cdot b - a^2 > 0$ , эквивалентом неравенству  $p_0 > n$ .

Следовательно, общее решение уравнения (28) имеет следующий вид:

$$\xi(t) = e^{-\frac{N \cdot b_x \cdot t}{2M}} \cdot (C_1 \cdot \cos \frac{\sqrt{4N \cdot c_x \cdot M - N^2 \cdot b_x^2}}{M} \cdot \frac{t}{2} + C_2 \cdot \sin \frac{\sqrt{4 \cdot N \cdot c_x \cdot M - N^2 \cdot b_x^2}}{M} \cdot \frac{t}{2}), \quad (29)$$

Аналогичный результат имеет место для общего решения шестого из уравнений системы (1), имеющего вид:

$$J_x \cdot \ddot{\alpha} + N(b_z \cdot \eta_1^2 + b_y \cdot \zeta_1^2) \cdot \dot{\alpha} + N \cdot (c_z \cdot \eta_1^2 + c_y \cdot \zeta_1^2) \cdot \alpha = 0, \quad (30)$$

где 
$$\frac{N \cdot (b_z \cdot \eta_1^2 + b_y \cdot \zeta_1^2)}{J_x} = 2n, \quad \frac{N \cdot (c_z \cdot \eta_1^2 + c_y \cdot \zeta_1^2)}{J_x} = p_0^2, \quad \alpha = y(t), \dot{\alpha} = y'(t),$$

$$\ddot{\alpha} = y''(t), \sqrt{p_0^2 - n^2} = \sqrt{\frac{N \cdot (c_z \cdot \eta_1^2 + c_y \cdot \zeta_1^2)}{J_x} - \frac{N^2 \cdot (b_z \cdot \eta_1^2 + b_y \cdot \zeta_1^2)^2}{4 \cdot J_x^2}}.$$

Общее решение уравнения (30) выражается формулой:

$$\alpha(t) = e^{-\frac{N(b_z \cdot \eta_1^2 + b_y \cdot \zeta_1^2)}{2J_x} t} \cdot \left( C_1 \cdot \cos \sqrt{p_0^2 - n^2} \cdot \frac{t}{2} + C_2 \cdot \sin \sqrt{p_0^2 - n^2} \cdot \frac{t}{2} \right). \quad (31)$$

Поскольку третье и шестое уравнения системы (1) описывают свободные случайные колебания системы в направлениях обобщенных координат  $\xi = \xi(t)$  и  $\alpha = \alpha(t)$ , то вероятностные характеристики решений будут следующими:

а) математическое ожидание общего решения исходного уравнения свободных колебаний принимает форму:

$$m_y = e^{-nt} \left[ m_{y_0} \left( \cos p \cdot t + \frac{n}{p} \cdot \sin pt \right) + \frac{m_{y'_0}}{p} \cdot \sin pt \right] + \frac{1}{M \cdot p} \cdot \int_0^t e^{-n(t-s)} \cdot \sin p(t-s) \cdot m_{y_0} ds; \quad (32)$$

где  $p = \sqrt{p_0^2 - n^2}$ ;

в) дисперсия искомого решения имеет следующий вид:

$$D_y = e^{-2nt} \cdot \left[ D_{y_0} \cdot \left( \cos pt + \frac{n}{p} \cdot \sin pt \right)^2 + \frac{1}{p^2} \cdot D_{y'_0} \cdot \sin^2 pt \right] + \frac{1}{M^2 \cdot p^2} \cdot \int_0^t \int_0^{\tau} e^{-n(t-s)} \cdot e^{-n(t_1-\tau)} \cdot \sin p(t-s) \cdot \sin p(t_1-\tau) \cdot K_f ds d\tau, \quad (33)$$

где  $K_f$  - корреляционная функция входа в систему,  $m_{y_0}$ ,  $m_{y'_0}$ ,  $D_{y_0}$  и  $D_{y'_0}$  - математические ожидания и дисперсии соответственно входа  $y_0$  и скорости  $y'_0$  в начальный момент времени.

Как уже отмечалось, первое, второе, четвертое и пятое уравнения исходной системы (1) являются одностепенными ОДУ, описывающими вынужденные случайные колебания исходной системы (1) в заданных направлениях  $\zeta$ ,  $\eta$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , в общем виде представимыми в виде:

$$y''(t) + 2 \cdot n \cdot y'(t) + p_0^2 \cdot y(t) = \frac{1}{M} \cdot f(t), \quad (34)$$

где  $f(t)$  - случайное вынуждающее воздействие на подвесной блок,  $M$  - масса подвесного блока.

В частности, правая часть в первом уравнении  $f(t) = U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$  есть произведение стационарной в широком смысле случайной функции (точнее, случайного процесса)  $U_1(t) = e \cdot H(t)$ , где  $e$  - эксцентриситет с известными вероятностными характеристиками, на неслучайную функцию  $\omega^2 \cdot \sin \omega t$ ,  $t$  - время процесса. Аналогичную ситуацию имеем для правых частей неоднородных дифференциальных уравнений во втором, четвертом и пятом уравнениях исходной системы (1).

Как известно, если линейное неоднородное дифференциальное уравнение малых колебаний системы с одной степенью свободы в заданном направлении имеет постоянные коэффициенты, а решение однородного уравнения (27) асимптотически устойчиво, то в этой

системе возможны стационарные случайные колебания при стационарной в широком смысле правой части, как в нашем случае для случайного процесса  $U(t) = e \cdot H(t)$ .

Опуская для краткости изложения промежуточные вычисления, приведем окончательные расчетные формулы для решения исходных неоднородных дифференциальных уравнений.

I уравнение:

$$M\ddot{\zeta} + Nb_z\dot{\zeta} + Nc_z\zeta = U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \quad (35)$$

сводим к уравнению  $\zeta''(t) + 2n\zeta'(t) + p_0^2\zeta(t) = f_1(t)$  заменами:

$$2n = \frac{N \cdot b_z}{M}, \quad p_0^2 = \frac{N \cdot c_z}{M}, \quad f_1(t) = \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t}{M}, \quad U_1(t) = m \cdot e(m), \quad (M - \text{масса подвески, } m - \text{масса белья при отжиме, } \omega - \text{частота колебаний}).$$

Расчетные формулы:

а) перемещение

$$\zeta(\varphi) = \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot \sin \frac{\varphi}{\omega} \cdot \omega}{N \cdot c_z \cdot e^{\frac{N \cdot b_z \cdot \varphi}{2M \cdot \omega}}} \cdot \left[ \sqrt{\frac{N \cdot c_z}{M} - \frac{N^2 \cdot b_z^2}{4 \cdot M^2}} \cdot \left( e^{\frac{N \cdot b_z \cdot \varphi}{2M \cdot \omega}} - \cos \frac{p \cdot \varphi}{\omega} \right) - n \cdot \sin \frac{p \cdot \varphi}{\omega} \right]; \quad (36)$$

б) математическое ожидание перемещения  $\xi(\varphi)$ : предполагаются известными величины математических ожиданий эксцентриситетов  $m_e$  и воздействия на подвеску  $m_{f_1}$ .

$$m_\xi = \frac{m_{f_1}}{M \cdot p} \cdot \int_0^t e^{-n(t-s)} \cdot \sin p(t-s) \cdot ds = \frac{m_{f_1}}{M \cdot p \cdot (p^2 + n^2)} \cdot \left[ p(1 - \cos p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{-n \frac{\varphi}{\omega}}) - n \cdot \sin p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{-n \frac{\varphi}{\omega}} \right],$$

$$\text{где } m_{f_1} = m \cdot \omega^2 \cdot \sin \frac{\varphi}{\omega} \cdot m_e, \quad p = \sqrt{\frac{N \cdot c_z}{M} - \frac{N^2 \cdot b_z^2}{4 \cdot M^2}}; \quad (37)$$

в) дисперсия решения:

$$D_\xi = \frac{D_{f_1}}{M^2 \cdot p^2 \cdot (p^2 + n^2)^2} \cdot \left[ -n \cdot \sin p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{-n \frac{\varphi}{\omega}} + p \cdot (1 - \cos p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{-n \frac{\varphi}{\omega}}) \right]^2, \quad (38)$$

где  $D_{f_1}$  - известная дисперсия случайного воздействия  $f_1$  на подвеску,

$$p^2 + n^2 = p_0^2 = \frac{N \cdot c_z}{M}, \quad n = \frac{N \cdot b_z}{2M}.$$

II уравнение:

$$J_z \cdot \ddot{\gamma} + N \cdot (b_y \cdot \xi_1^2 + b_x \cdot \eta_1^2) \cdot \dot{\gamma} + N \cdot (c_y \cdot \xi_1^2 + c_x \cdot \eta_1^2) \cdot \gamma = U_2(t) \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t \cdot l_x \quad (39)$$

сводим к уравнению  $\gamma''(t) + 2n\gamma'(t) + p_0^2 \cdot \gamma(t) = f_2(t)$  заменами  $2n = \frac{N(b_y \xi_1^2 + b_x \eta_1^2)}{J_z}$ ,

$$p_0^2 = \frac{N(c_y \xi_1^2 + c_x \eta_1^2)}{J_z}, \quad f_2(t) = \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t \cdot l_x}{J_z}, \quad U_2(t) = m \cdot e(m), \quad \text{где } e(m) -$$

эксцентриситет центра масс,  $\omega$  - частота вынуждающей силы  $f_2(t)$ .

Расчетные формулы:

а) изменение угла:

$$\begin{aligned} \gamma(\varphi) &= \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot l_x \cdot \cos \frac{\varphi}{\omega}}{N \cdot (c_y \cdot \xi_1^2 + c_x \cdot \eta_1^2) \cdot e^{nt}} \cdot \left[ \sqrt{p_0^2 - n^2} \cdot (e^{nt} - \cos \frac{p\varphi}{\omega}) - n \cdot \sin \frac{p\varphi}{\omega} \right] = \\ &= \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot l_x \cdot \cos \varphi}{N(c_y \xi_1^2 + c_x \cdot \eta_1^2) \cdot e^{\frac{N(b_y \xi_1^2 + b_x \cdot \eta_1^2) \cdot \varphi}{2J_z \cdot \omega}}} \times \\ &\times \left[ \sqrt{\frac{N(c_y \xi_1^2 + c_x \cdot \eta_1^2)}{J_z} - \frac{N^2(b_y \xi_1^2 + b_x \cdot \eta_1^2)^2}{4 \cdot J_z^2}} \cdot (e^{\frac{n\varphi}{\omega}} - \cos p \frac{\varphi}{\omega}) - n \cdot \sin p \frac{\varphi}{\omega} \right], \end{aligned} \quad (40)$$

где  $n$  и  $p$  уже определены.

б) математическое ожидание изменения угла  $\gamma(\varphi)$  равно

$$m_\gamma = \frac{m \cdot m_{e(m)} \cdot \omega^2 \cdot l_x \cdot \cos \frac{\varphi}{\omega}}{J_z \cdot p} \cdot \frac{1}{(p^2 + n^2)} \cdot \left[ p \cdot \left( 1 - \cos p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{\frac{-n\varphi}{\omega}} \right) - n \cdot \sin p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{\frac{-n\varphi}{\omega}} \right]; \quad (41)$$

аналогично, дисперсия  $D_\gamma$  будет равна:

$$D_\gamma = \frac{D_{f_2}}{J_z^2 \cdot p^2 \cdot (p^2 + n^2)^2} \cdot \left[ -n \cdot \sin \frac{p\varphi}{\omega} \cdot e^{\frac{-n\varphi}{\omega}} + p(1 - \cos \frac{p\varphi}{\omega} \cdot e^{\frac{-n\varphi}{\omega}}) \right]^2. \quad (42)$$

IV уравнение:

$$J_y \cdot \ddot{\beta} + N \cdot (b_x \cdot \zeta_1^2 + b_z \cdot \xi_1^2) \cdot \dot{\beta} + N \cdot (c_x \cdot \zeta_1^2 + c_z \cdot \xi_1^2) \cdot \beta = U_2(t) \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \cdot l_x \quad (43)$$

сводим к уравнению:

$$\beta''(t) + 2n\beta'(t) + p_0^2 \cdot \beta(t) = f_3(t) \text{ заменами: } 2n = \frac{N(b_x \zeta_1^2 + b_z \cdot \xi_1^2)}{J_y},$$

$$p_0^2 = \frac{N(c_x \zeta_1^2 + c_z \cdot \xi_1^2)}{J_y}, \quad f_3(t) = \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \cdot l_x}{J_y}, \quad U_2(t) = m \cdot e(m), \text{ где } e(m) -$$

эксцентриситет центра масс,  $\omega$  - частота вынуждающей силы,  $m$ -масса белья при отжиме.

Расчетные формулы:

а) изменение угла:

$$\begin{aligned} \beta(\varphi) &= \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot l_x \cdot \sin \frac{\varphi}{\omega}}{N \cdot (c_x \cdot \zeta_1^2 + c_z \cdot \xi_1^2) \cdot e^{nt}} \times \\ &\times \left[ \sqrt{\frac{N(c_x \zeta_1^2 + c_z \cdot \xi_1^2)}{J_y} - \frac{N^2(b_x \zeta_1^2 + b_z \cdot \xi_1^2)^2}{4 \cdot J_y^2}} \cdot ((e^{\frac{n\varphi}{\omega}} - \cos p \frac{\varphi}{\omega}) - n \cdot \sin p \frac{\varphi}{\omega}) \right], \end{aligned} \quad (44)$$

где  $n$  и  $p$  известны.

б) математическое ожидание изменения угла  $\beta(\varphi)$  при известном математическом ожидании  $m_e$  эксцентриситета, а, значит, известном математическом ожидании входа

$m_{f_3} = m \cdot m_e \cdot \omega^2 \cdot l_x \sin \frac{\varphi}{\omega}$  равно:

$$m_\beta = \frac{m \cdot m_e \cdot \omega^2 \cdot l_x \sin \frac{\varphi}{\omega}}{J_z \cdot p \cdot p_0^2} \cdot \left[ p \cdot \left( 1 - \cos p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{\frac{-n\varphi}{\omega}} \right) - n \cdot \sin p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{\frac{-n\varphi}{\omega}} \right], \quad (45)$$

с) дисперсия  $D_\beta$  будет выражаться аналогичной формулой:

$$D_\beta = \frac{D_{f_3}}{J_y^2 \cdot p^2 \cdot p_0^4} \cdot \left[ -n \cdot \sin \frac{p\varphi}{\omega} \cdot e^{-\frac{n\varphi}{\omega}} + p(1 - \cos \frac{p\varphi}{\omega}) \cdot e^{-\frac{n\varphi}{\omega}} \right]^2. \quad (46)$$

Здесь  $m_e, D_{f_3}, n, p, p_0, \omega, \varphi$  известны!

Уравнение:

$$M\ddot{\eta} + Nb_y\dot{\eta} + Nc_y\eta = U_1(t) \cdot \omega^2 \cdot \cos\omega t \quad (47)$$

сводим к уравнению

$\eta''(t) + 2n\eta'(t) + p_0^2 \cdot \eta(t) = f_4(t)$  заменами:

$$2n = \frac{N \cdot b_y}{M}, p_0^2 = \frac{N \cdot c_y}{M}, f_4(t) = \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot \cos\omega t}{M}, \text{ где } U_1(t) = m \cdot e(m), (M - \text{масса подвески, } m - \text{масса белья при отжиме, } e(m) - \text{эксцентриситет центра масс}).$$

Расчетные формулы:

а) перемещение

$$\eta(\varphi) = \frac{m \cdot e(m) \cdot \omega^2 \cdot \cos \frac{\varphi}{\omega}}{N \cdot c_y \cdot e^{\frac{N \cdot b_y \cdot \varphi}{2M \cdot \omega}}} \times \left[ \sqrt{\frac{N \cdot c_y}{M} - \frac{N^2 \cdot b_y^2}{4M^2}} \cdot \left( e^{\frac{N \cdot b_y \cdot \varphi}{2M \cdot \omega}} - \cos \sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 \cdot b_y^2}{4M^2}} \frac{\varphi}{\omega} \right) - n \cdot \sin \sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 \cdot b_y^2}{4M^2}} \frac{\varphi}{\omega} \right], \quad (48)$$

б) математическое ожидание перемещения: здесь  $m_{e(m)}$  математическое ожидание эксцентриситета  $e(m)$ .

$$m_\eta = \frac{m_{f_4}}{M \cdot p} \cdot \int_0^t e^{-n(t-s)} \cdot \sin p(t-s) \cdot ds = \frac{m \cdot m_{e(m)} \cdot \omega^2 \cdot \cos\omega t}{M \cdot p \cdot (p^2 + n^2)} \times \left[ p(1 - \cos p \frac{\varphi}{\omega}) \cdot e^{-n \frac{\varphi}{\omega}} - n \cdot \sin p \frac{\varphi}{\omega} \cdot e^{-n \frac{\varphi}{\omega}} \right] = \frac{m \cdot m_{e(m)} \cdot \omega^2 \cdot \cos\omega \frac{\varphi}{\omega}}{\sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 b_y^2}{4M^2}} \cdot N \cdot c_y \cdot e^{\frac{N b_y \varphi}{2M \omega}}} \times \left[ \sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 b_y^2}{4M^2}} \left( e^{\frac{N b_y \varphi}{2M \omega}} - \cos \sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 b_y^2}{4M^2}} \frac{\varphi}{\omega} \right) - \frac{N b_y}{2M} \cdot \sin \sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 b_y^2}{4M^2}} \frac{\varphi}{\omega} \right]; \quad (49)$$

с) дисперсия решения: (учитываем известное математическое ожидание  $m_{e(m)}$  и дисперсию  $D_{e(m)}$ ).

$$D_\eta = \frac{D_{f_4} \cdot M^2}{M^2 \cdot \left( \frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 b_y^2}{4M^2} \right) N^2 \cdot c_y^2 \cdot e^{\frac{N b_y \varphi}{2M \omega}}} \times \left[ \sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 b_y^2}{4M^2}} \left( e^{\frac{N b_y \varphi}{2M \omega}} - \cos \sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 b_y^2}{4M^2}} \frac{\varphi}{\omega} \right) - \frac{N b_y}{2M} \cdot \sin \sqrt{\frac{Nc_y}{M} - \frac{N^2 b_y^2}{4M^2}} \frac{\varphi}{\omega} \right]^2. \quad (50)$$

Целесообразно упомянуть, что авторским коллективом изготовлен и используется действующий экспериментальный стенд, на котором в течение ряда лет проводятся экспери-

ментальные исследования в реальных условиях функционирования стиральных машин барабанного типа с целью контрольной проверки адекватности полученных вероятностных характеристик процесса колебаний подвешенного блока при случайных воздействиях на блок и эмпирических данных, а также оптимизации параметров подвешенного блока при решении основной задачи снижения его виброактивности.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блехман, И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. – М.: Физматлит, 1994. – 400с.
2. Справочник. Вибрации в технике. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – 351с.
3. Алехин, С.Н. Теоретические и экспериментальные исследования динамики стиральных машин барабанного типа: дис. ... канд. техн. наук. / С.Н. Алехин. – М.: МГУС, 2000. – 275с.
4. Наймарк, Ю.И. Стохастические и хаотические колебания / Ю.И. Наймарк, П.С. Ланда. – М.: Наука, 1987. – 424с.
5. Светлицкий, В.А. Случайные колебания, механических систем / В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1976. – 215с.
6. Кренделл, С. Случайные колебания / С. Кренделл. – М.: Мир, 1966. – 356с.
7. Хейл, Дж. Колебания в нелинейных системах / Дж. Хейл. – М.: Мир, 1967. – 230с.
8. Светлицкий, В.А. Статистическая механика и теория надежности / В.А. Светлицкий. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 504с.
9. Свешников, А.А. Прикладные методы теории случайных функций / А.А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 449с.
10. Фетисов, В.Г. Математическое моделирование и исследование процесса оптимальной фильтрации случайных колебаний подвешенного блока стиральной машины / В.Г. Фетисов, С.Н. Алехин, И.В. Фетисов // Сб. трудов Общеросс. НТК. «Матем. моделир., компьютер. технологии в технике». Невинномысск: Изд-во СКГТУ, 2009. – С. 55-59.
11. Фетисов, В.Г. Модельная задача о поведении подвешенного блока стиральной машины, подверженно-го случайным воздействиям / В.Г. Фетисов, С.Н. Алехин, И.В. Фетисов // Труды 7-й Международн. конф. «Исслед. по дифф. Уравнениям и матем. моделир.». – Владикавказ: ВНЦ РАН, 2009. – С.137-143.
12. Фетисов, В.Г. Метод статистической линеаризации нелинейных колебаний подвешенного блока стиральной машины / В.Г. Фетисов, С.Н. Алехин, И.В. Фетисов // Сборник статей 11-й Междунар. НТК «Информ. – вычислит. технологии и их приложения». – Пенза: МНИЦ ПГСХА, 2009. – С. 244-249.
13. Фетисов, И.В. Асимптотика поведения эксцентриситета центра масс изделий при отжиге / И.В. Фетисов, С.Н. Алехин, А.С. Алехин // Сборник статей 12-й Междунар. НТК «Информ. – вычислит. технологии и их приложения». – Пенза: МНИЦ ПГСХА, 2010. – С. 149-152.
14. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

**Фетисов Игорь Валерьевич**

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты  
инженер ООО «Пневмакс»  
Тел.: +79281143722

---

I. V. FETISOV

### MODEL PROBLEMS RANDOM OSCILLATIONS HANGING OF THE WASHING MACHINE

*Fixed a loosely coupled system of differential equations describing the dynamic process of an unbalanced rotor vibration in the suspension of the washing machine drum and its steady state with random effects.*

**Keywords:** *oscillations neuravnoveschenny rotor, drum-type washing machine.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Blehman, I.I. Vibracionnaja mehanika / I.I. Blehman. – M.: Fizmatlit, 1994. – 400s.
2. Spravochnik. Vibracii v tehnike. T. 2. Kolebanija nelinejnyh mehanicheskikh sistem / Pod red. I.I. Blehmana. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 351s.
3. Alehin, S.N. Teoreticheskie i jeksperimental'nye issledovanija dinamiki stiral'nyh mashin bara-bannogo tipa: dis. ... kand. tehn. nauk. / S.N. Alehin. – M.: MGUS, 2000. – 275s.
4. Najmark, Ju.I. Stohasticheskie i haoticheskie kolebanija / Ju.I. Najmark, P.S. Landa. – M.: Nauka, 1987. – 424s.
5. Svetlickij, V.A. Sluchajnye kolebanija, mehanicheskikh sistem / V.A. Svetlickij. – M.: Mashino-stroenie, 1976. – 215s.
6. Krendell, S. Sluchajnye kolebanija / S. Krendell. – M.: Mir, 1966. – 356s.
7. Hejl, Dzh. Kolebanija v nelinejnyh sistemah / Dzh. Hejl. – M.: Mir, 1967. – 230s.
8. Svetlickij, V.A. Statisticheskaja mehanika i teorija nadezhnosti / V.A. Svetlickij. – M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2004. – 504s.
9. Sveshnikov, A.A. Prikladnye metody teorii sluchajnyh funkcij / A.A. Sveshnikov. – M.: Nauka, 1968. – 449s.
10. Fetisov, V.G. Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie processa optimal'noj fil'tracii sluchajnyh kolebanij podvesnogo bloka stiral'noj mashiny / V.G. Fetisov, S.N. Alehin, I.V. Fetisov // Sb. trudov Obweros. NTK. «Matem. modelir., komp'juter.tehnologii v tehnike». Nevinnomyssk: Izd-vo SKGTU, 2009. – S. 55-59.
11. Fetisov, V.G. Model'naja zadacha o povedenii podvesnogo bloka stiral'noj mashiny, podverzhenno-go sluchajnym vozdeystvijam / V.G. Fetisov, S.N. Alehin, I.V. Fetisov // Trudy 7-j Mezhdunarodn. konf. «Is-sled. po diff. Uravnenijam i matem. modelir.». – Vladikavkaz: VNC RAN, 2009. – S.137-143.
12. Fetisov, V.G. Metod statisticheskoy linearizacii nelinejnyh kolebanij podvesnogo bloka sti-ral'noj mashiny / V.G. Fetisov, S.N. Alehin, I.V. Fetisov // Sbornik statej 11-j Mezhdunar. NTK «Infor-mac. – vychislit.tehnologii i ih prilozhenija». – Penza: MNIC PGSHA, 2009. – S. 244-249.
13. Fetisov, I.V. Asimptotika povedenija jekscentrisiteta centra mass izdelij pri otzhime / I.V. Fe-tisov, S.N. Alehin, A.S. Alehin // Sbornik statej 12-j Mezhdunar. NTK «Informac. – vychislit.tehnologii i ih prilozhenija». – Penza: MNIC PGSHA, 2010. – S. 149-152.
14. Kamke, Je. Spravochnik po obyknovennym differencial'nym uravnenijam / Je. Kamke. – M.: Nauka, 1971.– 576 s.

**Fetisov Igor Valerievich**

South-Russian State University Economics and Service, Shahti  
 Engineer LLC "Pnevmaks"  
 Tel.: +79281143722

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 629.7.054.44: 629.7.05.067

В.М. СОЛДАТКИН, Е.С. СОЛДАТКИНА

### **ПОСТРОЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ДАТЧИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УГЛА И ВОЗДУШНОЙ СКОРОСТИ**

*Рассмотрены особенности построения, модели алгоритмов обработки информации и основных погрешностей вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости дозвукового летательного аппарата.*

**Ключевые слова:** аэродинамические углы, воздушная скорость, измерение, вихревой датчик, построение, моделирование.

Полеты большого класса летательных аппаратов (ЛА) осуществляются в пределах атмосферы, где выполнение основных полетных задач связано с пилотированием по вектору истинной воздушной скорости, положение которого в связанной системе координат определяется аэродинамическими углами – углами атаки и скольжения. Наличие достоверной информации по аэродинамическим углам и истинной воздушной скорости позволяет наиболее полно использовать летно-технические возможности ЛА, обеспечить безопасность полетов [1].

Несмотря на достигнутые успехи, современные средства измерения параметров вектора истинной воздушной скорости ЛА не всегда удовлетворяют возрастающим требованиям по диапазону рабочих скоростей, точности и надежности работы в реальных условиях эксплуатации. Так широко используемые на различных классах ЛА флюгерные датчики аэродинамических углов из-за наличия в набегающем воздушном потоке подвижного элемента в виде свободно ориентирующегося флюгера критичны к аэродинамическим возмущениям потока и нагружению подвижной системы, из-за малости устанавливающего момента флюгера при скоростях полета менее 100 км/ч имеют значительные погрешности [1]. При определении истинной воздушной скорости ЛА используется аэродинамический метод, для реализации которого с помощью приемника воздушных давлений и приемника температуры воспринимаются полное и статическое давления и температура набегающего воздушного потока. Значения указанных первичных информативных параметров преобразуются в электрические сигналы, которые обрабатываются в соответствии с известным алгоритмом в вычислителе, где определяется величина истинной воздушной скорости. При этом восприятие, передача, преобразование и обработка амплитудных информативных сигналов связаны с появлением методических и инструментальных погрешностей [2].

Известно, что с энергетической точки зрения самым тяжелым участком измерительной цепи любого измерительного устройства является участок от источника измерительной информации до входа первичного измерительного преобразователя, где измерительная информация передается самым малым по мощности потоком энергии [3]. Возникающие на этом участке потери информации уже не могут быть восполнены никакими последующими преобразованиями.

Принципиальная возможность достижения меньших потерь информации при выделении, преобразовании и обработке частотно-временных первичных информативных сигналов, а также естественная возможность получения выходных сигналов непосредственно в цифровой форме определяют перспективность разработки вихревого датчика аэродинамических углов и истинной воздушной скорости, принципы построения которого рассмотрены в работе [1].

В качестве источника первичной измерительной информации об аэродинамическом угле  $\alpha$  и истинной воздушной скорости  $V_B$  летательного аппарата предлагается использовать



эффект образования и периодического срыва вихрей за телами, установленными своими сечениями поперек набегающего воздушного потока. При этом периодический срыв вихрей порождает периодические импульсы давлений вблизи тела, которые распространяются и вдалеке от тела, образуя так называемые вихревые дорожки Кармана [4].

Частота  $f$  образования и срыва вихрей и периодических колебаний давления вблизи поверхности тела при его обтекании набегающим воздушным потоком со скоростью  $V$ , определяется известным эмпирическим соотношением [4]:

$$f = Sh \frac{V}{d}, \quad (1)$$

где  $Sh$  – число (безразмерный коэффициент) Струхала;  
 $d$  – характерный размер обтекаемого тела.

Для цилиндрического тела или шара число Струхала  $Sh = 0,20$ , характерным размером является их диаметр и эффект вихреобразования имеет место при скоростях набегающего воздушного потока, соответствующих значению числа Рейнольдса  $Re$ , находящемуся в интервале  $10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$ .

Для тела пластинчатой формы, установленного поперек потока и расположенного под углом  $\varphi$  к направлению набегающего воздушного потока, характерный размер будет равен:

$$d = l \sin \varphi + h \cos \varphi, \quad (2)$$

где  $l$  и  $h$  – ширина и толщина тела пластинчатой формы. При этом устойчивое вихреобразование имеет место при числах Рейнольдса в диапазоне  $10^3 < Re < 1,6 \cdot 10^5$  при  $20^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ , а число Струхала  $Sh = 0,165 \dots 0,18$  [4].

Как видно из выражений (1) и (2), частота  $f$  периодического образования и срыва вихрей с поверхности тела пластинчатой формы зависит от скорости набегающего воздушного потока  $V$  и углового положения  $\varphi$  пластины относительно направления набегающего воздушного потока, т.е.

$$f = Sh \frac{V}{l \sin \varphi + h \cos \varphi}.$$

Если в плоскости изменения измеряемого аэродинамического угла  $\alpha$  симметрично относительно направления продольной оси ЛА установить две пластины под углом  $2\varphi_0$ , то скорость набегающего воздушного потока  $V$  будет равна по величине истинной воздушной скорости  $V_B$ , а при изменении аэродинамического угла  $\alpha$  пластины будут находиться к направлению набегающего воздушного потока под разными углами  $\varphi_1 = \varphi_0 + \alpha$  и  $\varphi_2 = \varphi_0 - \alpha$ . Частоты вихреобразования за телами также будут разными:

$$f_1 = Sh \frac{V_B}{l_1 \sin(\varphi_0 + \alpha) + h_1 \cos(\varphi_0 + \alpha)};$$

$$f_2 = Sh \frac{V_B}{l_2 \sin(\varphi_0 - \alpha) + h_2 \cos(\varphi_0 - \alpha)}.$$

где  $l_1, l_2$  и  $h_1, h_2$  – параметры соответствующих пластин.

Следовательно, частоты вихрей  $f_1$  и  $f_2$  однозначно определяют величину истинной воздушной скорости  $V_B$ , величину и знак аэродинамического угла  $\alpha$ . Например, отношение частот  $f_1$  и  $f_2$  является функцией, зависящей только от аэродинамического угла вида

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{l_2 \sin(\varphi_0 - \alpha) + h_2 \cos(\varphi_0 - \alpha)}{l_1 \sin(\varphi_0 + \alpha) + h_1 \cos(\varphi_0 + \alpha)}.$$

На рисунке 1 приведены кривые изменения частот  $f_1$ ,  $f_2$  и зависимость  $\frac{f_1}{f_2} = f(\alpha)$  при  $l_1 = l_2 = l = 20 \cdot 10^{-3}$  м,  $h_1 = h_2 = 0$ ,  $\varphi_0 = 45^\circ$  для различных скоростей набегающего воздушного потока.

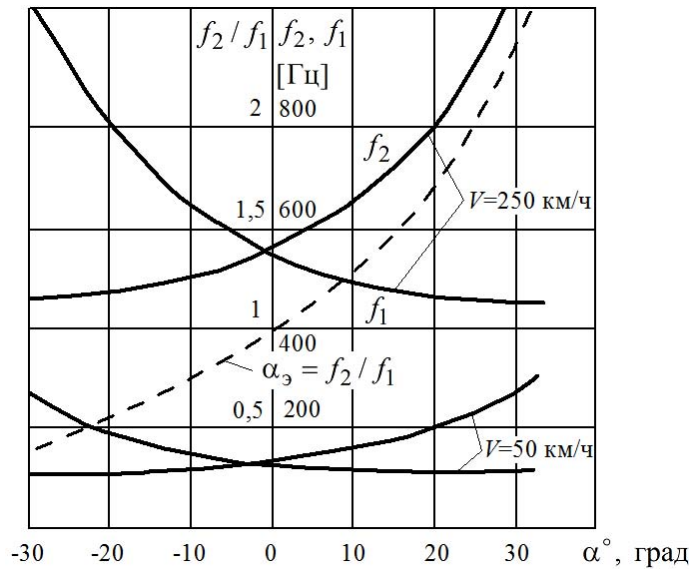


Рисунок 1 – Изменение частот вихреобразования и их отношения от аэродинамического угла

Для получения аналитических зависимостей для определения измеряемого аэродинамического угла  $\alpha$  и истинной воздушной скорости  $V_B$  предлагается в вихревом датчике использовать две клинообразные пирамиды ( $h_1 = h_2 = 0$ ) с одинаковыми размерами основания  $l_1 = l_2 = l$ , расположенные под углом  $2\varphi_0 = 90^\circ$ . Тогда частоты  $f_1$  и  $f_2$  вихреобразования будут иметь вид

$$f_1 = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin(\varphi_0 + \alpha)} = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin \varphi_0 \cos \alpha + \cos \varphi_0 \sin \alpha} = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\cos \alpha + \sin \alpha};$$

$$f_2 = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin(\varphi_0 - \alpha)} = \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\sin \varphi_0 \cos \alpha - \cos \varphi_0 \sin \alpha} = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} \frac{V_B}{\cos \alpha - \sin \alpha}.$$
(3)

Используя (3), получим соотношения вида

$$f_1 + f_2 = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \left| \frac{1}{\cos \alpha + \sin \alpha} + \frac{1}{\cos \alpha - \sin \alpha} \right| =$$

$$= \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \left| \frac{\cos \alpha - \sin \alpha + \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right| = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \frac{2 \cos \alpha}{\cos 2\alpha};$$

$$f_2 - f_1 = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \left| \frac{1}{\cos \alpha - \sin \alpha} - \frac{1}{\cos \alpha + \sin \alpha} \right| =$$

$$= \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \left| \frac{\cos \alpha + \sin \alpha - \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha} \right| = \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \frac{2 \sin \alpha}{\cos 2\alpha};$$

$$\frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2} = \frac{2 \sin \alpha}{2 \cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Тогда аналитическая зависимость для определения аэродинамического угла  $\alpha$  будет иметь вид

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2}.$$
(4)

Для получения зависимости для определения истинной воздушной скорости получим следующие соотношения:

$$f_1 f_2 = \left( \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \right)^2 \frac{1}{(\cos \alpha + \sin \alpha)(\cos \alpha - \sin \alpha)} = \left( \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \right)^2 \frac{1}{\cos 2\alpha};$$

$$f_1^2 + f_2^2 = \left( \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \right)^2 \left[ \frac{1}{(\cos\alpha + \sin\alpha)^2} + \frac{1}{(\cos\alpha - \sin\alpha)^2} \right] = \left( \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_B \right)^2 \frac{1}{\cos^2 2\alpha};$$

$$\frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}} = \left( \sqrt{2} \frac{Sh}{l} V_{\hat{A}} \right).$$

Тогда зависимость для определения истинной воздушной скорости принимает вид

$$V_B = \frac{l}{\sqrt{2} Sh} \frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, измеряя частоты  $f_1$  и  $f_2$  вихреобразования по зависимостям (4) и (5), например, по частотам пульсаций давлений за клиновидными пирамидами, в каналах вихревого датчика определяются аэродинамический угол и истинная воздушная скорость летательного аппарата.

Проведем анализ основных метрологических характеристик вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

Так как устойчивое вихреобразование за клиновидными пирамидами обеспечивается в диапазоне  $20^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ , то справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} \varphi_0 + \alpha_{\max} &\leq 90^\circ & \text{и} & & \alpha_{\max} &\leq 90^\circ - \varphi_0; \\ \varphi_0 + \alpha_{\min} &\geq 20^\circ & \text{и} & & \alpha_{\min} &\geq 20^\circ - \varphi_0. \end{aligned}$$

Тогда диапазон измерения аэродинамического угла вихревого датчика при  $\varphi_0 = 45^\circ$  определяется неравенством  $-25^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ .

Так как устойчивое вихреобразование за клиновидными пирамидами обеспечивается в диапазоне чисел Рейнольдса  $10^3 < Re < 1,6 \cdot 10^5$ , то минимальное  $V_{B\min}$  и максимальное  $V_{B\max}$  значения измеряемой истинной воздушной скорости будут определяться соотношениями

$$V_{\hat{A}\min} > \frac{v_0}{l} 10^3; \quad V_{\hat{A}\max} < \frac{v_{H\max}}{l} 1,6 \cdot 10^5,$$

где  $v_0$  и  $v_{H\max}$  – кинематическая вязкость воздуха вблизи Земли и на максимальной высоте полета  $H_{\max}$ .

Для значений  $l = 20 \text{ мм} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $v_0 = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $H_{\max} = 11000 \text{ м}$ ,  $v_{H\max} = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , получим

$$V_{B\min} > \frac{1,46 \cdot 10^{-5}}{20 \cdot 10^{-3}} 10^3 = 7,3 \text{ м/с} (26,3 \text{ км/ч});$$

$$V_{B\max} < \frac{3,9 \cdot 10^{-5}}{20 \cdot 10^{-3}} 1,6 \cdot 10^5 = 321 \text{ м/с} (1123 \text{ км/ч}).$$

Тогда диапазон измерения истинной воздушной скорости вихревого датчика будет определяться неравенством

$$7,3 \text{ м/с} (26,3 \text{ км/ч}) < V_B < 321 \text{ м/с} (1123 \text{ км/ч}).$$

Так как выделение, преобразование и обработка частотных информативных сигналов можно обеспечить с достаточно высокой точностью, то доминирующая часть инструментальных погрешностей измерения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости вихревого датчика будет определяться технологическим разбросом (допуском)  $\pm \Delta l$  характерного размера  $l$  клиновидных пирамид. Приращения  $\Delta f_1, \Delta f_2$  частот  $f_1, f_2$ , обусловленные технологическим допуском  $\pm \Delta l$ , можно определить как

$$\Delta f_1 = \sqrt{2} \frac{Sh}{\pm \Delta l} V_B \frac{1}{\cos\alpha + \sin\alpha}; \quad \Delta f_2 = \sqrt{2} \frac{Sh}{\pm \Delta l} V_B \frac{1}{\cos\alpha - \sin\alpha}.$$

Тогда значения максимальных инструментальных погрешностей измерения аэродинамического угла  $\alpha$  и истинной воздушной скорости  $V_B$  будут определяться соотношениями:

$$\Delta\alpha_{\max} = \arctg \frac{(f_2 + \Delta f_2) - (f_1 - \Delta f_1)}{(f_1 - \Delta f_1) + (f_2 - \Delta f_2)} - \arctg \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2};$$

$$\Delta V_{\text{Вmax}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{l + \Delta l}{Sh} \frac{(f_1 + \Delta f_1)(f_2 + \Delta f_2)}{\sqrt{(f_1 - \Delta f_1)^2 + (f_2 + \Delta f_2)^2}} - \frac{l}{Sh} \frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}} \right].$$

Для характерного размера  $l = 20 \text{ м} \dot{\text{и}} (20 \cdot 10^{-3} \text{ м})$ , технологического допуска  $\Delta l = \pm 0,05 \text{ м} \dot{\text{и}} \dot{\text{и}}$ ,  $\alpha = 30^\circ$ :

- при минимальной истинной воздушной скорости:  
 $\Delta\alpha_{\max} \approx \pm 0,08^\circ$ ;  $\Delta V_{\text{Вmax}} \approx \pm 0,75 \text{ км/ч}$ ;
- при максимальной истинной воздушной скорости:  
 $\Delta\alpha_{\max} \approx \pm 0,08^\circ$ ;  $\Delta V_{\text{Вmax}} \approx \pm 3 \text{ км/ч}$ .

Следует указать, что амплитуду  $P_m$  периодических пульсаций давления на оси вихревой дорожки Кармана можно оценить величиной  $\rho U^2$  (где  $U$  – скорость движения вихревой дорожки;  $\rho$  – плотность окружающей воздушной среды), которая уменьшается по мере удаления от обтекаемого тела.

Как показано в работе [5], для клиновидной пирамиды величина  $U \approx 0,2V$  и амплитуда пульсаций давления вблизи тела будет равна

$$P_m \approx 0,04\rho V^2.$$

Последнее выражение определяет требования, предъявляемые к порогу чувствительности преобразователя пульсаций давления за обтекаемыми телами и в вихревой дорожке в электрический сигнал, удобный для последующей обработки в вихревом датчике аэродинамического угла и воздушной скорости. В качестве преобразователей пульсаций давлений можно использовать термоанемометрические или тензорезистивные преобразователи с проводниковыми или полупроводниковыми чувствительными элементами, а также пьезоэлектрические и ультразвуковые преобразователи [5].

На рисунке 2 представлена функциональная схема вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

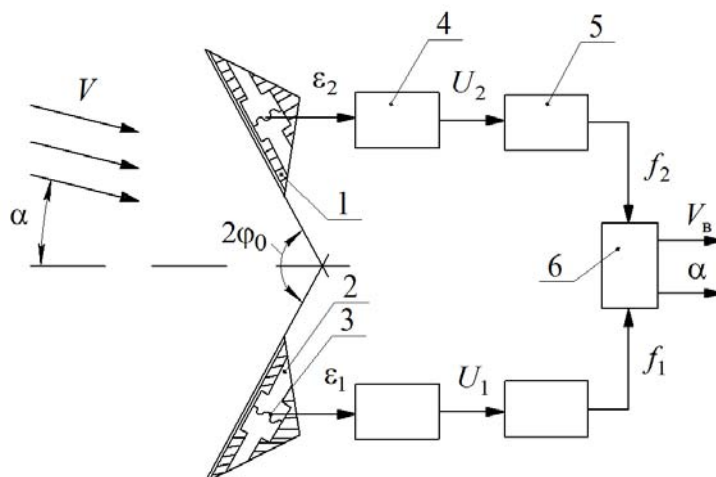


Рисунок 2 – Функциональная схема вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости

Датчик включает два идентичных тела торможения 1, выполненные в виде клинообразных пирамид, на поверхности которых размещены приемники 2 для забора пульсаций давлений вблизи тел. Приемники 2 связаны с преобразователями давлений или перепада давлений 3, частоты выходных сигналов  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  которых равны частотам  $f_1$  и  $f_2$  соответствующих вихрей дорожек Кармана. Электроизмерительные схемы 4, обрабатывая сигналы  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , формируют выходные электрические сигналы  $U_1$  и  $U_2$ . Последние с помощью тригге-

ров Шмидта 5 преобразуются в последовательности импульсов с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , которые поступают в устройство обработки 6, на выходе которого формируются выходные сигналы  $\alpha$  и  $V_B$  по измеряемым аэродинамическому углу и истинной воздушной скорости.

При реализации вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости клиновидные пирамиды можно расположить на одной оси друг над другом. С целью обеспечения измерения в трехмерном набегающем воздушном потоке и устранения влияния другого аэродинамического угла  $\beta$  вектора истинной воздушной скорости летательного аппарата целесообразно перпендикулярно общей оси клиновидных пирамид установить струевыпрямители, выполненные в виде тонких плоских дисков, расположенных на верхних и нижних основаниях клиновидных пирамид, например, как показано на рисунке 3.

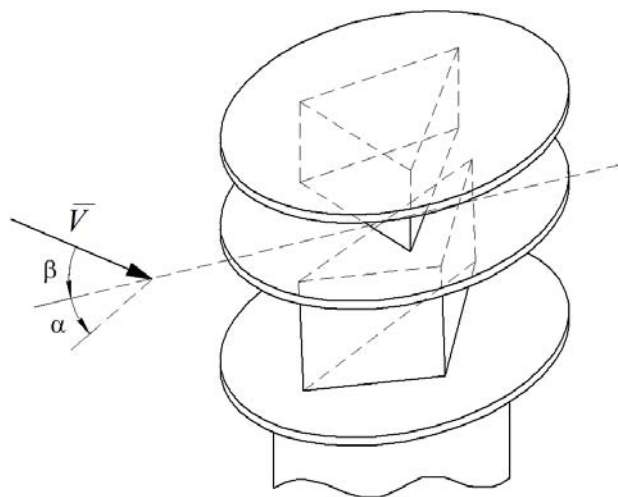


Рисунок 3 – Приемник потока вихревого датчика аэродинамического угла и воздушной скорости со струевыпрямителями

Таким образом, по сравнению с традиционными средствами измерения аэродинамических углов и истинной воздушной скорости, основанными на использовании амплитудно-модулированных первичных информативных сигналов в виде распределения давления по поверхности, обтекаемой набегающим воздушным потоком, вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости имеет ряд существенных преимуществ:

- позволяет одновременно получать информации по двум измеряемым параметрам вектора истинной воздушной скорости летательного аппарата и в цифровой форме;
- на точность измерения аэродинамического угла и воздушной скорости не влияет изменение характера обтекания клиновидных пирамид при различных скоростях набегающего воздушного потока, так как нарушение подобия обтекания, изменяющее распределение давлений по поверхности тел, не приводит к изменению их характерного размера  $l$  и частот вихреобразования, несущих информацию об измеряемых параметрах;
- в формулы для определения частот вихрей не входит сжимаемость воздуха, а отношение частот не зависит от скорости набегающего воздушного потока, а при одинаковой форме тел и от числа Струхалия. Следовательно, полученные тарировочные зависимости не нарушаются в широком диапазоне скоростей полета, что весьма важно;
- смещение точки отрыва пограничного слоя при изменении аэродинамического угла и скорости набегающего воздушного потока также не приводят к снижению точности измерения, так как забор информации о частоте вихрей осуществляется в зоне срыва потока за клиновидным телом;
- в вихревом датчике необходимо измерять не амплитуду давлений или перепадов давлений, а частоту их пульсаций и, следовательно, погрешности, свойственные амплитудным измерениям (дрейф нуля, изменение чувствительности, нестабильность и т.п.) не будут оказывать заметного влияния на точность измерения аэродинамического угла и истинной воздушной скорости;
- отсутствие подвижных элементов в зоне набегающего воздушного потока и в вих-

ревом датчике в целом обеспечивают высокую надежность его работы в условиях реальной эксплуатации.

Следует отметить, что диапазон рабочих скоростей вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости ограничен дозвуковыми скоростями полета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдаткин, В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов [Текст] / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. – 448 с.
2. Браславский, Д.А. Авиационные приборы и автоматы: Учебник для авиационных вузов [Текст] / Д.А. Браславский, С.С. Логунов, Д.С. Пельпор. – М.: Машиностроение, 1978. – 432 с.
3. Новицкий, П.В. Цифровые приборы с частотными датчиками [Текст] / П.В. Новицкий, В.Г. Кнорринг, В.В. Гутников. – Л.: Энергия, 1970. – 423 с.
4. Киясбейли, А.Ш. Вихревые измерительные приборы [Текст] / А.Ш. Киясбейли, М.Е. Перельштейн. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
5. Блохинцев, Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды [Текст] / Д.И. Блохинцев. – М.: Гостехиздат, 1946. – 168 с.

#### **Солдаткин Владимир Михайлович**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань  
Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и информационно-измерительные системы»  
Тел.: +7(843) 236-51-21  
E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

#### **Солдаткина Елена Сергеевна**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань  
Студентка специальности «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы»  
Тел.: +7(843) 236-51-21  
E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

---

V.M. SOLDATKIN, E.S. SOLDATKINA

## CONSTRUCTION AND SIMULATION VORTEX SENSOR ANGLE OF AERODYNAMIC AND AIR SPEED

*The features of construction, models of algorithms data processing and basic errors of the vortex sensor aerodynamic angle and true airspeed of subsonic aircraft.*

**Keywords:** aerodynamic angles, airspeed, measurement, vortex, sensor, constructing, simulation.

### BIBLIOGRAPHY

1. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letatel'nyh apparatov [Tekst] / V.M. Soldatkin. - Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta, 2001. 448 s.
2. Braslavskij, D.A. Aviacionnye pribory i avtomaty: Uchebnik dlja aviacionnyh vuzov [Tekst] / D.A. Braslavskij, S.S. Logunov, D.S. Pel'por. - M.: Mashinostroenie, 1978. - 432 s.
3. Novickij, P.V. Cifrovyje pribory s chastotnymi datchikami [Tekst] / P.V. Novickij, V.G. Knorring, V.V. Gutnikov. - L.: Jenergija, 1970. - 423 s.
4. Kijasbejli, A.Sh. Vihrevye izmeritel'nye pribory [Tekst] / A.Sh. Kijasbejli, M.E. Perel'shtejn. - M.: Mashinostroenie, 1972. - 152 s.
5. Blohincev, D.I. Akustika neodnorodnoj dvizhuwejsja sredy [Tekst] / D.I. Blohincev. - M.: Goste-hizdat, 1946. - 168 s.

#### **Soldatkin Vladimir Mihaylovich**

Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan  
Ph.D., professor, head of department "Machinery and information-measuring systems"  
Tel.: +7(843) 236-51-21  
E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

#### **Soldatkina Elena Sergeevna**

Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan  
Student  
Tel.: +7(843) 236-51-21  
E-mail: xli@piis.kstu-kai.ru

В.Т. ЕРЕМЕНКО, А.В. ТЮТЯКИН

## ПОДХОД К ВЫБОРУ ПРОФИЛЕЙ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Рассмотрены базовые аспекты автоматизированного выбора профилей (типов, характеристик и параметров) средств реализации функций семиуровневой модели неразрушающего контроля/диагностики. Данный подход обеспечивает выбор профилей, в максимальной степени удовлетворяющих требованиям к системе, при минимизации субъективных ошибок выбора.*

**Ключевые слова:** системы неразрушающего контроля и диагностики; профиль; сбор и обработка данных; выбор профилей.

**Актуальность проблемы.** Системы неразрушающего контроля и диагностики (СНКД) технических объектов широко распространены в различных отраслях промышленности, строительства и транспорта [1]. Эффективность работы СНКД, в том числе достоверность контроля и диагностики, в значительной степени определяется корректностью выбора профилей функций сбора и обработки данных в СНКД, т. е. сочетаний типов, характеристик и параметров средств реализации указанных функций. Применяемые до настоящего времени подходы к решению данной задачи не вполне обеспечивают выбор предпочтительных профилей при каждом из возможных сочетаний характеристик объекта контроля и диагностики (ОКД). Поэтому актуальной является проблема разработки подходов, обеспечивающих корректный выбор профилей сбора и обработки данных в СНКД в процессе их проектирования и эксплуатации. Настоящая статья посвящена некоторым аспектам названной проблемы.

**Постановка задачи.** Обобщенная модель функционирования СНКД, базирующаяся на описанной в [2] семиуровневой модели процесса измерения (частными случаями которого являются контроль и диагностика), приведена на рисунке 1, где:

ПСОД и ПСАД – подсистемы сбора и обработки данных и анализа данных соответственно;

ФУ, СУ, УЗ, УПД, УСБ, УПМ и УЗН – физический и сигнальный уровни; уровни знаков, первичных данных, сообщений, пользовательских моделей и знаний соответственно [2];

ТР, БЗ и НД – соответственно требования к СНКД; базовые знания об ОКД и нормативная документация;

АМ и СМ – априорная и текущая модели ОКД соответственно;

SM, SP, SDS, SNS, SSR – множества требований к сообщениям, к средствам обработки первичных данных, АЦ-преобразования, нормализации и селекции выходных сигналов датчиков, стимулирования и рецепции ОКД соответственно;

PSR, PNS, PDS, PDP, PM – профили соответственно стимулирования и рецепции ОКД, нормализации и селекции выходных сигналов датчиков, АЦ-преобразования, обработки его результатов и формирования сообщений;

MI и MA – соответственно методики интегрирования сообщений в текущую модель ОКД и методики ее анализа;

СНР – текущее сочетание характеристик и параметров ОКД;

XI, NS – множество информативных, XI, и паразитных, NS, составляющих выходных сигналов датчиков;

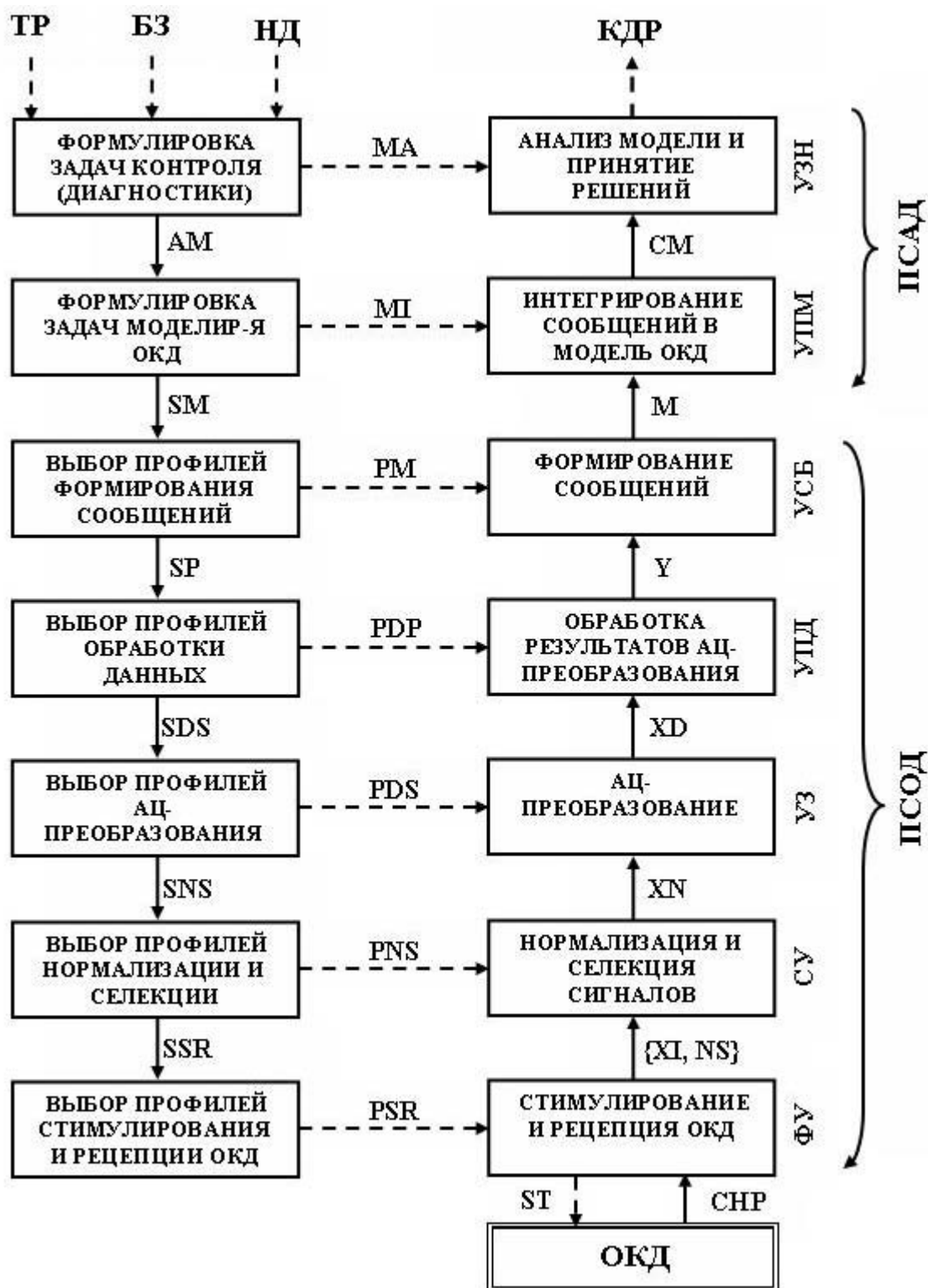


Рисунок 1 – Обобщенная модель процессов неразрушающего контроля и диагностики технических объектов

XN, XD, Y, M – множества выходных сигналов датчиков после нормализации/селекции, отсчетов АЦП, результатов обработки первичных данных и множество сообщений соответственно;

КДР – контрольно-диагностические решения.

Предпочтительными являются профили сбора и обработки данных в СНКД, в совокупности обеспечивающие удовлетворение следующего базового критерия:



$$\left\{ \left. \begin{array}{l} I_p \\ \wedge \\ i_p=1 \end{array} \right\} \left\{ \left. \begin{array}{l} Q_{i_p s_p} \in Q_{i_p} \\ \forall p \end{array} \right\} \wedge \right. \\ \left. \left\{ \left. \delta_{x_n} = \left\{ \sum_{p=1}^P \sum_{k_p=1}^{K_p} \delta_{x_n k_p s_p}^{\alpha} \in \{HP; NS\} \right\} \right\}^{1/\alpha} \leq \delta_{x_n \max} \right\} \right|_{\forall x_n} = 1; \quad (1)$$

где  $s_p$  – выбранный вариант профиля реализации  $p$ -ой функции;

$I_p$  – число качественных показателей профиля реализации  $p$ -ой функции, служащих критериями его выбора;

$Q_{i_p s_p}$  –  $i$ -й качественный показатель  $s$ -го варианта профиля реализации  $p$ -ой функции;

пример показателя  $Q_{i_p}$  – характер вейвлета (вещественный, комплексный, ортогональный, «грубый» и т. п.), применяемого при цифровой вейвлет-фильтрации или при вейвлет-анализе информативных сигналов;

$Q_{i_p}$  – множество приемлемых для решения конкретной задачи контроля или/и диагностики вариантов показателя  $Q_{i_p}$ ; пример множества  $Q_{i_p}$  – множество комплексных вейвлетов;

$\delta_{x_n}$  – предел суммарной погрешности определения параметра  $x_n$ ;

$P$  – общее количество функций преобразования и обработки сигналов, профили реализации которых влияют на данную погрешность;

$K_p$  – число количественных параметров профиля реализации  $p$ -ой функции, служащих критериями его выбора;

$\delta_{x_n k_p s_p} \in \{HP; NS\}$  – предел составляющей погрешности определения параметра  $x_n$

ОКД, обусловленной неидеальным значением  $k$ -го параметра профиля реализации  $p$ -ой функции, при  $s$ -м варианте данного профиля и сочетаниях характеристик ОКД и неинформативных компонент выходных сигналов датчиков **СНП** и **НС** соответственно; пример  $\delta_{x_n k_p s_p} \in \{HP; NS\}$  – составляющая погрешности определения амплитуды сигнала, обусловленная неполным подавлением шумов при некотором  $s$ -м варианте профиля цифровой фильтрации;

$\delta_{x_n \max}$  – максимально допустимая погрешность определения параметра  $x_n$ , оговариваемая требованиями к СНКД;

$\alpha = 1$  при определении погрешностей методом минимакса и  $\alpha = 2$  – при их оценивании вероятностным методом.

Таким образом, выбор профилей сбора и обработки данных в СНКД сводится к удовлетворению критерия (1) при любом возможном сочетании **СНП** и **НС**.

До настоящего времени наиболее распространенным подходом к решению данной задачи является полное возложение выбора профилей на разработчика СНКД. Однако данному подходу присущи следующие основные недостатки:

– ввиду большого разнообразия возможных профилей, их выбор исключительно силами разработчика СНКД достаточно трудоемок, а корректность результатов в значительной степени определяются его квалификацией и опытом, т. е. субъективными факторами;

– при использовании данного подхода во многих практических случаях затруднителен выбор профилей, приемлемых при всех возможных сочетаниях параметров и характеристик ОКД, а также неинформативных компонент выходных сигналов датчиков.

Известен также подход, состоящий в полном или частичном выборе профилей *пользователем* СНКД в процессе ее эксплуатации, на основании текущего состояния ОКД. Однако пользователь обычно не является квалифицированным специалистом в области преобразования, обработки и анализа данных. Поэтому велика вероятность того, что выбранные им профили не окажутся предпочтительными.

Таким образом, основной задачей разработки подходов к выбору профилей сбора и обработки данных в СНКД является устранение недостатков, присущих известным подходам, т. е. обеспечение свободного от субъективных ошибок выбора предпочтительных профилей при любых возможных сочетаниях **СНР** и **NS**.

**Предлагаемый подход к выбору профилей сбора и обработки данных в СНКД.** От вышеназванных недостатков свободен *подход*, предложенный в [3, 4]. Он основан на автоматизированном выборе профилей из их электронной базы посредством специального программного обеспечения на этапе проектирования СНКД или/и в процессе ее эксплуатации, в режиме интерактивного взаимодействия с разработчиком или/и пользователем СНКД. Исходными данными для выбора служат требования к СНКД, базовые знания об ОКД, нормативная документация, а также, при выборе профилей в процессе эксплуатации СНКД – оценки текущих характеристик и параметров ОКД и неинформативных составляющих выходных сигналов датчиков. Данный подход не исключает выбор ряда профилей полностью разработчиком СНКД, при условии, что они четко определяются требованиями к СНКД, базовыми знаниями об ОКД, нормативной документацией или сочетанием данных факторов.

В таблице 1 приведены основные элементы профилей реализации базовых функций каждого из уровней модели, представленной на рисунке 1, и основные факторы, определяющие предпочтительные профили. В ней же приведены базирующиеся на предлагаемом подходе рациональные методы выбора элементов каждого из профилей, обозначенные как: ПР(Р) – задание разработчиком на этапе проектирования; ПР(А) – автоматизированный выбор на этапе проектирования в режиме интерактивного взаимодействия с разработчиком; ПР(●) + Э(А) – дополнение выбора на этапе проектирования автоматизированным выбором в процессе эксплуатации в режиме интерактивного взаимодействия с пользователем СНКД.

Таблица 1 – Основные элементы профилей сбора и обработки данных в СНКД и рациональные методы их выбора

Уровень	Основные функции	Основные элементы профиля	Основные факторы, определяющие предпочтительный профиль	Рациональный метод выбора
1	2	3	4	5
ФУ	Формирование стимулирующих сигналов (опционально)	Характер и форма стимулирующих сигналов	ТР; БЗ; НД	ПР(Р)
		Параметры стимулирующих сигналов	ТР; БЗ; НД; <b>СНР</b>	ПР(Р) + + Э(А)
	Преобразование множества параметров ОКД в выходные сигналы датчиков	Типы датчиков	ТР; БЗ; НД	ПР(Р)
		Параметры датчиков	ТР; БЗ; НД; <b>СНР</b>	ПР(Р) + + Э(А)

1	2	3	4	5
СУ	Масштабирование (усиление или аттенуация) выходных сигналов датчиков	Типы блоков масштабирования	ТР; БЗ	ПР(Р)
		Коэффициенты передачи блоков масштабирования	ТР; БЗ; <b>СНР</b>	ПР(Р) + +Э(А)
	Антизлайзинговая фильтрация	Тип передаточной характеристики и порядок фильтра. Частота среза	ТР; БЗ; <b>PDS ; СНР</b>	ПР(А)+ +Э(А)
УЗ	Аналого-цифровое преобразование	Тип и разрядность АЦП	ТР; БЗ	ПР(Р)
		Частота дискретизации	ТР; БЗ; <b>СНР</b>	ПР(А)+ +Э(А)
УПД	Цифровая фильтрация неинформативных компонент	Типы и параметры цифровых фильтров	ТР; БЗ; <b>NS ; СНР</b>	ПР(А)+ +Э(А)
	Коррекция искажений информативных сигналов (опционально)	Алгоритмы коррекции	ТР; БЗ	ПР(Р)
		Сочетания параметров и опциональных возможностей алгоритмов	ТР; БЗ; <b>NS ; СНР</b>	ПР(А)+ +Э(А)
	Определение информативных параметров выходных сигналов датчиков	Алгоритмы анализа данных	ТР; БЗ; НД	ПР(Р)
Сочетания параметров и опциональных возможностей алгоритмов		ТР; БЗ; <b>NS ; СНР</b>	ПР(А)+ +Э(А)	
УСБ	Оформление сообщений	Структура и форматы сообщений	ТР; НД	ПР(Р)
	Сжатие сообщений (опционально)	Алгоритм сжатия, его параметры и опциональные возможности	ТР; БЗ; <b>NS ; СНР</b>	ПР(А)+ +Э(А)
	Защита сообщений (опционально)	Стандарты / протоколы кодирования	ТР; БЗ; НД	ПР(Р)
	Помехоустойчивое кодирование сообщений (опционально)	Стандарты / протоколы кодирования		
УПМ	Интегрирование сообщений в модель ОКД	Методики интегрирования сообщений в модель	ТР; БЗ; НД	ПР(Р)
УЗН	Анализ модели ОКД и принятие контрольно-диагностических решений	Методики анализа и принятия решений	ТР; БЗ; НД	ПР(Р)

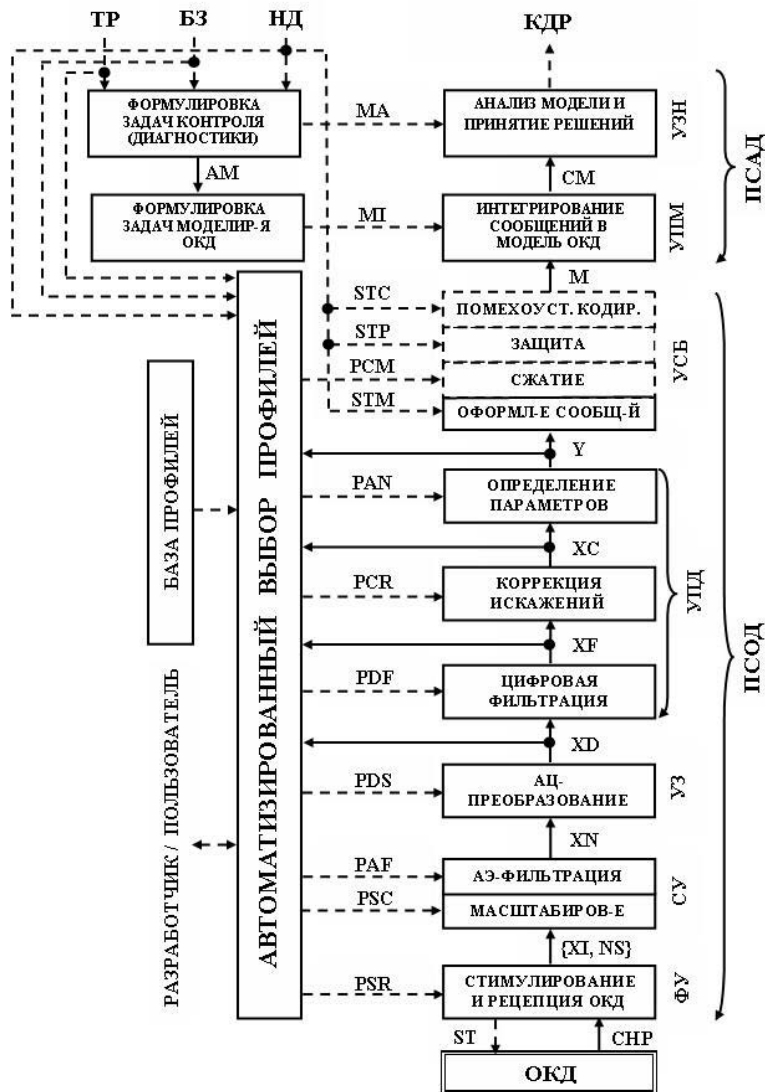


Рисунок 2 – Модель процессов неразрушающего контроля и диагностики технических объектов с автоматизированным выбором профилей сбора и обработки данных

Предлагаемый подход иллюстрирует рисунок 2, где:

**PSC, PAF, PDF, PCR, PAN, PCM** – профили соответственно масштабирования, антизлайзинговой фильтрации, цифровой фильтрации, коррекции искажений информативных сигналов, их анализа и сжатия данных;

**STM, STP, STC** – стандарты/протоколы оформления сообщений, защиты данных и помехоустойчивого кодирования соответственно;

**XF, XС** – множества отсчетов выходных сигналов датчиков после цифровой фильтрации и после коррекции искажений соответственно;

остальные сокращения и условные обозначения аналогичны таковым на рисунке 1.

Процедуры, обозначенные на рисунке 2 штриховыми линиями, могут отсутствовать в ряде частных случаев.

База профилей (см. рис. 2) представляет собой структурированную электронную таблицу, содержащую:

- варианты профилей реализации функций сбора и обработки данных, сгруппированные по сочетаниям требований к СНКД, параметров и характеристик ОКД, а также неинформативных составляющих выходных сигналов датчиков, при которых потенциально предпочтителен тот или иной вариант профиля;

- показатели  $Q_{i_p}$  каждого из вариантов профиля, а также обеспечиваемые соответствующим вариантом значения  $\delta_{x_n k_p}$   $\{ \text{СНП; NS} \}$  (см. выражение (1)).

*Выбор профилей* в процессе разработки и эксплуатации СНКД реализуется на основе базы профилей, под управлением программного обеспечения, в режиме интерактивного взаимодействия с разработчиком и с пользователем СНКД, осуществляемого посредством «подсказок и демонстраций».

Ряд частных вопросов практической реализации подхода, описываемого рисунком 2, освещен в источниках [5 – 8].

**Заключение.** Предлагаемый подход к выбору профилей сбора и обработки данных в СНКД позволяет решить актуальную задачу обеспечения максимально возможной достоверности контроля и диагностики за счет выбора профилей, наиболее предпочтительных при каждом конкретном сочетании требований к СНКД, состояния ОКД и параметров выходных сигналов датчиков, независимо от квалификации и опыта как разработчиков, так и пользователей СНКД. Данный подход успешно применен при создании ряда СНКД промышленного, а также научно- и учебно-исследовательского назначения. Также на его основе создана программа CAD-DAS [3], осуществляющая автоматизированный выбор профилей реализации функций сигнального уровня, а также уровней знаков и первичных данных функциональной модели СНКД и предназначенная для применения при проектировании и эксплуатации СНКД различного назначения.

*Работа выполнена в рамках Государственного контракта №16.740.11.0041 "Разработка распределенных автоматически профилируемых средств обработки, архивирования и защиты диагностической информации" (заказчик – Министерство образования и науки РФ), в соответствии с Федеральной целевой программой "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 гг.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник [Текст] / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Кнорринг, В.Г. Системные аспекты измерений [Текст] / В.Г. Кнорринг, Н.Ю. Трофимова // Датчики и системы. – 2006. – №10. – С. 52 –59.
3. Тютякин, А.В. Программа CAD-DAS автоматизированного выбора характеристик и параметров трактов ввода информации для систем сбора данных [Электронный ресурс] // Электронный журнал "Исследовано в России", 179, стр. 1848 – 1856, 2006 г. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/263.pdf>.
4. Еременко, В.Т. Выбор операционных моделей обработки, архивирования и защиты изображений в распределенных системах технической диагностики [Текст] / В.Т. Еременко, А.В. Тютякин, Е.А. Семашко // Информационные системы и технологии. – 2011. – №3. – С. 115 – 119.
5. Тютякин, А.В. К выбору передаточных характеристик антиэлайзинговых фильтров [Текст] / А.В. Тютякин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – №5. – С. 20 – 22.
6. Тютякин, А.В. О фильтрации представляемых в частотной области входных сигналов систем контроля физических величин [Текст] / А.В. Тютякин // Контроль. Диагностика. – 2007. – №3. – С. 64, 69 – 73.
7. Тютякин А.В. О фильтрации представляемых во временной области входных сигналов систем контроля физических величин [Текст] / А.В. Тютякин // Контроль. Диагностика. – 2008. – №4. – С. 27 – 31.
8. Еременко, В.Т. Методика выбора характеристик фильтров изображений в системах технической диагностики [Текст] / В.Т. Еременко, А.В. Тютякин, А.А. Кондрашин // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 10. – С. 52 – 56.

### **Еременко Владимир Тарасович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г. Орел

Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Тел.: +7(4862) 45-57-57

E-mail: wladimir@orel.ru

### **Тютякин Александр Васильевич**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г. Орел

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Тел.: +7(4862) 45-57-57

E-mail: avt@rbcmail.ru

## AN APPROACH TO THE SELECTION OF DATA ACQUISITION AND PROCESSING PROFILES IN THE SYSTEMS OF TECHNICAL OBJECTS NON-DESTRUCTIVE TESTING AND DIAGNOSTICS

*The basic aspects of realization aids profiles (i.e. the types, characteristics and parameters) automated selection for the functions of non-destructive testing and diagnostics seven-layer model are examined. This approach affords profiles selection which maximally meets the system specifications at minimizing of subjective mistakes.*

**Keywords:** *non-destructive testing and diagnostics systems; data acquisition and processing; profile; profiles selection.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Nerazrushajuwij kontrol' i diagnostika: Spravochnik [Tekst] / Pod red. V.V. Kljueva. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 656 s.
2. Knorring, V.G. Sistemnye aspekty izmerenij [Tekst] / V.G. Knorring, N.Ju. Trofimova // Datchiki i sistemy. – 2006. – №10. – S. 52–59.
3. Tjutjakin, A.V. Programma CAD-DAS avtomatizirovannogo vybora harakteristik i parametrov traktov vvoda informacii dlja sistem sbora dannyh [Jelektronnyj resurs] // Jelektronnyj zhurnal "Issledovano v Rossii", 179, str. 1848–1856, 2006 g. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/263.pdf>.
4. Eremenko, V.T. Vybor operacionnyh modelej obrabotki, arhivirovanija i zawity izobrazhenij v raspredeleennyh sistemah tehničeskoj diagnostiki [Tekst] / V.T. Eremenko, A.V. Tjutjakin, E.A. Semashko // Informacionnye sistemy i tehnologii. – 2011. – №3. – S. 115–119.
5. Tjutjakin, A.V. K vyboru peredatochnyh harakteristik antijelajzingovyh fil'trov [Tekst] / A.V. Tjutjakin // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. – 2005. – №5. – S. 20–22.
6. Tjutjakin, A.V. O fil'tracii predstavljajemyh v chastotnoj oblasti vhodnyh signalov sistem kon-trolja fizičeskih veličin [Tekst] / A.V. Tjutjakin // Kontrol'. Diagnostika. – 2007. – №3. – S. 64, 69–73.
7. Tjutjakin A.V. O fil'tracii predstavljajemyh vo vremennoj oblasti vhodnyh signalov sistem kon-trolja fizičeskih veličin [Tekst] / A.V. Tjutjakin // Kontrol'. Diagnostika. – 2008. – №4. – S. 27–31.
8. Eremenko, V.T. Metodika vybora harakteristik fil'trov izobrazhenij v sistemah tehničeskoj di-agnostiki [Tekst] / V.T. Eremenko, A.V. Tjutjakin, A.A. Kondrashin // Kontrol'. Diagnostika. – 2011. – № 10. – S. 52–56.

#### **Eremenko Vladimir Tarasovich**

State University – ESPC, Orel

Ph.D., professor, head of department "Electronics, Computing and Information Security"

Tel.: +7(4862) 45-57-57

E-mail: wladimir@orel.ru

#### **Tiutiakin Alexandr Vasilyevich**

State University – ESPC, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department "Electronics, Computing and Information Security"

Tel.: +7(4862) 45-57-57

E-mail: avt@rbcmail.ru

М.В. КОРОЛЁВ, Е.И. ЛАРКИН, Ю.Б. ИВАНОВ

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ЗАШУМЛЕНИЯ

*При эксплуатации систем виброакустического зашумления отношение «сигнал-шум» на поверхности зашумляемой конструкции со временем изменяется, при этом снижение уровня вибропомехи относительно уровня информационного вибросигнала ниже установленных норм приводит к невыполнению требований защиты речевой информации от возможных технических каналов утечки. Предлагаемый в статье подход к обеспечению защищенности речевой информации позволяет поддерживать отношение «сигнал-шум» в пределах, обеспечивающих требуемую степень защищенности речевой информации от утечки, путем организации гибкой стратегии технического обслуживания систем зашумления, а при невозможности ее организации – определить критические моменты времени, в которые необходимо снижение категории защищенности помещения от утечки.*

**Ключевые слова:** защита речевой информации, системы виброакустического зашумления, гибкая стратегия технического обслуживания, перехват защищаемой информации злоумышленником.

В современных условиях защита информации от утечки по техническим каналам по праву занимает одно из главных мест в системе информационной безопасности государства. Наличие ряда характерных особенностей речевой информации позволяет выделить защиту речевой информации в самостоятельное и исключительно важное направление комплексной защиты. В условиях стремительного развития технических средств разведки одним из важнейших направлений защиты речевой информации является использование средств активной защиты – систем виброакустического зашумления (СВАЗ). Защищенностью информации называется соответствие показателей эффективности защиты информации требованиям нормативных документов, т.е. степень соответствия результатов защиты информации поставленной цели – предотвращению утечки защищаемой информации. Для оценки эффективности защиты речевой информации наиболее часто используют словесную разборчивость ( $W$ ), численное значение которой рассчитывается по отношению уровней речевого сигнала и шума (ОСШ) в местах предполагаемого расположения датчиков аппаратуры акустической разведки. При этом требуемый уровень защищенности обеспечивается при соответствующих значениях разборчивости перехваченного речевого сообщения  $W_{\text{доп}}$ , заданных документацией [1]. Для повышения защищенности необходимо уменьшить словесную разборчивость, т.е. снизить ОСШ в местах возможного размещения датчиков аппаратуры акустической разведки. Проведенные исследования показали, что в процессе эксплуатации СВАЗ происходит постепенное изменение ОСШ в зашумляемой СВАЗ среде, вызванное целым рядом дестабилизирующих факторов. Источники помехового излучения – вибропреобразователи, излучающие виброакустическую помеху, сами постоянно находятся под воздействием вибрации, что ускоряет процессы старения их элементов и повышает вероятность разрушения элементов крепления излучателей к несущим конструкциям. Снижение качества крепления, механический износ или старение материалов излучателей, изменение механических свойств элементов ограждающих конструкций и другие дестабилизирующие факторы приводят к постепенному изменению ОСШ в зашумляемой среде, ведут к изменению разборчивости и, следовательно, к повышению вероятности неконтролируемой утечки защищаемой информации. В связи с этим возникает задача обеспечения требуемого уровня защищенности речевой информации, маскируемой СВАЗ от утечки, т.е. необходимо постоянно поддерживать требуемое значение ОСШ в зашумляемой среде. Разработчики аппаратуры пытаются решить описанную проблему путем совершенствования системы контроля работоспособности систем зашумления и путем

многократного резервирования. Каждому из этих подходов присущи серьезные недостатки, например, большая стоимость подобных систем и повышенная трудоемкость их обслуживания. Кроме того, большинство действующих в настоящее время СВАЗ такой подсистемы контроля не имеет, а периодическое визуальное обследование всех элементов развернутой системы и даже периодическая инструментальная проверка уровня зашумляющих сигналов в элементах конструкции помещения не полностью решают проблему поддержания требуемой степени защищенности информации от утечки, поскольку открытым остается вопрос о качестве работы системы в последующие межпроверочные периоды времени.

Предлагается способ поддержания требуемой степени защищенности информации от утечки, основанный на периодическом контроле ОСШ и доведении этих значений до требуемых, т.е. на своевременном проведении технического обслуживания (ТО) СВАЗ. При гибкой стратегии ТО периодичность и объем производимых работ могут изменяться в зависимости от результатов прогноза технического состояния объектов эксплуатации. Существующая нормативно-техническая документация (НТД) и инструкции по эксплуатации систем шумления [2] не учитывают индивидуальное техническое состояние и особенности эксплуатации конкретных СВАЗ. Необходимо так организовать техническую эксплуатацию, чтобы путем своевременных профилактических работ провести подрегулировку или замену изделия, так как, с одной стороны, пассивное ожидание отказа системы виброакустической маскировки ведет к появлению возможности утечки информации из-за неконтролируемого снижения ОСШ с течением времени, с другой – частые проверки состояния системы шумления приводят к снижению коэффициента технического использования СВАЗ из-за простоев на обслуживание и росту затрат на проведение ТО [3].

Таким образом, возникает задача разработки научно обоснованного подхода к определению оптимального периода ТО, при котором СВАЗ удовлетворяла бы предъявляемым к ней требованиям по обеспечению защищенности информации и требованиям по надежности при сокращении затрат на эксплуатацию. При этом должны быть учтены такие особенности СВАЗ, как тип и количество входящих в ее состав виброизлучателей, условия их эксплуатации, режимы работы, техническое состояние и особенности дрейфа параметров конкретного изделия во времени, а также категория защищаемой с помощью СВАЗ информации. В результате проведение технического обслуживания СВАЗ с оптимальной по введенным критериям периодичностью приводит к поддержанию требуемой степени защищенности.

Для правильного выбора периода проведения ТО СВАЗ необходимо знать, как будет изменяться ОСШ на всем протяжении эксплуатации СВАЗ, т.е. определить некоторую закономерность, описывающую изменение ОСШ во времени. Выходные параметры СВАЗ имеют случайное начальное значение (отклонение в пределах допуска), кроме того, они изменяются под воздействием многочисленных дестабилизирующих факторов. Поэтому изменение выходных параметров СВАЗ во времени следует рассматривать как квазислучайный (квазидетерминированный) процесс. Следовательно, для определения оптимального периода ТО необходимо спрогнозировать период работоспособности СВАЗ на основе изучения закономерностей постепенного изменения их параметров в процессе предыдущего периода эксплуатации. По результатам наблюдений за определяющим параметром системы шумления (ОСШ) можно сделать научно обоснованные выводы об ее состоянии, т.е. о возможности ее использования по назначению в течение последующего периода эксплуатации.

В зависимости от полноты объема массива исходных данных, полученных по результатам измерений в предшествующие моменты времени, практический интерес в процессе эксплуатации систем виброакустического шумления имеют модели процессов дрейфа ОСШ двух видов:

- 1) выражаемых через полный ансамбль реализаций конечной длительности:

$$\text{ОСШ}(t) \sim \{\text{ОСШ}_k(t)\}; k = \overline{1, \infty}; t \in T, \quad (1)$$

где  $k$  – номер реализации случайного процесса дрейфа ОСШ конкретной СВАЗ;



2) выражаемых через ограниченную совокупность реализаций бесконечной длительности:

$$ОСШ(t) \sim \{ОСШ_k(t)\}; k = \overline{1, N}; t \in (0, \infty), \quad (2)$$

где  $N$  – число контролируемых комплектов СВАЗ.

Однако указанным моделям присущ общий недостаток: сбор статистических данных для полноценного определения характеристик безотказности систем зашумления необходимо проводить на протяжении длительного интервала времени. Следовательно, на широкое использование моделей (1) и (2) в процессе эксплуатации систем зашумления накладывается ограничение. Это ограничение предлагается максимально ослабить посредством использования квазидетерминированных моделей, которые, кроме того, обеспечивают взаимосвязь процессов (1) и (2). Квазидетерминированный процесс дрейфа ОСШ в общем виде следует рассматривать как неслучайную функцию времени, зависящую от нескольких случайных величин

$$\hat{I} \tilde{N} \hat{O} \hat{e} \hat{a} t = \varphi \hat{e} \hat{a} t, \tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n, \quad (3)$$

где  $\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n$  – случайные коэффициенты;

$n$  – число учитываемых коэффициентов математической модели.

В качестве базовых функций для таких моделей могут использоваться различные детерминированные функции – как линейные, так и нелинейные. В зависимости от условий эксплуатации каждая из них может описывать закономерность временного дрейфа ОСШ и имеет случайные коэффициенты, распределённые по заданному закону. При этом задача прогнозирования сводится к определению плотности распределения времени (ПРВ) до выхода ОСШ за установленные пределы, т.е. к нахождению плотности распределения функции по заданному распределению ее аргументов. В качестве базовых функций для квазидетерминированных моделей дрейфа параметра ОСШ( $t$ ) с учетом выявленного процесса его изменения во времени могут быть выбраны детерминированные функции времени видов:

– линейная модель  $ОСШ(t) = a_0 - a_1 t$ ; (4)

– логарифмическая модель  $\hat{I} \tilde{N} \hat{O} (t) = a_0 - a_0 \cdot \ln(1 - \frac{a_1 t}{a_0})$ ; (5)

– экспоненциальная модель  $\hat{I} \tilde{N} \hat{O} (t) = a_0 \cdot \hat{a}^{\frac{-a_1 t}{a_0}}$ , (6)

где  $a_0$  – начальное значение ОСШ;

$a_1$  – коэффициент, характеризующий скорость изменения ОСШ во времени.

Выбор вида функции (4–6), описывающей изменение ОСШ во времени, определяется с учетом дестабилизирующих факторов, влияющих на техническое состояние конкретных СВАЗ. Так, например, для имеющихся данных периодического контроля ОСШ( $t_k$ ),  $k = 0, \dots, n$  опробуется каждая из моделей (4–6). Последняя точка контроля берется за оценку результата прогнозирования, а в качестве функции, описывающей изменение ОСШ во времени, выбирается тот вид модели, при котором дисперсия ошибки прогнозирования минимальна. Применительно к КД-процессу дрейфа ОСШ данную процедуру прогнозирования можно представить следующим образом:

1) пусть задан КД-процесс ОСШ вида  $\Pi_{кд} = \varphi_{кд}(t; a_1, \dots, a_n)$ . Рассмотрим  $m$  сечений процесса  $\Pi(t_1) \dots \Pi(t_m)$ , взятых в фиксированные моменты времени  $t_1, \dots, t_m$ , как функции от случайных величин  $a_1, \dots, a_n$ , записав их в виде неслучайных функций  $\Pi_1 \dots \Pi_m$ , зависящих от случайных аргументов  $a_1, \dots, a_n$ , при этом функциональная связь между  $\Pi_{кд}(t_1) \dots \Pi_{кд}(t_m)$  и  $a_1, \dots, a_n$  имеет вид:

$$\begin{cases} \hat{I} \tilde{N} \hat{O} \hat{e} \hat{a} t_1 = f_1(t_1; \hat{a}_1 \dots \hat{a}_n), \\ \dots \\ \hat{I} \tilde{N} \hat{O} \hat{e} \hat{a} t_m = f_m(t_m; \hat{a}_1 \dots \hat{a}_n); \end{cases} \quad (7)$$



качества функционирования СВАЗ является также вероятность защищенности информации от утечки по техническим каналам  $D_{\text{цэ}}(\tau)$  – вероятность того, что значение ОСШ (разборчивости речи  $W$ ) на интервале использования СВАЗ по назначению не превысит своего предельно допустимого значения:

$$D_{\text{цэ}}(\tau) = P(\hat{W} \leq \hat{W}_{\text{доп}}) = P(W \leq W_{\text{доп}}) = 1 - D_{\text{утечка}}(\tau), \quad (11)$$

где  $D_{\text{утечка}}(\tau) = \int_0^{\tau} \omega(t) dt$  – вероятность утечки защищаемой речевой информации.

В этом выражении  $\tau$  – интервал времени до следующего ТО СВАЗ, а значения максимально допустимой разборчивости определяются в соответствии с нормативными документами. Зависимость (11) делает возможным расчет показателей защищенности, достигаемой при заданной периодичности ТО, или наоборот, расчет времени начала управляющего воздействия для достижения заданной степени защищенности.

На основе введенных показателей качества могут быть определены частные показатели эффективности функционирования СВАЗ и сформирован обобщенный показатель эффективности. При использовании метода «идеальной точки» зависимость сформированного обобщенного показателя эффективности функционирования (ОПЭФ) СВАЗ от периодичности ТО, подлежащего минимизации, будет иметь вид:

$$\hat{P}_{\text{доп}} - \hat{Y}(\tau) = \sqrt{(1 - \hat{E}_{\text{цэ}}(\tau))^2 + \hat{N}(\tau)^2} \quad \text{при} \quad D_{\text{цэ}}(\tau) \geq D_{\text{доп}}, \quad (12)$$

где  $P_{\text{доп}}$  – допустимое значение вероятности обеспечения защищенности информации от утечки.

Проведенные исследования функции вида (12) показали, что при определенных исходных данных она имеет явный экстремум. Таким образом, полученная зависимость позволяет определить оптимальное по критерию минимума ОПЭФ значение периодичности ТО СВАЗ, при котором обеспечивается требуемое значение защищенности речевой информации, маскируемой СВАЗ, от утечки по техническим каналам.

Следует отметить, что в основу комплекса введенных показателей положена плотность распределения времени (ПРВ) до достижения ОСШ предельного значения, связанная с описанными выше прогнозными моделями временного дрейфа ОСШ.

Все описанные операции по прогнозированию и определению периодичности ТО СВАЗ обобщены в виде алгоритма определения оптимального периода технического обслуживания, приведенного на рисунке 1. В результате работы алгоритма определяется значение периодичности ТО, доставляющее оптимум обобщенному показателю эффективности функционирования СВАЗ. Первый этап работы алгоритма включает сбор исходных данных о дрейфе ОСШ, полученных в результате проведения измерений в  $M$  моментов времени для  $N$  виброакустических преобразователей, обработку полученных данных и получение выражений для временного дрейфа ОСШ для каждого из  $N$  виброакустических преобразователей, обоснование (проверку) нормальности закона распределения случайных коэффициентов полученных выражений, определение МО и СКО этих случайных коэффициентов. В результате обработки статистических данных становится возможным представление законов изменения ОСШ во времени в виде КД-моделей (неслучайных функций со случайными коэффициентами). На втором этапе работы алгоритма осуществляется ввод предельно допустимых значений ОСШ в зависимости от требуемых значений разборчивости и типа зашумляющего сигнала. Далее производится расчет ПРВ достижения ОСШ предельного значения по формулам (табл. 1) – в зависимости от выбранной модели дрейфа ОСШ и от числа случайных коэффициентов.



Рисунок 1 – Алгоритм определения оптимального периода ТО СВАЗ

На следующем этапе задается минимально допустимое значение вероятности обеспечения защищенности маскируемой информации и осуществляется поиск соответствующего значения периодичности проведения технического обслуживания систем зашумления  $T_{зи}$ , при котором обеспечивается выполнение условия  $P_{зи} \geq P_{зи\text{ зад}}$ . Затем на основе полученных

аналитических зависимостей для плотности распределения времени до отказа происходит формирование частных и обобщенного показателей эффективности функционирования СВАЗ. Далее проводится поиск оптимального периода технического обслуживания методом перебора значений обобщенного показателя эффективности функционирования на заданном интервале времени  $T_{зи}$ . Алгоритм завершается выводом полученного оптимального значения периодичности ТО и расчетом полученного выигрыша (достигнутого эффекта).

Апробация полученных результатов осуществлялась на базе производственного объединения «Славсервис-связь» (г. Орёл). Достигнутый при применении разработанной методики выигрыш для СВАЗ типа «Соната» иллюстрируется рисунками 2 и 3.

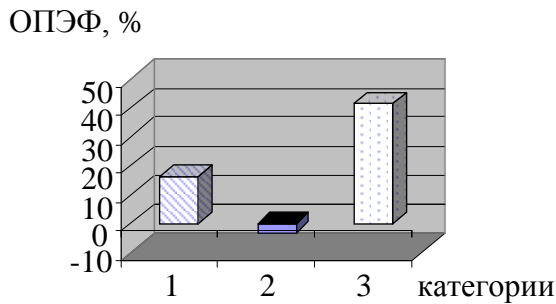


Рисунок 2 – Изменение обобщенного показателя эффективности функционирования СВАЗ

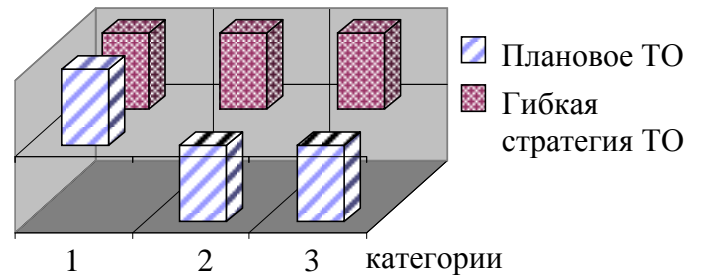


Рисунок 3 – Изменение защищенности маскируемой СВАЗ речевой информации при гибкой стратегии ТО

Из практических соображений все помещения, в которых происходит обработка речевой информации, в зависимости от обеспечиваемой степени защищенности могут быть условно разбиты на несколько категорий (табл. 2).

Таблица 2 – Классификация помещений, в которых происходит обработка информации

Условная категория защищенности помещения	Значение разборчивости речи $W$ , %	Характеристика качества перехваченного речевого сообщения
Первая	0 ... 20 %	При прослушивании перехваченного сообщения можно установить факт наличия речи, но нельзя определить предмет разговора
Вторая	20 ... 40 %	Перехваченное сообщение содержит отдельные правильно понятые слова, позволяющие установить предмет разговора
Третья	40 ... 60 %	Перехваченное речевое сообщение содержит количество правильно понятых слов, достаточное для составления краткой справки, отражающей предмет, проблему, цель и общий смысл разговора
Четвертая	свыше 60 %	Перехваченное речевое сообщение содержит количество правильно понятых слов, достаточное для составления подробной справки о содержании перехваченного разговора

При невозможности проведения ТО в найденные оптимальные сроки функционирование системы защиты информации допускается при заблаговременном снижении категории помещения. Предлагаемый подход к обеспечению защищенности информации, маскируемой СВАЗ, можно представить в виде алгоритма (рис. 4).

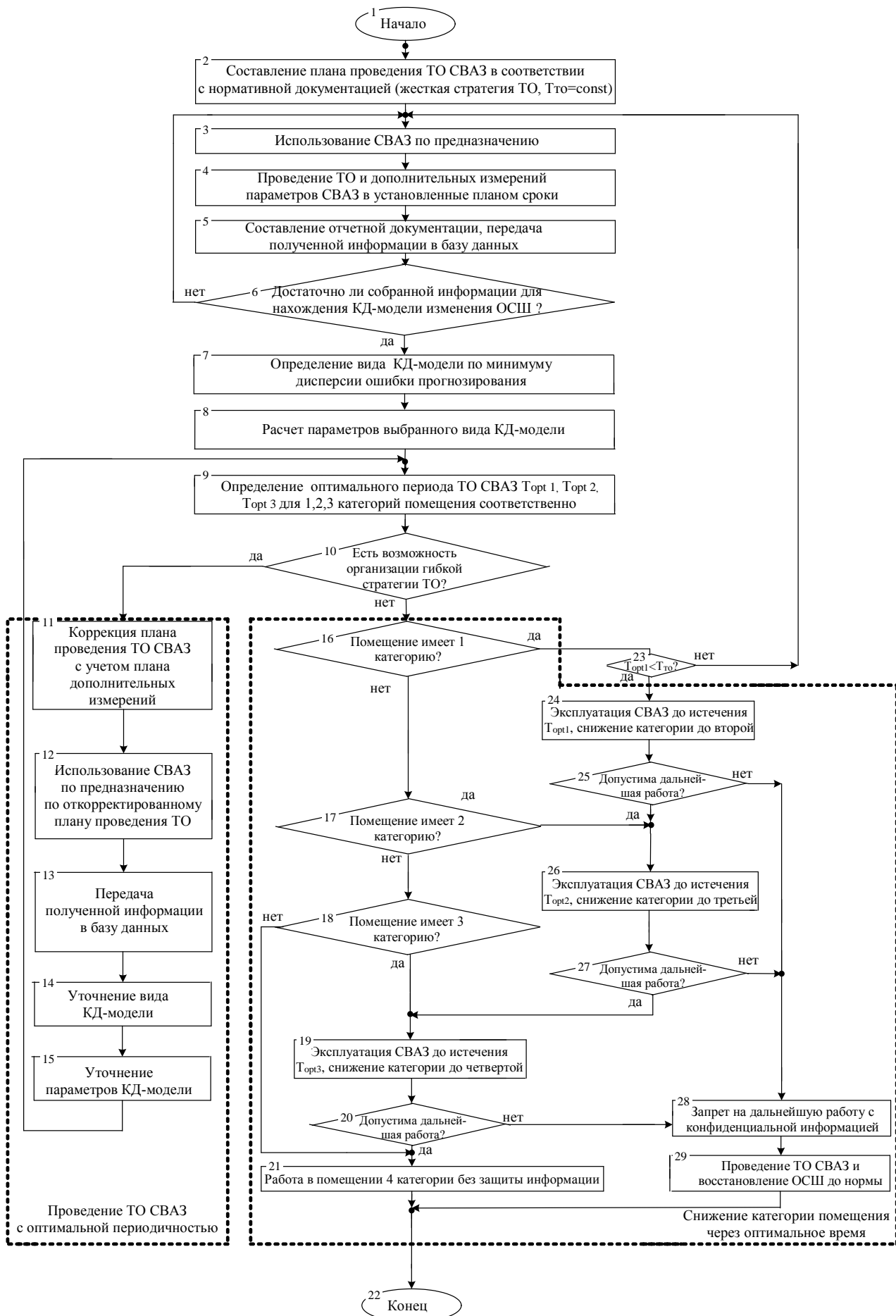


Рисунок 4 – Алгоритм обеспечения защищенности речевой информации, маскируемой СВАЗ, от утечки по техническим каналам

На первом шаге алгоритма составляется план проведения ТО СВАЗ в соответствии с НТД и осуществляется использование СВАЗ по назначению, при этом в установленные сроки происходит проведение ТО (измерений параметров СВАЗ). В дальнейшем выполняется проверка условия достаточности собранной статистической информации для определения вида и параметров КД-модели изменения ОСШ. При невыполнении указанного условия продолжается эксплуатация СВАЗ по жесткой стратегии ТО, в противном случае определяется значение оптимального периода ТО СВАЗ. При возможности организации гибкой стратегии ТО с оптимальным периодом производится коррекция плана проведения ТО СВАЗ, при невозможности ее организации проверяется условие, превышают ли полученные оптимальные значения периода ТО заданную в НТД периодичность  $T_{то}$ . При выполнении условия использование СВАЗ продолжается в штатном режиме (по жесткой стратегии), в противном случае возможно изменение категории защищенности помещения. Предлагаемый подход позволяет постоянно поддерживать значения ОСШ в пределах, обеспечивающих требуемую степень защищенности речевой информации, путем организации гибкой стратегии ТО СВАЗ, либо путем определения моментов времени, в которые должна снижаться категория помещения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорев, А.А. Оценка эффективности систем виброакустической маскировки [Текст] / А.А. Хорев, Ю.К. Макаров // Вопросы ЗИ. – 2001. – № 1 – С. 21.
2. Система виброакустической защиты «Соната». Руководство по эксплуатации. – М.: 2003. – 14 с.
3. Королёв М.В., Ходжаев И.А., Алымов Н.Л. Способ определения оптимального периода технического обслуживания изделия. Патент на изобретение РФ № 2336570, МПК G07C3/08, 2008.

**Королёв Михаил Викторович**

Академия ФСО России, г. Орёл

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры защиты информации

Тел.: (4862) 49-73-65

E-mail: korol80@list.ru

**Ларкин Евгений Иванович**

Академия ФСО России, г. Орёл

Кандидат военных наук, доцент кафедры защиты информации

Тел.: (4862) 36-53-69

E-mail: larkin22@ya.ru

**Иванов Юрий Борисович**

Академия ФСО России, г. Орёл

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры защиты информации

Тел.: (4862) 42-61-61

E-mail: zhmur@yahoo.com

---

M.V. KOROLYOV, E.I. LARKIN, Y.B. IVANOV

### ENSURING SECURITY OF VOICE INFORMATION USING THE VIBRO-ACOUSTIC NOISING SYSTEMS

*When use the generators vibratory-acoustic noise an attitude «signal-noise» on surface of designs since time changes, herewith reduction of level vibratory hindrance for level of information vibratory signal below limiting rate brings about non-execution of requirements of protection to speech information from possible technical channels of drain. Proposed in article a method of provision of protection to speech information allows to support the attitude «signal-noise» within, providing required degree of protection to speech information from drain, by means of organizations flexible strategy technical maintenance of generators vibratory-acoustic noise. At impossibility of its organizations are defined the critical moments of time, in which necessary reduction a category of protection of premises from drain.*

*Keywords: method of provision of protection to speech information maskable by means of vibratory-acoustic noise systems.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Horev, A.A. Ocenka jeffektivnosti sistem vibroakusticheskoj maskirovki [Tekst] / A.A. Horev, Ju.K. Makarov // Voprosy ZI. – 2001. – № 1 – S. 21.
2. Sistema vibroakusticheskoj zavity «Sonata». Rukovodstvo po jekspluatacii. – M.: 2003. – 14 s.
3. Koroljov M.V., Hodzhaev I.A., Alymov N.L. Sposob opredelenija optimal'nogo perioda tehničeskogo obsluzhivaniya izdelija. Patent na izobretenie RF № 2336570, MPK G07C3/08, 2008.

**Korolyov Michael Viktorovich**

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol

Philosophy doctor, lecturer

Tel.: (4862) 49-73-65

E-mail: korol80@list.ru

**Larkin Evgeniy Ivanovich**

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol

Philosophy doctor, associate professor

Tel.: (4862) 36-53-69

E-mail: larkin22@ya.ru

**Ivanov Yuri Borisovich**

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol

Philosophy doctor, lecturer

Tel.: (4862) 42-61-61

E-mail: zhmur@yahoo.com



Ф.А. ГАНЕЕВ, Т.Ф. ГАНЕЕВ, И.Р. УРАЗБАХТИН

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО ИОННО-МЕТОЧНОГО ДАТЧИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УГЛА И ВОЗДУШНОЙ СКОРОСТИ

*Рассматривается функциональная схема, первичные информативные сигналы, методика синтеза конструктивных параметров электродной системы и оценки систематической погрешности ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости.*

**Ключевые слова:** аэродинамические углы, воздушная скорость, датчик, ионно-меточный, электродная система, имитационная модель, синтез параметров, оценка погрешности.

Современные средства измерения параметров вектора истинной воздушной скорости летательного аппарата предусматривают наличие в набегающем потоке выступающих за обшивку элементов – флюгерных или пневматических датчиков аэродинамических углов, приемников воздушных давлений и температуры набегающего воздушного потока, что приводит к нарушению аэродинамики объекта, возникновению методических и инструментальных погрешностей [1, 2]. Это определяет актуальность работ по созданию датчиков аэродинамических углов и воздушной скорости без выступающих в набегающий поток подвижных и механических элементов, построенных на основе электронных измерительных каналов.

Как показывает анализ, наиболее полно указанным требованиям отвечают ионно-меточные датчики аэродинамических углов и воздушной скорости [3, 4], в которых реализуется кинематический метод измерения, основанный на регистрации скорости и направления движения заряженной ионной метки, создаваемой в воздушном потоке.

На рисунке 1 приведена функциональная схема ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с расширенным диапазоном измерения угла [5, 6]. Датчик включает круглую плату 1, в центре которой размещен разрядник 2 генератора ионных меток ГМ. Вокруг разрядника 2 по окружности с радиусом  $R$  размещены регистрирующие электроды 3, каждый из которых подключен к предварительному усилителю (ПУ). Совокупность первичных сигналов с выхода блока предварительных усилителей (БПУ) поступают в канал измерения воздушной скорости, канал измерения аэродинамического угла и канал определения рабочего сектора.

Канал измерения аэродинамического угла работает в пределах ограниченного сектора. Канал определения рабочего сектора формирует сигналы, соответствующие номеру сектора, в пределах которого происходит движение ионной метки. Информативные параметры выходных сигналов указанных каналов обрабатываются в вычислительном устройстве (ВУ), на выходе которого формируются коды  $N_\alpha$  и  $N_V$  по измеряемому аэродинамическому углу  $\alpha$  и истинной воздушной скорости  $V$ .

Как видно из рисунка 1, точность работы такого датчика в значительной мере определяется процессами создания и регистрации ионных меток. Униполярная ионная метка создается в набегающем воздушном потоке в процессе искрового разряда при подаче в разрядник высоковольтного импульса от генератора меток. При движении заряженной метки на регистрирующем электроде 3 индуцируется импульсный сигнал (рис. 2). Для канала измерения воздушной скорости информативным параметром сигнала является временной интервал  $\tau$ , за который ионная метка пролетает совместно с набегающим воздушным потоком базовое расстояние  $R$  (рис. 2а). Для канала измерения аэродинамического угла информативным параметром сигнала, индуцированного на электроде 3, является амплитуда  $U_{\text{вых}}$  (рис. 2б). При этом точка перехода сигнала  $U_{\text{вых}}$  нулевого уровня определяет время  $\tau$  движения ионной метки до центра электрода 3.

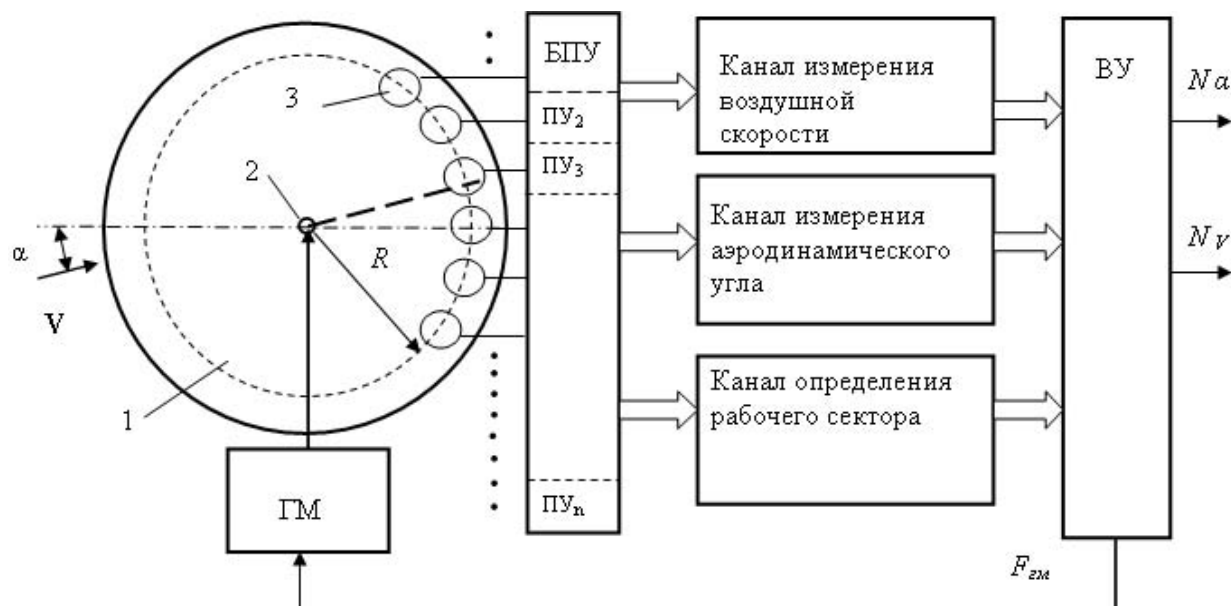


Рисунок 1 – Функциональная схема ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости

Амплитуда  $U_a$  сигнала  $U_{\text{вых}}$  на выходе предварительного усилителя пропорциональна току, индуцированному меткой на электроде, и определяется зависимостью [7]

$$U_a = q_m(t) V k_{\text{пу}} S F(\alpha), \quad (1)$$

где  $q_m(t)$  – величина заряда ионной метки во время ее регистрации (функция  $q_m(t)$  отражает процесс рекомбинации ионов и изменение (уменьшение) заряда метки во времени);

$V$  – скорость движения метки;

$k_{\text{пу}}$  – коэффициент преобразования «ток-напряжение» предварительного усилителя;

$S$  – площадь регистрирующего электрода;

$F(\alpha)$  – угловая характеристика приемного электрода, характеризующая зависимость амплитуды наведенного на нем тока от угла отклонения траектории метки относительно центра электрода.

Требования, накладываемые на габариты платы с приемными электродами датчика определяют соответствующие ограничения на размеры электродов и их площадь  $S$ . Кроме того, размеры и форма электрода определяют его угловую характеристику  $F(\alpha)$ , а размещение всех электродов на приемной плате обеспечивает формирование необходимой угловой характеристики канала измерения аэродинамического угла в целом.

Поэтому задачами параметрического синтеза электродной системы ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости являются:

- определение минимального количества и периодичности размещения электродов, обеспечивающих заданные точностные характеристики датчика;
- определение систематической погрешности преобразования аэродинамического угла и получения алгоритмов их уменьшения;
- определение угловых характеристик и алгоритма работы канала грубого отсчета.

Параметрический синтез электродной системы датчика целесообразно проводить по результатам исследования имитационной модели измерительного канала датчика. Методика синтеза угловой характеристики измерительного канала с помощью имитационной модели включает следующие этапы:

- 1) нахождение аппроксимирующей функции, описывающей угловую характеристику одного элемента электродной системы, полученную экспериментально;
- 2) формирование имитационной модели угловой характеристики измерительного канала с учетом дифференциальной структуры измерительной схемы и конструктивных параметров электродной системы;

3) реализация численного эксперимента при выбранных конструктивных параметрах электродной системы и оценка остаточной погрешностей измерительного канала;

4) корректировка конструктивных параметров электродной системы и алгоритма преобразования до получения допустимого уровня погрешности в заданном диапазоне измерения.

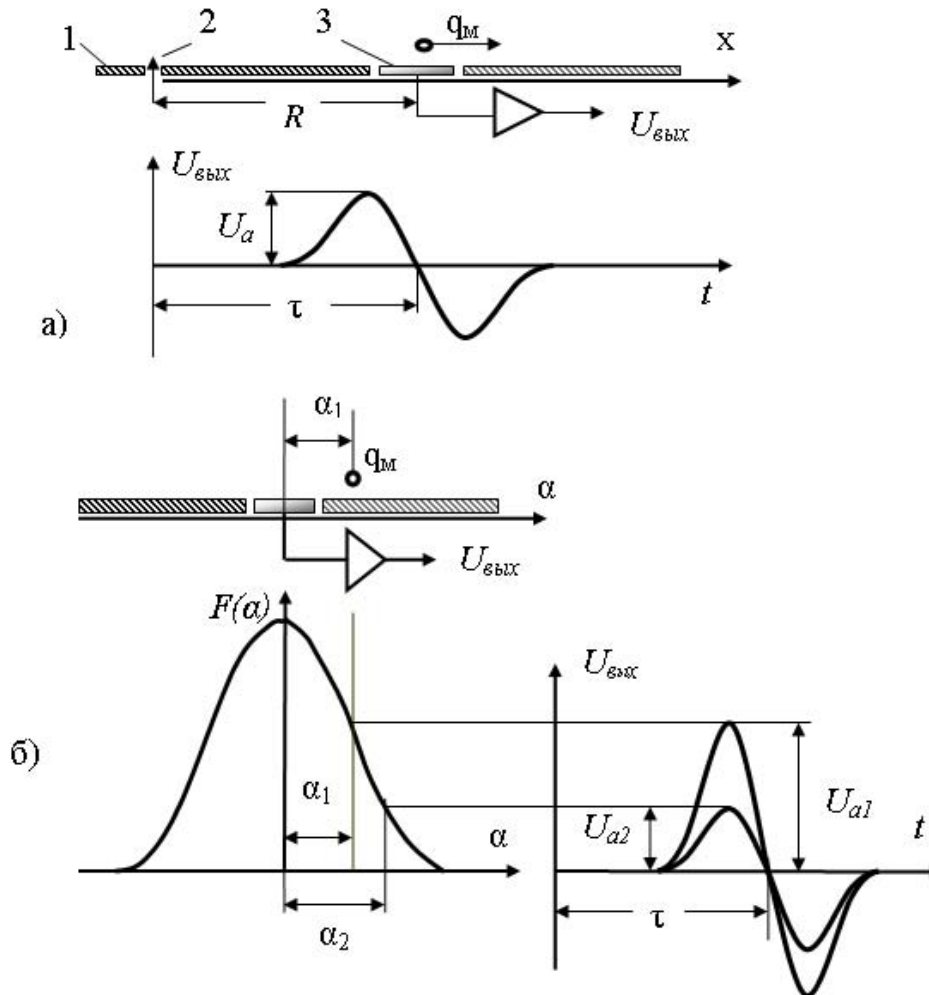


Рисунок 2 – Информативные параметры сигналов, индуцированных на приемных электродах

На рисунке 3 приведены экспериментально полученные угловые характеристики регистрирующих электродов различного диаметра. По результатам обработки экспериментальных угловых характеристик установлено, что с приемлемой точностью угловую характеристику  $F(\alpha)$  электрода можно аппроксимировать экспоненциальной функцией вида

$$F(\alpha) = \exp(\kappa \alpha^2), \quad (2)$$

где  $\kappa$  – коэффициент, величина которого зависит от диаметра электрода и определяет ширину угловой характеристики;

$\alpha$  – текущее значение угла отклонения траектории метки от центра электрода.

Поскольку угловой шаг размещения электродов в ионно-меточном датчике равен  $\Delta\alpha$ , то угловая характеристика  $n$ -го электрода может быть аппроксимирована функцией вида

$$F(\alpha) = \exp[\kappa(\alpha + n\Delta\alpha)^2]. \quad (3)$$

Анализ различных вариантов размещения регистрирующих электродов при реализации рассматриваемой схемы датчика и алгоритма преобразования показывает, что наиболее приемлемый результат обеспечивает электродная система, состоящая из 16 электродов с диаметром 12 мм и с шагом размещения  $22,5^\circ$ . При этом аппроксимирующая функция такого электрода в соответствии с результатами экспериментов имеет вид

$$F(\alpha) = \exp(-0,004 \alpha^2). \quad (4)$$

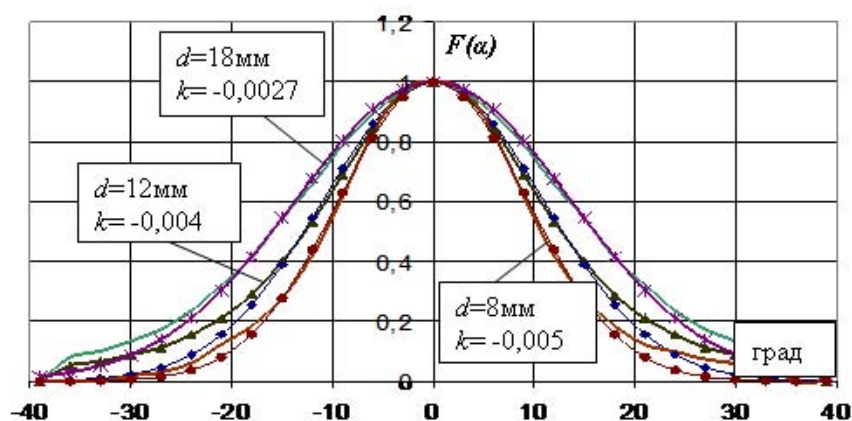


Рисунок 3 – Экспериментальные и аппроксимированные угловые характеристики регистрирующего электрода с различными диаметрами

С учетом указанного шага размещения  $n$ -ый электрод соответственно аппроксимируется функцией

$$F(\alpha) = \exp[-0,004(\alpha + n \cdot 22,5)^2]. \quad (5)$$

На графике (рис. 4) представлена исходная совокупность угловых характеристик приемных электродов, которые используются для формирования информативных сигналов ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости.

Синусоидальная угловая характеристика формируется путем дифференциального включения выходов предварительных усилителей, связанных с соответствующими приемными электродами [6]. Для формирования синусоидальной характеристики используются восемь электродов, шаг размещения между которыми составляет  $45^\circ$ . Причем соседние электроды подключаются к разным входам дифференциальной схемы. Тогда, период синусоидальной угловой характеристики электрода составляет  $90^\circ$ . Аналогично формируется косинусоидальная угловая характеристика. При этом сдвиг между синусоидальными и косинусоидальными характеристиками равен  $22,5^\circ$ . На рисунке 5 представлены синусоидальная и косинусоидальная угловые характеристики канала точного измерения аэродинамического угла, построенные путем суммирования угловых характеристик соответствующих электродов.

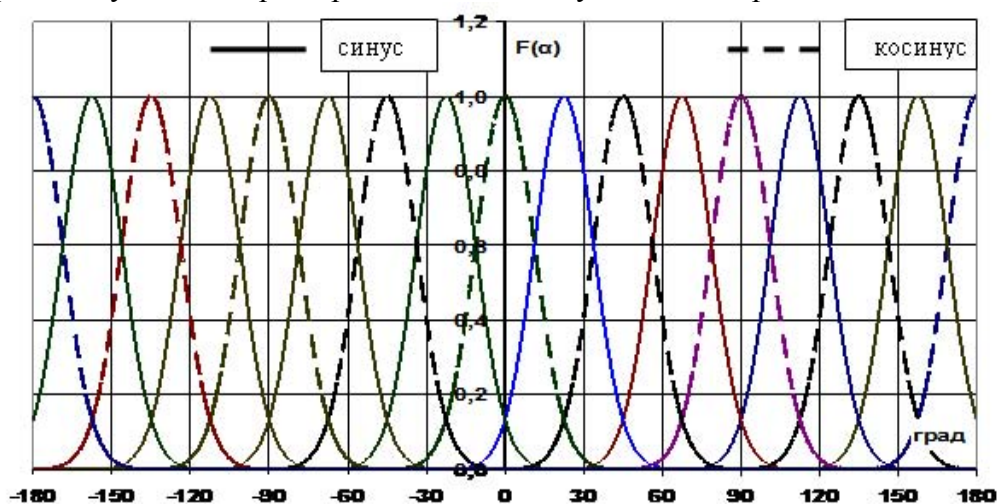


Рисунок 4 – Угловые характеристики приемных электродов

Аппроксимирующие функции синусоидальных и косинусоидальных угловых характеристик имеют вид:

$$\begin{aligned}
 F_{\sin}(\alpha) = & \exp[-0,004(\alpha + 22,5)^2] - \exp[-0,004(\alpha + 67,5)^2] + \exp[-0,004(\alpha + 112,5)^2] - \\
 & - \exp[-0,004(\alpha + 157,5)^2] + \exp[-0,004(\alpha - 157,5)^2] - \exp[-0,004(\alpha - 112,5)^2] + \\
 & + \exp[-0,004(\alpha - 67,5)^2] - \exp[-0,004(\alpha - 22,5)^2]. \\
 F_{\cos}(\alpha) = & \exp[-0,004(\alpha)^2] - \exp[-0,004(\alpha + 45)^2] + \exp[-0,004(\alpha + 90)^2] - \\
 & - \exp[-0,004(\alpha + 135)^2] + \exp[-0,004(\alpha + 180)^2] - \exp[-0,004(\alpha - 135)^2] +
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$+ \exp[-0,004(\alpha - 90)^2] - \exp[-0,004(\alpha - 45)^2].$$

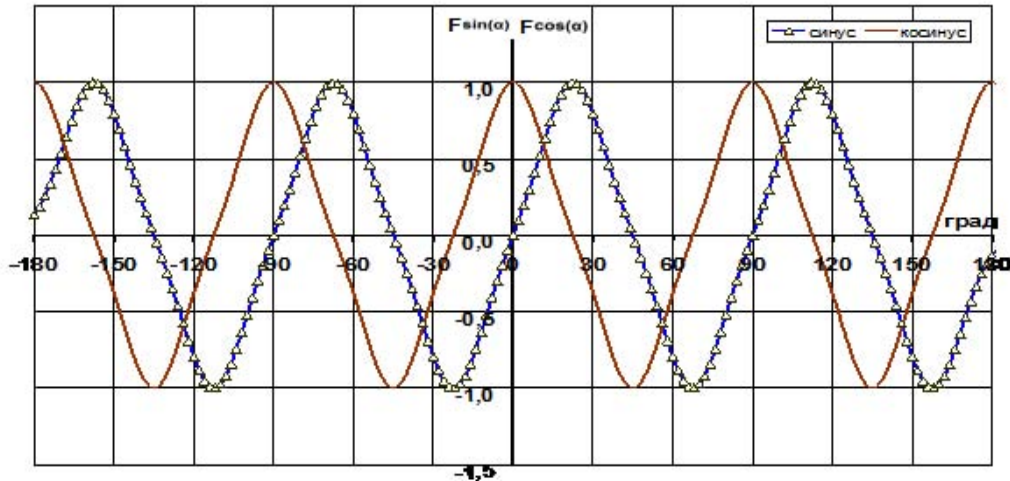


Рисунок 5 – Угловые характеристики канала точного измерения аэродинамического угла

Исходя из предположения, что полученные угловые характеристики канала измерения аэродинамического угла достаточно точно описываются функциями  $\sin \alpha$  и  $\cos \alpha$ , измеряемый угол  $\alpha$  можно определить из соотношения

$$\alpha = \text{arctg} (\sin \alpha / \cos \alpha). \quad (7)$$

На рисунке 6 представлен график систематической погрешности измерения аэродинамического угла точного канала, полученный по результатам моделирования.

Очевидно, что указанная систематическая погрешность обусловлена отличием сформированной из экспонент угловых характеристик (6) от функции  $\sin \alpha$  и  $\cos \alpha$ . Из графика видно, что погрешность носит синусоидальный характер, с периодом синусоиды  $22,5^\circ$ , что в 4 раза меньше периода угловой характеристики канала измерения. Амплитуда синусоиды, то есть величина максимальной погрешности составляет  $1,24^\circ$ .

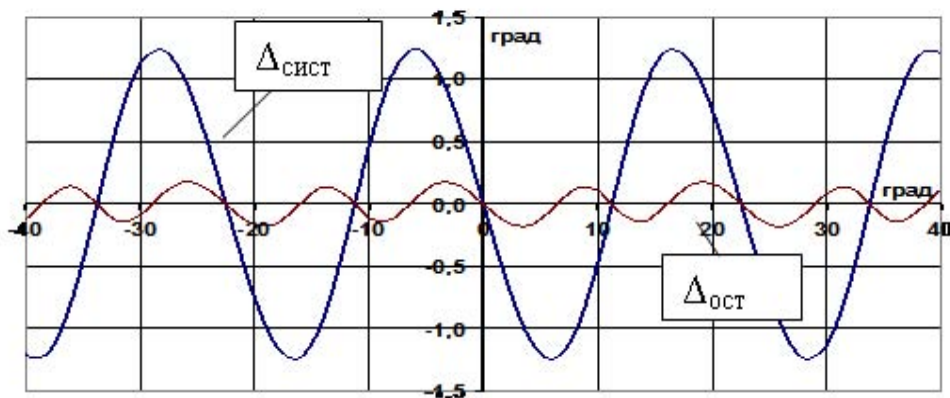


Рисунок 6 – График изменения систематической погрешности точного канала измерения аэродинамического угла

Следовательно, систематическая погрешность канала измерения аэродинамического угла может быть описана выражением

$$\Delta_{\text{сисст}} = -1,24 \sin (16\alpha).$$

Очевидно, рассмотренная погрешность может быть исключена из результата измерения путем вычитания. Скорректированный алгоритм определения аэродинамического угла будет иметь вид

$$\alpha_{\text{ск}} = \text{arctg} (\sin \alpha / \cos \alpha) + 1,24 \sin (16\alpha). \quad (8)$$

На рисунке 6 изображен график остаточной систематической погрешности  $\Delta_{\text{ост}}$ , полученный при вычислении аэродинамического угла в соответствии с соотношением (8). При этом величина остаточной погрешности канала находится на уровне  $0,14^\circ$ .

Дальнейшее уточнение характера и коэффициентов систематической погрешности целесообразно проводить по результатам метрологических испытаний датчика.

При синтезированных параметрах электродной системы канал точного измерения аэродинамического угла имеет 4 диапазона измерения. Каждый диапазон охватывает  $90^\circ$ . Таким образом, предлагаемая структурная схема реализует поддиапазонный принцип измерения угла траектории движения метки в диапазоне углов  $360^\circ$ .

Для определения номера рабочего диапазона с помощью канала грубого отсчета необходимо сформировать четыре угловые характеристики. На рисунке 7 показаны угловые характеристики грубого канала. Характеристики каждого канала формируются путем суммирования сигналов, поступающих с электродов, находящихся в пределах диапазона данного канала. Для увеличения помехоустойчивости каналов электроды, принадлежащие разным секторам, включены дифференциально.

Выходной сигнал канала определения рабочего сектора имеет положительную полярность, когда траектория метки находится в пределах диапазона данного канала. Если траектория выходит за пределы диапазона данного канала его выходной сигнал имеет отрицательную полярность.

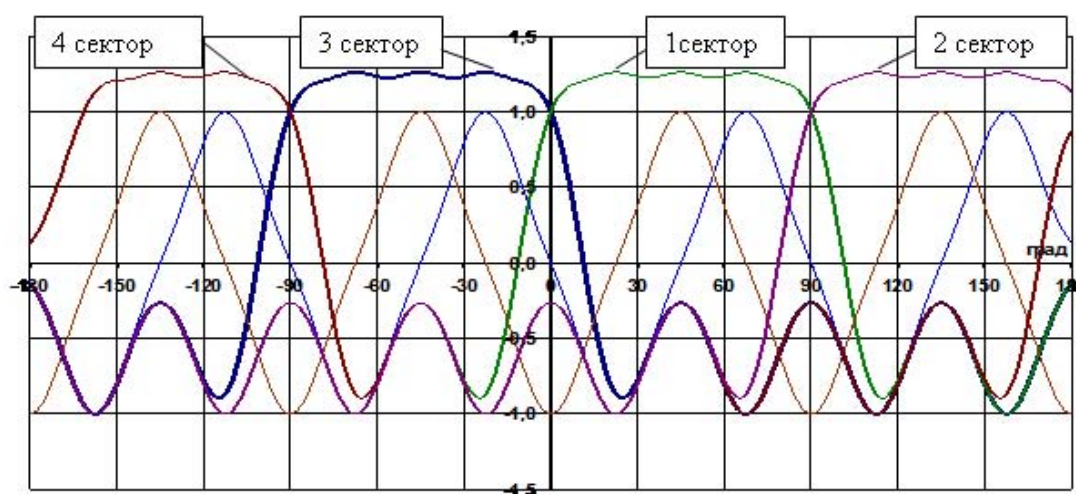


Рисунок 7 – Угловые характеристики канала определения номера рабочего сектора

Совместная обработка сигналов каналов определения рабочего сектора и канала точного измерения позволяет однозначно измерять аэродинамический угол в диапазоне  $360^\circ$ .

Таким образом, полученные результаты позволяют решать задачи выбора конструктивных параметров электродной системы и оценки остаточной систематической погрешностей ионно-меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдаткин, В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов [Текст] / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. Гос. Техн. ун-та, 2001. – 448 с.
2. Браславский, Д.А. Авиационные приборы и автоматы: Учебник для авиационных вузов [Текст] / Д.А. Браславский, С.С. Логунов, Д.С. Пельпор. – М.: Машиностроение, 1978. – 432 с.
3. Ганеев, Ф.А. Синтез структуры и алгоритм преобразования времяпролетного ионно-меточного датчика воздушной скорости и угла атаки самолета [Текст] / Ф.А. Ганеев // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2006. – № 4. – С. 53-56.
4. Ганеев, Ф.А. Амплитудный ионно-меточный датчик аэродинамических углов [Текст] / Ф.А. Ганеев // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 7. – С. 7-12.
5. Ганеев, Ф.А., Солдаткин В.М. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки [Текст] / Ф.А. Ганеев, В.М. Солдаткин // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2010. – № 3. – С. 46-50.
6. Патент 2445634 РФ, МПК 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. Заявл. 05.05.2010. Оpubл. 20.03.2012. Бюл. №8.
7. Герштейн, Г.М. Моделирование полей методом электростатической индукции [Текст] / Г.М. Герштейн. – М.: Наука, 1970. – 316 с.

**Ганеев Фарид Ахатович**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань  
Канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
Тел.: +7(843) 236-51-21  
E-mail: gafar@inbox.ru

**Ганеев Тимур Фаридович**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань  
инженер кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

**Уразбахтин Ильдар Расимович**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань  
ст. преподаватель кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
Тел.: +7(843) 236-51-21

F.A. GANEEV, T.F. GANEEV, I.R. URAZBAHTIN

**SIMULATION OF AMPLITUDE ION-MARKING SENSOR  
AERODYNAMIC ANGLE AND AIR SPEED**

*The functional diagram, the primary informative signals, the method of synthesis of the design parameters of the electrode system and estimate the systematic error of the ion-marking sensor aerodynamic angle and airspeed.*

**Keywords:** aerodynamic angles, airspeed, ion-marking sensor, electrode system, simulation model, the synthesis parameters, error estimation.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letatel'nyh apparatov [Tekst] / V.M. Soldatkin. – Kazan': Izd-vo Kazan. Gos. Tehn. un-ta, 2001. – 448 s.
2. Braslavskij, D.A. Aviacionnye pribory i avtomaty: Uchebnik dlja aviacionnyh vuzov [Tekst] / D.A. Braslavskij, S.S. Logunov, D.S. Pel'por. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 432 s.
3. Ganeev, F.A. Sintez struktury i algoritm preobrazovanija vremjaproletnogo ionno-metochного datchika vozduшной скорости i ugla ataki samoleta [Tekst] / F.A. Ganeev // Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika. – 2006. – № 4. – S. 53-56.
4. Ganeev, F.A. Amplitudnyj ionno-metochnyj datchik ajerodinamicheskikh uglov [Tekst] / F.A. Ganeev // Aviakosmicheskoe priborostroenie. – 2004. – № 7. – S. 7-12.
5. Ganeev, F.A., Soldatkin V.M. Ionno-metochnyj datchik ajerodinamicheskogo ugla i vozduшной скорости s logometricheskimi informativnymi signalami i interpoljacionnoj shemoj obrabotki [Tekst] / F.A. Ganeev, V.M. Soldatkin // Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika. – 2010. – № 3. – S. 46-50.
6. Patent 2445634 RF, MPK G01P 5/14. Metochnyj datchik ajerodinamicheskogo ugla i vozduшной скорости / F.A. Ganeev, V.M. Soldatkin, I.R. Urazbahtin, N.N. Makarov, V.I. Kozhevnikov. Zajavl. 05.05.2010. Opubl. 20.03.2012. Bjul. №8.
7. Gershtejn, G.M. Modelirovanie polej metodom jelektrostaticheskoj indukcii [Tekst] / G.M. Ger-shtejn. – M.: Nauka, 1970. – 316 s.

**Ganeev Farid Ahatovich**

Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan  
Candidate of technical science, associate professor of department "Machinery and information-measuring systems"  
Tel.: +7(843) 236-51-21  
E-mail: gafar@inbox.ru

**Ganeev Timur Faridovich**

Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan  
Engineer of department "Machinery and information-measuring systems"

**Urazbahtin Il'dar Rasimovich**

Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan  
Senior Lecturer of department "Machinery and information-measuring systems"  
Tel.: +7(843) 236-51-21

# **ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА** **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 004.045.614.3

В.А. ГАВРИЛИНА, С.Н. СЫЧЕВ

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВИНА**

*Рассмотрена оригинальная система информационной поддержки контроля качества вина, предусматривающая оперативный контроль качества вина на всем протяжении цепочки от производителя до потребителя. Принцип информационной поддержки заключается в использовании комбинации высокоэффективной жидкостной хроматографии с многоволновым детектированием и метода главных компонент, позволяющего получить из экспериментальных данных набор линейно-независимых факторов, представляющий многомерный образ вина – многокомпонентной физико-химической системы, не имеющей постоянного и до конца расшифрованного состава. Матрица факторов вина представляется в виде штрих-кодов на каждой бутылке и воспроизводится в течение 20 – 30 мин на не слишком дорогом оборудовании на любой стадии производства, розлива, транспортировки и продажи вина. Особенно эффективна система при оптовых закупках вина.*

**Ключевые слова:** контроль качества вина, высокоэффективная жидкостная хроматография, метод главных компонент, распознавание.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Процедура контроля качества вина должна отвечать следующим требованиям [1- 4]:

- универсальностью по отношению к определению разных классов соединений, содержащихся в вине;
- способностью отвечать на вопросы по идентичности, подобию и не идентичности (фальсификации) исследуемого (контролируемого) образца по отношению к контрольному;
- высокой экономичностью и, соответственно, небольшим вкладом производимых измерений в себестоимость единицы контролируемой продукции (экономическая целесообразность);
- быть воспроизводимой на любой стадии производства, розлива, транспортировки и продажи вина.

### **ПРОБЛЕМА СРАВНЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО И КОНТРОЛЬНОГО ОБРАЗЦА**

Метод сравнения исследуемого образца (вещества, изделия или природного объекта) с контрольным (образцовым или стандартным) веществом, изделием или природным объектом, является основой большинства методов измерений. Сравнение осуществляется по следующему алгоритму:

- 1) веществу, изделию или природному явлению присваивается модель, содержащая ряд параметров, которые, по мнению авторов модели, позволяют идентифицировать исследуемый объект в смысле его дальнейшего использования или классификации;
- 2) путем сопоставления измеряемых (с определенной погрешностью) параметров модели исследуемых и контрольных (образцовых или стандартных) образцов исследуемый объект идентифицируется в смысле дальнейшего его использования или классификации [1-4].

В любом случае, при использовании метода сравнения возникают две задачи:

- разработка и выбор наиболее удачной в конкретном случае модели вещества, изделия или природного явления;
- определение необходимого и достаточного количества параметров для идентификации исследуемого объекта.



Выбор математической модели и способ задания количества параметров сложных (многопараметровых) объектов взаимозависимы. Так, при применении нелинейных моделей количество и, особенно, характер параметров определяется произвольно, исходя из производственной необходимости и экспериментального опыта. Параметры многопараметровых линейных моделей могут быть определены как по первому способу, т.е. достаточно произвольно (феноменологически), так и путем поиска линейно-независимых параметров линейной модели объекта, непосредственно не вводимых экспертом по своему усмотрению, но содержащихся в экспериментальной мультипараметрической информации. Особенно важен такой подход при сравнении объектов, имеющих сложный, до конца неизвестный химический состав (нефть, вино, растительные экстракты и т.д.) [1-4].

Обычно контроль качества вина осуществляется путем определения содержания этилового спирта, сахара и титруемых кислот (параметры модели вина). Результаты такого контроля качества вина, состоящего из более чем 400 химических соединений, по предложенным параметрам ничего не могут сказать о подлинности испытуемого вина: определением идентичности и, в основном, подобия вин занимаются дегустаторы.

С появлением и успешным развитием сложных физико-химических методов анализа (высокоэффективная жидкостная хроматография, хромато-масс-спектроскопия и т.д.) ведущие зарубежные производители вин (Франция, Италия, Испания, Аргентина, Чили) перешли на определение подлинности вин по наличию и содержанию 20-30 соединений, являющихся так называемыми «реперами» для каждого типа вина [5].

Однако, как показано ниже, неопределенность количества и характера реперов (параметров), необходимых и достаточных для характеристики вин, делает бесполезным и экономически невыгодным применение все более мощных аналитических методов и увеличение количества контролируемых и сравниваемых параметров: дегустаторы оказываются экономически выгоднее и, как ни странно, надежнее.

## **СТАНДАРТНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВИН**

Комбинация стандартных физико-химических методов контроля и органолептической оценки качества вин является наиболее распространенным способом контроля качества вин.

Согласно действующим стандартам, определяют такие физико-химические показатели вин, как содержание алкоголя, сахаров, титруемую кислотность, количество летучих кислот: по трем первым показателям устанавливают, к какой группе и категории вин относится исследуемый образец; содержание летучих кислот характеризует состояние здоровья вина. По содержанию сернистой кислоты (свободной и связанной), количеству свинца, цианистых соединений, меди и олова судят о соблюдении требований гигиены при производстве вин. По микробиологическим результатам анализа определяют состояние микрофлоры, природу мути и возникающих осадков.

Определение указанных физико-химических показателей дает минимальную, но необходимую информацию о качестве и безопасности вина, но не может дать полного представления о его качестве.

Исключительную роль при определении качества играет дегустация вин. Принимая во внимание, что для потребителя вкусовые свойства вин также имеют главное значение, качество вин определяют в ходе дегустации или органолептической оценки. Исследование производят по таким показателям качества как прозрачность, цвет, аромат, вкус, типичность: всего около тридцати параметров (!).

Перечень и диапазон определяемых дегустатором характеристик вина поражает воображение. У метода существует два крупных недостатка: субъективность экспертных оценок и подверженность оценок влиянию со стороны. Впрочем, эти недостатки характерны и для интерпретации экспериментальных характеристик вина, полученных с помощью инструментальных методов.

## **ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВИНА**

Термин «контроль качества вина» понимается как выявление соответствия товарной продукции заявленному сертификату и контрольному образцу. В этом случае контроль сводится к сравнению параметров товарного образца с параметрами контрольного. Однако до сих пор не существует удовлетворительной процедуры сравнения товарного образца вина с контрольным: эта проблема связана с неопределенностью количества и характера параметров, необходимых и достаточных для характеристики вина, а используемые параметры вводятся феноменологически, в зависимости от опыта человека, занимающегося нормотворчеством в области контроля качества вина.

В результате, наиболее распространенным и успешным по совокупности свойств методом определения фальсификации и квалификации напитков до сих пор является комбинация контроля простейших физико-химических параметров вина с органолептической экспертизой. По этой причине, несмотря на феноменологический подход к установлению количества и характера параметров вина и стремительный рост стоимости одного анализа при контроле (начинает проявляться экономическая несостоятельность такого подхода), неуклонно растет интерес к применению все более мощных современных аналитических методов при контроле качества вина.

Применение современных научно-технических технологий можно классифицировать по нескольким основным признакам:

- по возрастанию сложности и стоимости аппаратуры, планируемой к использованию в контроле вин;
- по характеру реперных веществ, используемых для идентификации вин и связи их характера с контролем подлинности;
- по методам пробоподготовки;
- по применению уровня использования приемов хемометрии.

### **ВОЗРАСТАНИЕ СЛОЖНОСТИ И СТОИМОСТИ АППАРАТУРЫ [6]**

Самая простая и сравнительно недорогая аппаратура: спектрофотометры и фотоэлектроколориметры на УФ- и VIS-области применяется преимущественно при экспресс-контроле возраста вина, хотя в ряде случаев спектрофотометры применяются и при контроле других параметров, например, фурановых соединений и красителей. Стоимость спектрофотометров и фотоколориметров колеблется в очень широких пределах: от 40 тыс. руб. до 70 тыс. руб. для фотоколориметров и от 60 тыс. руб. до 600 тыс. руб. для спектрофотометров.

По возрастанию сложности, цены и значимости для контроля вин, спиртов и крепких спиртных напитков, за спектрофотометрами следуют газовые хроматографы, укомплектованные монопараметрическими детекторами и капиллярными (microbore) колонками. Газовые хроматографы с капиллярными колонками способны решать широкий круг задач по контролю качества вина, тем более газовая хроматография (GC) очень распространенный инструментальный метод, имеющий в России давнюю и славную историю. Стоимость газовых хроматографов колеблется в пределах от 450 тыс. руб. до 1,2 млн. руб. в зависимости от фирмы-изготовителя и комплектации.

Более дорогая аппаратура используется в контроле вин методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ или HPLC). Для контроля вин ВЭЖХ подходит значительно больше, чем газовая, так как:

- газовая хроматография не приспособлена для контроля нелетучих соединений, особенно когда нужно провести скрининговый анализ смеси, содержащей разные классы соединений (получение летучих производных – деривативов в этом случае невозможно): диапазон контролируемых классов соединений значительно больше у ВЭЖХ;
- в отличие от газовых хроматографов, жидкостные аппараты могут быть укомплектованы полипараметрическими детекторами, значительно повышающими достоверность идентификации соединений в анализируемых смесях;

– именно экспериментальные данные, полученные методом ВЭЖХ в специальных условиях на хроматографах с полипараметрическим детектором, служат базой для разработки универсальных количественных критериев идентичности, подобия или фальсификации вин.

Стоимость аппаратуры колеблется от 600 тыс. руб. до 2,5 млн. руб. Определенным минусом ВЭЖХ являются достаточно высокие требования к квалификации оператора, обслуживающего персонала и реактивов.

Экономически невыгодным, но чрезвычайно универсальным методом является газовая и жидкостная хромато-масс-спектрометрия (GC/MS, LC/MS). Этот метод скорее пригоден для чисто исследовательской работы, нежели для контроля качества вина, тем более эта аппаратура при очень больших затратах так и не может дать однозначный ответ на простой вопрос: «идентичны исследуемые вина или нет?».

Так, простой газовый хромато-масс-спектрометр с квадруполом, с узким диапазоном исследуемых классов соединений и неважным разрешением, стоит минимум 2 млн. руб., с ионной ловушкой – от 2,5 млн. руб. и выше. Жидкостной хромато-масс-спектрометр среднего класса (электроспрей, линейная ионная ловушка, простая ионная ловушка) стоит минимум 12–13 млн. руб., а ведь нелетучие соединения на газовом хромато-масс-спектрометре без дериватизации не проконтролируешь. Использование дериватизации, в свою очередь, приводит к невозможности контроля большинства классов соединений в вине.

Еще одно сильное ограничение метода: масс-спектрометр, а точнее, системы ввода пробы масс-спектрометра не позволяют работать с большинством хроматографических систем, используемых, например, в ВЭЖХ.

Таким образом, ни один метод, кроме ВЭЖХ со сканирующим многоволновым спектрофотометрическим детектором, не способен контролировать вина в нативной форме после обычного подкисления и фильтрации пробы. Из этого следует, что ни один метод, кроме ВЭЖХ, проводимой на дешевых небольших колонках (при контроле вина колонки очень быстро портятся – с хотя бы однократной заменой входного фильтра колонки выдерживают 50–60 анализов), не способен проконтролировать все вино сразу и в нативной форме.

Даже при проведении контрольных анализов по профилям отдельных классов соединений приходится использовать современные методы пробоподготовки.

### **МЕТОДЫ ЭКСТРАКЦИИ ПРИ ПРОБОПОДГОТОВКЕ**

Современные инструментальные методы контроля вин требуют проведения пробоподготовки; важнейшей стадией подготовки проб является экстракция. Общим видом экстракции для всех инструментальных методов является классическая жидко-жидкостная экстракция. В ВЭЖХ в основном используется твердофазная экстракция (ТФЭ) или ТФЭ в режиме «on-line». В последнее время в жидкостной и особенно газовой хроматографии широко используется твердофазная микроэкстракция. С точки зрения расходов, устройства для ТФЭ и микро-ТФЭ вносят немалый вклад в стоимость анализа [7].

### **РЕПЕРНЫЕ ВЕЩЕСТВА ИЛИ ПРОФИЛИ ОТДЕЛЬНЫХ КЛАССОВ СОЕДИНЕНИЙ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ВИНА**

Как показано выше, инструментальные методы анализа в их современном виде не в состоянии контролировать все компоненты вина сразу и, следовательно, дать исчерпывающие и простые ответы («да», «нет») на не менее простые вопросы: «идентичны, подобны или сфальсифицированы представленные для исследования образцы вина». Вместо простых ответов предлагается ряд феноменологических параметров вина по реперным веществам отдельных классов соединений: в ряде случаев предлагаемые параметры достаточно понятны и обоснованы; некоторые имеют неясный смысл и вызывают удивление.

Не вызывают серьезных возражений предлагаемые методы оценки возраста вин. Вопрос о возрасте красных вин было предложено решать на основании поглощения ими видимой части спектра на длинах волн 420 нм (желтый свет) и 520 нм (цвет поглощения антоцианами, природными красителями вин). В процессе выдержки входящие в состав танины свя-

зывают антоцианы, в результате чего соотношение оптических плотностей 420/520 нм растет, а выдержанные красные вина приобретают свойственный танинам коричневатый оттенок. Оправдана оценка возраста вина по содержанию в вине фурановых соединений и полифенолов. Однако, при петиотизации вина и этих профилей недостаточно для надежной оценки возраста вина.

В ряде работ, например в работе М.А. Gonzalez и др. [8], утверждается, что разбавление вина можно проконтролировать определением летучих компонентов вина: высших спиртов (по летучести до изо-амилового), альдегидов (ацетальдегид, пропионовый, масляный, валериановый и др.), эфиров (по летучести до этиловых эфиров жирных кислот  $C_{10} - C_{12}$ ). При этом количественный анализ этих компонентов позволяет выявлять случаи разбавления вин водой и спиртом-ректификатом. Такие утверждения выглядят малодостоверными по нескольким причинам:

- количественный анализ летучих соединений в любом растворе соединений по парогазовой смеси корректно провести практически невозможно, а уж для вина – тем более;
- о каком разбавлении идет речь, если даже подобные вина (контролируемого названия) содержат воду в достаточно широком диапазоне концентраций;
- в настоящее время пока существует единственный относительно достоверный метод определения разбавления вина водой: по изменению изотопного состава в исследуемом и контрольном образцах. Измерения изотопного состава осуществляется с помощью ядерного магнитного резонанса ЯМР и изотопной масс-спектрометрии. О стоимости таких экспериментов ничего сказать не можем, но стоимость самого простого мультиядерного ЯМР-спектрометра – минимум 30 млн. руб. (а еще обслуживание!).

Не меньше вопросов вызывают попытки идентификации вин по профилю аминокислот методом газо-жидкостной хроматографии [9] в виде из производных: N-гептафторбутирилпропиловых эфиров. Контроль аминокислотного состава не гарантирует надежную идентификацию вина, а аминокислотный набор легче и надежнее всего исследовать на стандартных аминокислотных анализаторах, что и отмечено в той же работе.

Состав органических кислот и сахаров является еще одним идентификационным признаком вин определенных марок. Винную, малоновую, янтарную, молочную, уксусную кислоты и антоцианы определяли в вине «Cabernet – Sauvignon» методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ионообменная колонка Aminex HPLX-87H) с УФ-регистрацией на длине волны 210 нм. Сахара анализировали в условиях ионообменной хроматографии на колонке BioRad HPLX-87 (250x4 мм, 9 мкм) элюированием водой с применением рефрактометрического детектора (температура ячейки – 40 °С, колонки – 85 °С).

Контроль аромата газо-хроматографическим и хром-масс-спектрометрическим (GC/MS) методами не вызывает возражений. Получение профилей фенольных соединений полезно при определении вкусовых качеств или при грубой фальсификации вин, но совершенно недостаточно при определении идентичности или подобию вин.

### **КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ «ОБРАЩЕННО-ФАЗОВАЯ ЖИДКОСТНАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ – МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ» (ОФ ВЭЖХ - МГК)»**

Комбинированный способ «обращенно-фазовая жидкостная хроматография – метод главных компонент» (ОФ ВЭЖХ – МГК)» обычно применяется при определении идентичности, подобию или не идентичности вин при спектрофотометрическом детектировании ВЭЖХ-хроматограмм в диапазоне длин волн 190–720 нм [1-4].

Процедура ОФ ВЭЖХ – МГК заключается в следующем:

- получение многоволновой хроматограммы исследуемого объекта в градиентном режиме ОФ ВЭЖХ с применением универсального элюента;
- представление многоволновой хроматограммы в виде матрицы оптических плотностей и транспонирование этой матрицы;
- получение линейно-независимых факторов методом главных компонент при обработке транспонированной матрицы оптических плотностей.

В случае существования банка данных таких факторов для контрольных образцов исследуемых объектов, полученные факторы исследуемого объекта сравниваются с факторами контрольных и по значениям коэффициентов корреляции «факторы банка – факторы исследуемого образца» делается вывод об идентичности или не идентичности сравниваемых объектов [1-4].

Алгоритм поиска линейно-независимых параметров линейной модели таких объектов реализован в методе главных компонент (МГК) [10]. Основным поставщиком мультипараметрических экспериментальных данных для МГК о составе и спектральных характеристиках указанных систем является метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с многоволновым спектрофотометрическим детектированием [1-4].

Теоретической поддержкой поиска линейно-независимых параметров в многоволновых массивах хроматографических данных сложных систем является гипотеза о существовании небольшого количества линейно-независимых (базовых) УФ- и VIS-спектров поглощения: все остальные спектры поглощения компонентов сложных физико-химических систем по этой гипотезе [10] являются линейными комбинациями нескольких базовых. Указанный метод пока является единственным, удовлетворяющим требованиям к методам контроля качества вина.

Применение метода «ВЭЖХ – МГК» изменяет стандартный подход к способам контроля качества многокомпонентных физико-химических систем. Традиционная идентификация компонентов такой системы аналитическими методами и выводам о качестве продукции по набору компонентов заменяется на распознавание качества вина по матрице линейно-независимых факторов, являющейся образом-паспортом каждого вина, на основании ясных количественных критериев: в данном случае этими критериями являются коэффициенты попарной корреляции факторов контрольного и исследуемого образца. В конечном итоге нас не интересует, из чего сделано вино или как оно фальсифицировано (это задача судебной экспертизы) [10]. Основной вопрос: это действительно то вино, которое заявлено на этикетке или нет? – решается предложенным методом быстро и чрезвычайно надежно. В результате многочисленных испытаний комплексов «Дегустатор», сконструированных на этом принципе, ни разу не удалось обмануть комплекс, хотя в ряде случаев дегустаторы международного класса оказывались бессильными при доказательстве фальсификации вина (особенно пересортицы). Изменение подхода также позволило превратить метод контроля качества вина в рутинный и экономически выгодный, что, собственно, и требуется от любого метода контроля. Изготовление и наклейка марки со штрих-кодом матрицы вина никакого труда не составляет.

## ВЫВОДЫ

1. В настоящее время наиболее надежным способом контроля качества вин является комбинация определения простейших физико-химических параметров вина и органолептического метода.

2. Применение все более мощных аналитических методов и увеличение количества контролируемых и сравниваемых параметров превращают контроль качества в дорогостоящую научно-техническую экспертизу, более свойственную для проведения отдельных исследований и в судебной экспертизе, нежели для выполнения задач по контролю качества.

3. Даже использование комплекса профилей вина по разным классам соединений не гарантирует полной уверенности в качестве вин, тем более что не сформулированы количественные критерии идентичности, подобия или фальсификации вин. Таким образом, решение задач по определению идентичности, подобия или тонкой фальсификации вин «в лоб» с помощью новейших инструментальных методов возможно лишь частично в отдельных случаях, а стоимость таких исследований часто делает бессмысленным само использование этих методов для контроля качества вина.

4. Применение мощных инструментальных методов анализа «в лоб» не пригодно не только для контроля качества вин, но и для надежной идентификации.

5. Следует отметить недостаточно широкое использование метода ВЭЖХ с многоволновым сканирующим спектрофотометрическим детектированием (наиболее универсальный

метод при идентификации вин) и применение совсем уж устаревших методов хемотрии при попытках идентификации вин, хотя в последние 10 лет в этой области произошли разительные перемены.

6. Использование метода ВЭЖХ и современных многомерных хемотрических методах обработки информации является мощным резервом для разработки принципиально иных способов идентификации, как вин, так и любых других сложных физико-химических объектов, не имеющих полностью известного состава или вообще имеющих переменный состав от природы, как одно целое, без идентификации компонентов профилей.

7. То же самое относится и к обнаружению фальсификации вин, в котором при контроле качества вина не имеет смысла тратить силы и деньги на определение метода фальсификации. Для контроля достаточно определить факт фальсификации, а не каким образом вино было фальсифицировано. Определение метода фальсификации относится к задачам судебной экспертизы, но никак не к задаче контроля качества вина. Контроль качества вина требует простого ответа на простой вопрос: фальсифицировано вино или нет?

8. Указанный метод пока является единственным, удовлетворяющим требованиям к методам контроля качества вина.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гаврилина, В.А. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин [Текст] / В.А. Гаврилина, О.И. Мальцева, С.Н. Сычев, К.С. Сычев, К.К. Полянский // Виноделие и виноградарство. – 2007. – № 1. – С. 10-12.
2. Гаврилина, В.А. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин. Часть 2 [Текст] / В.А. Гаврилина, О.И. Мальцева, К.С. Сычев, Д.С. Булгаков, С.Н. Сычев // Виноделие и виноградарство. – 2007. – № 3 – С. 30-32.
3. Гаврилина, В.А. Применение метода главных компонент для идентификации и сравнения натуральных вин. Часть 3 [Текст] / В.А. Гаврилина, О.И. Мальцева, К.С. Сычев, Д.С. Булгаков, С.Н. Сычев // Виноделие и виноградарство. – 2007. – № 4 – С. 18-19.
4. Гаврилина, В.А. Комбинированная экспертная система контроля подлинности вин [Текст] / В.А. Гаврилина, С.Н. Сычев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 2. – С. 120-125.
5. Савчук, С.А. Идентификация винодельческой продукции методами высокоэффективной хроматографии и спектрометрии [Текст] / С.А. Савчук, В.Н. Власов // Виноград и вино России. – 2000. – № 5. – С. 5-13.
6. Сычев, С.Н. Высокоэффективная жидкостная хроматография [учеб. пособие] / С.Н. Сычев. – СПб.: «Лань», 2012. – 230 с.
7. Сычев, К.С. Практическое руководство по жидкостной хроматографии / К.С. Сычев. – М.: Техносфера, 2011. – 272 с.
8. Gonzales-Vin, M.A. Changes in gas-chromatographic volatiles of young Airen wines during bottle storage [Text] / M.A. Gonzales-Vin, M.S. Perez-Coello, M.D. Salvador, M.D. Cabezudo, P.J. Martin-Alvares // J. Agric. Food Chem. – 1995. – № 56(4).
9. Шатиришвили, Ш.И. Газохроматографический аминокислотный профиль некоторых грузинских вин [Текст] / Ш.И. Шатиришвили, Т.Г. Андришвили // Хроматографический журнал. – 1995. – № 4. – С. 34-39.
10. Сычев, С.Н. Метод контроля качества вина с помощью комбинации «ВЭЖХ - МГК» [монография] / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина. – Published\_by/lap-lambert-academic-publishing, 2012. – 112 с.

**Гаврилина Вера Александровна**

Госуниверситет – УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия», инженер лаборатории «Высокоэффективная жидкостная хроматография»

E-mail: chemistry@ostu.ru

**Сычев Сергей Николаевич**

Госуниверситет – УНПК, г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия», заведующий лабораторией «Высокоэффективная жидкостная хроматография»

E-mail: chemistry@ostu.ru

---

V.A. GAVRILINA, S.N. SYCHEV

## INFORMATIONAL SUPPORT FOR THE CONTROL OF WINE

*An original system of information support for monitoring the quality of wine, which provides operational control of wine quality through out the chain from producer to consumer. The principle of information support is to use a combination of HPLC with multi-wave detection and the method of principal components can be obtained from the experimental data set of linearly independent factors, representing a multi-dimensional image of the wine - a multi-component physico-chemical systems which have non-permanent until the end of the decrypted. The matrix of factors is represented as a wine bar code on each bottle and plays for 20 -30 min. are not too expensive equipment at any stage of production, bottling, transportation and sale of wine. Especially effective system for bulk purchases of wine.*

**Keywords:** *quality control of wine, high-performance liquid chromatography, a method of principal components, recognition.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Gavrilina, V.A. Primenenie metoda glavnyh komponent dlja identifikacii i sravnenija natural'-nyh vin [Tekst] / V.A. Gavrilina, O.I. Mal'ceva, S.N. Sychev, K.S. Sychev, K.K. Poljanskij // Vinodelie i vi-nogradorstvo. – 2007. – № 1. – S. 10-12.
2. Gavrilina, V.A. Primenenie metoda glavnyh komponent dlja identifikacii i sravnenija natural'-nyh vin. Chast' 2 [Tekst] / V.A. Gavrilina, O.I. Mal'ceva, K.S. Sychev, D.S. Bulgakov, S.N. Sychev // Vinodelie i vinogradorstvo. – 2007. – № 3 – S. 30-32.
3. Gavrilina, V.A. Primenenie metoda glavnyh komponent dlja identifikacii i sravnenija natural'-nyh vin. Chast' 3 [Tekst] / V.A. Gavrilina, O.I. Mal'ceva, K.S. Sychev, D.S. Bulgakov, S.N. Sychev // Vinodelie i vinogradorstvo. – 2007. – № 4 – S. 18-19.
4. Gavrilina, V.A. Kombinirovannaja jekspertnaja sistema kontrolja podlinnosti vin [Tekst] / V.A. Gavrilina, S.N. Sychev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – № 2. – S. 120-125.
5. Savchuk, S.A. Identifikacija vinodel'cheskoj produkcii metodami vysokoeffektivnoj hromatografii i spektrometrii [Tekst] / S.A. Savchuk, V.N. Vlasov // Vinograd i vino Rossii. – 2000. – № 5. – S. 5-13.
6. Sychev, S.N. Vysokoeffektivnaja zhidkostnaja hromatografija [ucheb. posobie] / S.N. Sychev. – SPb.: «Lan'», 2012. – 230 s.
7. Sychev, K.S. Prakticheskoe rukovodstvo po zhidkostnoj hromatografii / K.S. Sychev. – M.: Tehnsfera, 2011. – 272 s.
8. Gonzales-Vin, M.A. Changes in gas-chromatographic volatiles of young Airen wines during bottle storage [Text] / M.A. Gonzales-Vin, M.S. Perez-Coello, M.D. Salvador, M.D. Cabezudo, P.J. Martin-Alvares // J. Agric. Food Chem. – 1995. – № 56(4).
9. Shatirishvili, Sh.I. Gazohromatograficheskij aminokislotnyj profil' nekotoryh gruzinskih vin [Tekst] / Sh.I. Shatirishvili, T.G. Andronikashvili // Hromatograficheskij zhurnal. – 1995. – № 4. – S. 34-39.
10. Sychev, S.N. Metod kontrolja kachestva vina s pomow'ju kombinacii «VJeZhH - MGK» [monografija] / S.N. Sychev, V.A. Gavrilina. – Published\_by/lap-lambert-academic-publishing, 2012. – 112 s.

#### Gavrilina Vera Alexandrovna

State University ESPC, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Chemistry”

E-mail: chemistry@ostu.ru

#### Sychev Sergey Nikolaevich

State University ESPC, Orel

Dr.Sci.Tech., the professor of chair "Chemistry"

Ph. (8486) 419892

E-mail: chemistry@ostu.ru

В.В. МАРКОВ

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАРНОМ ФРИКЦИОННОМ КОНТАКТЕ

*В этой статье рассмотрена математическая модель тепловых процессов, происходящих в элементарном фрикционном контакте, учитывающая возможные источники тепловой энергии в пределах контактирующих поверхностей и весомость их вклада в общую температуру поверхностей объекта контроля.*

**Ключевые слова:** трение; трибология; триботехническая система; фрикционный контакт; зона трения; активное электрическое сопротивление; электрическая ёмкость; температура; структурная модель.

### ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ РАБОТЫ

Очень часто в процессе трибологических исследований наряду с получением информации об электрических или вибрационных параметрах объекта измеряют температуру поверхностей деталей трибосопряжения, находящихся в непосредственной близости от зоны трения. Известно, что с ухудшением условий трения температура повышается, и, даже если не регистрировать значения других диагностических параметров, по повышению температуры поверхности детали уже можно предположить об увеличении интенсивности износа.

Как известно, термодинамическая температура является мерой кинетической энергии внутреннего взаимодействия структурных элементов вещества. Повышение термодинамической температуры свидетельствует об увеличении длины свободного пробега структурных элементов (атомов или молекул) и об увеличении внутренней энергии вещества в целом. Значит, условно температуру можно отнести к энергетическим характеристикам.

Однако, несмотря на очевидные достоинства оценки технического состояния объекта по температуре рабочих поверхностей трибосопряжения, практическое применение этого диагностического признака в большинстве случаев ограничено качественным анализом. Это связано со сложностью интерпретации результатов измерения температуры, с существенной инерционностью этого диагностического параметра и с его невысокой чувствительностью к изменению технического состояния рабочих поверхностей деталей трибосопряжения. Проблема расширения областей практического использования методов диагностирования триботехнических систем по параметрам температуры актуальна, и первым этапом её решения является разработка математической модели температуры трибосопряжения. Для моделирования тепловых процессов, протекающих в трибосопряжении, предложен обобщённый подход, в основе которого заложен принцип учёта весомости вклада различных по природе и масштабу источников тепловой энергии в суммарную поверхностную температуру деталей триботехнической системы. Рассмотрим его содержание.

Трибосопряжение – это сложная техническая система, которая состоит, как минимум, из двух контактирующих поверхностей и материала-разделителя или «третьего тела» (смазочный материал, воздух или иная газовая среда, вакуум или окисные плёнки поверхностей контактирующих деталей). Трибосопряжение может иметь одну или несколько зон трения. Условия контактирования поверхностей в зоне трения существенно зависят от сочетания их геометрических форм, которое может быть представлено в виде одной из нескольких типовых схем, ранее обобщённых в работе [1]. В пределах номинальной площади контакта поверхностей зоны трения может быть несколько элементарных фрикционных контактов, отличающихся друг от друга по площади.

Таким образом, для создания математического описания тепловых процессов в трибосопряжении необходимо решить две самостоятельные задачи:

1) создать математическую модель тепловых процессов, происходящих в элементарном фрикционном контакте, учитывающую возможные источники тепловой энергии в пределах контакта и весомость их вклада в общую температуру объекта;



2) разработать структурную модель трибосопряжения, предназначенную для комплексирования параметров физических процессов, происходящих в отдельных зонах трения и элементарных фрикционных контактах с учётом особенностей схем контактирования рабочих поверхностей объекта.

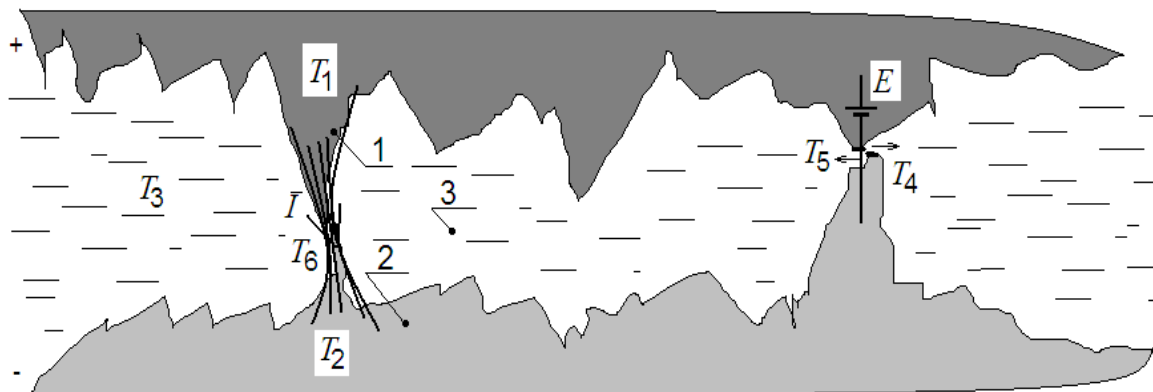
После решения этих двух задач моделирование тепловых процессов в трибосопряжении будет сведено к получению зависимостей для температуры элементарного фрикционного контакта, определению числа вероятных контактов в трибосопряжении и оценке суммарной температуры его поверхностей. Так как температура – это мера средней кинетической энергии молекулярного взаимодействия и характеристика интенсивности тепловых процессов, для перехода от локальных температур некоторого количества элементарных фрикционных контактов к интегральной температуре поверхности детали трибосопряжения необходимо использовать энергетическую величину «Количество теплоты».

Целью данной работы является решение первой из поставленных задач – математическое моделирование температуры элементарного фрикционного контакта.

### СОДЕРЖАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим математическую модель тепловых процессов, происходящих в элементарном фрикционном контакте, учитывающую возможные источники тепловой энергии в пределах контакта и весомость их вклада в общую температуру объекта контроля.

Так как температура – это мера средней кинетической энергии молекулярного взаимодействия и характеристика интенсивности тепловых процессов, для перехода от локальных температур некоторого количества элементарных фрикционных контактов к интегральной температуре поверхности детали трибосопряжения будем использовать энергетическую величину «Количество теплоты». Рассмотрим схему взаимодействия неровностей рабочих поверхностей деталей трибосопряжения в окрестностях элементарного фрикционного контакта, показанную на рисунке 1 [2].



*Рисунок 1 – Схема взаимодействия неровностей рабочих поверхностей деталей трибосопряжения в окрестностях элементарного фрикционного контакта  
1 и 2 – рабочие поверхности деталей трибосопряжения; 3 – «третье тело»;  $T_1...T_6$  – составляющие интегральной температуры одиночного фрикционного контакта;  
 $E$  – трибо-ЭДС фрикционного контакта;  $I$  – сила тока, протекающего через контакт*

На данной схеме показан процесс контактирования двух шероховатых поверхностей 1 и 2, разделённых «третьим телом» 3, под которым в данной работе понимается материал с физическими свойствами, в значительной степени отличающимися от физических свойств материалов поверхностей 1 и 2. «Третьим телом» может быть смазочным материал, воздух или окисные плёнки на поверхностях деталей трибосопряжения. Температура одиночного фрикционного контакта будет функцией нескольких переменных:

$$T_{\text{ФК}} = f(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, I) \quad (1)$$

где  $T_{\text{ФК}}$  – температура фрикционного контакта;

$T_1$  и  $T_2$  – соответственно, температуры поверхностей 1 и 2;

$T_3$  – температура «третьего тела» 3;

$T_4$  – избыточная температура в зоне трения, обусловленная трением соприкасающихся неровностей поверхностей;

$T_5$  – избыточная температура, обусловленная электрогенераторными явлениями, происходящими в зоне трения;

$T_6$  – избыточная температура в зоне трения, обусловленная протеканием электрического тока от внешнего источника через область электрического контакта.

Несмотря на то, что все составляющие функции (1) имеют одинаковую размерность и близкий физический смысл, их не представляется возможным просуммировать для получения общей температуры фрикционного контакта, а затем – для получения общей температуры трибосопряжения. Это связано с тем, что вклад каждой составляющей температуры в единую «термоэнергетическую» картину фрикционного взаимодействия различен.

Для получения математической модели температуры одиночного фрикционного контакта необходимо перейти от температуры к энергетической характеристике – количеству теплоты. В отличие от температуры, количество теплоты можно суммировать, что позволяет построить интегральную модель тепловых процессов, сначала – в одиночном фрикционном контакте, а затем – в целом трибосопряжении.

Запишем выражение для интегральной температуры фрикционного контакта через количество теплоты:

$$Q_{\text{ФК}} = c \cdot m \cdot \Delta T_{\text{ФК}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{ФК}}$  – количество теплоты, выделяющееся во фрикционном контакте при изменении температуры контакта на  $\Delta T_{\text{ФК}}$ ;

$c$  – удельная теплоёмкость материала деталей трибосопряжения;

$m$  – масса трибосопряжения;

$\Delta T_{\text{ФК}}$  – избыточная температура поверхностей трибосопряжения.

Выполним математические преобразования формулы (2) и получим выражение для избыточной температуры поверхностей трибосопряжения, как функции количества теплоты:

$$Q_{\text{ФК}} = c \cdot m \cdot T_{\text{ФК}} - c \cdot m \cdot T_0, \quad (3)$$

где  $T_{\text{ФК}}$  – конечная абсолютная температура поверхностей трибосопряжения;

$T_0$  – начальная абсолютная температура поверхностей трибосопряжения.

Выражая из формулы (3) температуру  $T_{\text{ФК}}$ , получаем зависимость:

$$T_{\text{ФК}} = \frac{c \cdot m \cdot T_0 + Q_{\text{ФК}}}{c \cdot m} = T_0 + \frac{Q_{\text{ФК}}}{c \cdot m}. \quad (4)$$

Проанализируем формулу (4). Температура  $T_0$  – это не что иное, как начальная температура трибосопряжения, которое находится в состоянии покоя, а все его элементы – в состоянии теплового равновесия. Второе слагаемое формулы (3) – это дополнительное количество теплоты, которое выделяется в окрестностях контакта при работе трибосопряжения. Так как фрикционный контакт имеет несколько источников теплоты, можно записать:

$$T_{\text{ФК}} = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{Q_{\text{ФК}i}}{c \cdot m}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{ФК}i}$  – количество теплоты, выделяемое вследствие действия  $i$ -того фактора;

$n$  – количество факторов (причин выделения теплоты).

Рассмотрим составляющие второго слагаемого уравнения (5).

Отклонение температуры поверхностей деталей работающего трибосопряжения от его начальной температуры  $T_0$  (температуры окружающей среды) может быть вызвано несколькими причинами:

1) избыточной теплотой рабочих поверхностей 1 и 2 (рис. 1), соответственно, обладающих количеством теплоты  $Q_1$  и  $Q_2$  (причём эти параметры могут быть и отрицательными, то есть, поверхности могут отводить теплоту);

2) избыточной теплотой «третьего тела»  $Q_3$  (может быть отрицательной);

3) выделением теплоты вследствие трения поверхностей –  $Q_4$ ;

4) выделением теплоты, обусловленной электрогенераторными явлениями, происходящими в зоне трения –  $Q_5$ ;

5) выделением теплоты, обусловленной протеканием электрического тока от внешнего источника через область электрического контакта –  $Q_6$ .

Другие причины, которые потенциально могут приводить к изменению температуры работающего трибосопряжения, считаем несущественными.

Установив причины изменения температуры, получим расчётные формулы.

Избыточные температуры поверхностей могут быть подсчитаны по формулам:

$$\Delta T_1 = \frac{c_1 \cdot m_1}{c \cdot m} \cdot \Delta T_1^* \approx \frac{m_1}{m} \cdot \Delta T_1^* ; \Delta T_2 = \frac{c_2 \cdot m_2}{c \cdot m} \cdot \Delta T_2^* \approx \frac{m_2}{m} \cdot \Delta T_2^* , \quad (6)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – соответственно, удельные теплоёмкости материалов деталей 1 и 2 трибосопряжения (их целесообразно принять одинаковыми, поэтому  $c_1 \approx c_2 = c$ );

$m_1$  и  $m_2$  – соответственно, массы деталей 1 и 2 трибосопряжения (они могут быть близкими по значению, как, например, массы штыря и гнезда контактной пары электрического соединителя, или значительно отличающимися, как, например, массы кольца подшипника качения и его шарика);

$\Delta T_1^*$  и  $\Delta T_2^*$  – собственные избыточные температуры рабочих поверхностей деталей 1 и 2 трибосопряжения.

Аналогичным образом учитываем избыточную температуру «третьего тела»:

$$\Delta T_3 = \frac{c_3 \cdot m_3}{c \cdot m} \cdot \Delta T_3^* \approx \frac{c_3 \cdot \rho_3 \cdot V_3}{c \cdot m} \cdot \Delta T_3^* , \quad (7)$$

где  $c_3$  – удельная теплоёмкость материала «третьего тела»;

$m_3$  – масса «третьего тела» (если в роли «третьего тела» выступает смазочный материал, то целесообразно заменить массу произведением плотности  $\rho_3$  и объёма  $V_3$  смазочного материала);

$\Delta T_3^*$  – собственная избыточная температура «третьего тела» (если «третьим телом» является смазочный материал, она может быть отрицательной).

Учёт избыточной температуры, обусловленной трением поверхностей деталей трибосопряжения, произведём с помощью теории теплового поля А.В. Чичинадзе, согласно которой температура вспышки на трущихся поверхностях определяется формулой:

$$T_{\text{всп}} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{W_{\text{тр}} \cdot \tau_N \cdot d_r \cdot \sqrt{a_1}}{A_r \cdot t_T \cdot 4 \cdot \lambda \cdot \sqrt{a_1} + \lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot d_r \cdot v_{\text{ск}}}} , \quad (8)$$

где  $W_{\text{тр}}$  – полная работа силы трения;

$\tau_N$  – временной фактор мощности фрикционного взаимодействия;

$d_r$  – средний статистический размер пятна касания;

$a_1$  – коэффициент распределения теплового потока;

$A_r$  – фактическая площадь контакта;

$t_T$  – продолжительность трения;

$\lambda$  – удельная теплопроводность поверхностей деталей трибосопряжения;

$v_{\text{ск}}$  – скорость скольжения поверхностей деталей трибосопряжения.

Формула (8) получена для контурной площадки контакта шероховатых поверхностей. С учётом того, что в данной модели рассматривается фрикционный контакт одной пары микронеровностей, зависимость для избыточной температуры элементарного фрикционного контакта  $\Delta T_4$ , обусловленной трением неровностей контактирующих поверхностей, будет иметь следующий вид:

$$\Delta T_4 = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\mu \cdot F_r \cdot v_{\text{н\ddot{e}}} \cdot \tau_N \cdot \sqrt{a_1}}{\lambda \cdot 4 \cdot \sqrt{a_1} + \sqrt{\pi \cdot S_m \cdot v_{\text{н\ddot{e}}}}} \cdot \frac{\rho \cdot S_m^2}{m}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;

$F_r$  – нормальная нагрузка в пределах элементарного фрикционного контакта;

$S_m$  – средний приведённый шаг неровностей профиля поверхностей;

$\rho$  – плотность материала деталей трибосопряжения.

Учёт избыточной температуры  $\Delta T_5$ , обусловленной электрогенераторными явлениями, происходящими в зоне трения, произведём с помощью известной формулы Найквиста, устанавливающей зависимость между контактной разностью электрических потенциалов, генерируемой при фрикционном взаимодействии, и рядом внутренних параметров объекта, в число которых входит и температура. Выражая избыточную температуру  $\Delta T_5$  из формулы Найквиста, получим зависимость:

$$\Delta T_5 = \frac{E}{4 \cdot k \cdot R_0 \cdot \Delta f} \cdot \frac{\rho \cdot S_m^3}{m}, \quad (10)$$

где  $E$  – термошумовая ЭДС в измерительной цепи фрикционного контакта;

$k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);

$R_0$  – электрическое сопротивление контакта при начальной температуре;

$\Delta f$  – полоса частот, в пределах которой измеряется термошумовая ЭДС;

$S_m$  – средний приведённый шаг неровностей профиля поверхностей;

$\rho$  – плотность материала деталей трибосопряжения.

Выполним учёт избыточной температуры  $\Delta T_6$ , обусловленной выделением теплоты в результате протекания электрического тока от внешнего источника через область электрического контакта.

Для определения электрической составляющей температуры фрикционного контакта различными научными школами предложено несколько подходов. Наибольшей известностью пользуется теория Роберта Хольма и разработанная на её основе теория теплопроводности электрических соединителей, позволяющая оценить температуру электрического контакта. Однако в обеих теориях температура контакта определяется как статический параметр, а фундаментальный закон Джоуля-Ленца указывает на необходимость учёта времени выделения теплоты в трибосопряжении. Поэтому для определения электрической составляющей температуры фрикционного контакта в данной работе использована формула, полученная на основе закона Джоуля-Ленца и зависимости количества теплоты от удельной теплоёмкости, массы объекта и его избыточной температуры  $\Delta T_6$ :

$$\Delta T_6 = \frac{U_{\text{к}}^2 \cdot t}{R_0} \cdot \frac{\rho \cdot S_m^3}{c \cdot m}, \quad (11)$$

где  $U_{\text{к}}$  – падение напряжения на фрикционном контакте;

$R_0$  – электрическое сопротивление контакта при начальной температуре;

$t$  – время прохождения электрического тока через фрикционный контакт;

$S_m$  – средний приведённый шаг неровностей профиля поверхностей;

$\rho$  – плотность материала деталей трибосопряжения;

$c$  – удельная теплоёмкость материала деталей трибосопряжения;

$m$  – масса трибосопряжения.

Следует отметить, что формула (11) позволяет выполнить только приближённую оценку избыточной температуры фрикционного контакта, обусловленной влиянием внешне-

го электрического напряжения. Она не учитывает сложные электрические процессы, происходящие в поверхностных плёнках с туннельным типом электропроводности, а также эффект стягивания линий электрического тока к области фактического электрического контакта в пределах площадки касания неровностей рабочих поверхностей трибосопряжения. Такие ограничения сделаны из соображения достаточности математического описания температуры фрикционного контакта для оценки интенсивности тепловых процессов и ограниченности типов трибосопряжений, работающих под действием внешней электрической нагрузки.

После подстановки выражений (6), (7), (9), (10) и (11) в формулу (5) математическая модель тепловых процессов (температуры) в элементарном фрикционном контакте примет следующий вид:

$$T_{\text{O}\hat{\epsilon}} = T_0 + \frac{m_1}{m} \cdot \Delta T_1^* + \frac{m_2}{m} \cdot \Delta T_2^* + \frac{c_3 \cdot \rho_3 \cdot V_3}{c \cdot m} \cdot \Delta T_3^* + \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \times \\ \times \frac{\mu \cdot F_r \cdot v_{\text{н}\hat{\epsilon}} \cdot \tau_N \cdot \sqrt{a_1}}{\lambda \cdot 4 \cdot \sqrt{a_1} + \sqrt{\pi \cdot S_m \cdot v_{\text{н}\hat{\epsilon}}}} \cdot \frac{\rho \cdot S_m^2}{m} + \frac{E}{4 \cdot k \cdot R_0 \cdot \Delta f} \cdot \frac{\rho \cdot S_m^3}{m} + \frac{U_{\hat{\epsilon}}^2 \cdot t}{R_0} \cdot \frac{\rho \cdot S_m^3}{c \cdot m} \quad (12)$$

Условные обозначения в уравнении (12) подробно рассмотрены при описании её компонентов в формулах (3 – 11). Отметим, что данное уравнение предназначено для теоретического определения температуры одиночного фрикционного контакта. Для оценки температуры трибосопряжения в целом необходимо перейти от температуры к количеству теплоты (формула 2), а затем получить комплексное выражение для интегральной температуры поверхностей объекта.

Из уравнения (12) видно, что две составляющих температуры фрикционного контакта находятся в функциональной взаимосвязи с его электрическим сопротивлением. Поэтому между температурой и сопротивлением фрикционного контакта может существовать статистическая взаимосвязь. В данной работе формула (12) принята, как математическая модель температуры фрикционного контакта, и заложена в основу алгоритма экспериментальных исследований тепловых процессов в трибосопряжениях. Её использование позволяет не только выявить наличие взаимосвязи между механическими, электрическими и тепловыми явлениями в трибосопряжении, но и оценить параметры термодинамического процесса, так как одна из составляющих составленной математической модели зависит от времени.

## ВЫВОДЫ

На основе математической модели температуры элементарного фрикционного контакта и структурной модели трибосопряжения можно получить теоретические зависимости для абсолютной и избыточной температуры поверхностей деталей трибосопряжения, имеющего произвольное количество зон трения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев, М.П. Расчет высокоточных шарикоподшипников [Текст] / М.П. Ковалев, Н.З. Народецкий // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 1980. – 373 с.
2. Марков, В.В. Математические методы исследования диагностических признаков и параметров трибосопряжений [Текст] / В.В. Марков // Информационные системы и технологии. – 2009. – № 6. – С. 58-68.

**Марков Владимир Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орёл

доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», к.т.н., доцент

Телефон: (4862)41-98-76;

E-mail: pms35vm@yandex.ru

V.V. MARKOV

## MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL PROCESSES IN THE ELEMENTARY FRICTION CONTACT

*In this article is consider the mathematical model of thermal processes, which is take place in the elementary friction contact; this model is account the probabilities sources of thermal energy in the bounds of contacting surfaces and the influence they subscription in the common temperature a object of control.*

**Keywords:** *friction; tribology; tribotechnical system; friction contact; zone of friction; active electrical resistance; electrical capacity; temperature; structurally model.*

1. Kovalev, M.P. Raschet vysokotochnyh sharikopodshipnikov [Tekst] / M.P. Kovalev, N.Z. Narodeckij // 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie. – 1980. – 373 s.
2. Markov, V.V. Matematicheskie metody issledovaniya diagnosticheskikh priznakov i parametrov tribosopryazhenij [Tekst] / V.V. Markov // Informacionnye sistemy i tehnologii. – 2009. – № 6. – S. 58-68.

## **BIBLIOGRAPHY**

### **Markov Vladimir Vladimirovich**

State University – ESPC, Orel, Russia

Associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”, candidate of technical science, associate professor

Tel. (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

А.А. БЕЛОВ, А.Ю. ПРОСКУРЯКОВ

## ВОПРОСЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЕЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ГАЗОВОГО КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОММУНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

*В данной статье авторы освещают разработку автоматизированного поста телекоммуникационной системы газового контроля, предназначенного для сбора данных о концентрациях токсичных и взрывоопасных веществ в составе воздушной среды на промышленных и коммунальных объектах с замкнутым пространством и вероятностью загазованности. Разработан комбинированный алгоритм прогнозирования значений концентраций с применением искусственных нейронных сетей и вейвлет-преобразования.*

**Ключевые слова:** телекоммуникационная система, модуль сбора данных, беспроводная связь, искусственная нейронная сеть, временной ряд, прогнозирование значений ряда.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы обеспечения безопасных условий работы персонала в промышленности, коммунальных сетях, на объектах с замкнутым пространством, с имеющейся вероятностью выделения и накопления токсичных и взрывоопасных газообразных веществ (колотцы, шахты и др.) являются приоритетными и обязательными. Работа на подобного рода объектах связана с риском и опасностью для жизни и здоровья людей, в частности риска отравления/удушения вредными, скопившимися концентратами газов и возможного взрыва и возгорания скопившихся газовых смесей. Поэтому создание телекоммуникационных систем и устройств дистанционного контроля концентраций токсичных и взрывоопасных газовых смесей, и их постоянного мониторинга является весьма актуальной задачей. Решение этой задачи позволит осуществить безопасный контроль, работу и обслуживание на соответствующего рода объектах, снизить вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций, исключить человеческие жертвы, существенно минимизировать возможные экономические потери, связанные с возникновением и развитием аварийных ситуаций в промышленности и сфере ЖКХ.

Автоматизированная телекоммуникационная система газового контроля позволит создать единую систему метрологического обеспечения проведения работ и обслуживания объектов промышленности и коммунального хозяйства, единую систему информационно-справочных данных.

В разработке подобной системы и устройства заинтересованы предприятия добывающей нефтегазовой, горной, химической промышленности, а также отрасль жилищно-коммунального хозяйства. При этом одной из важнейших функций разрабатываемой телекоммуникационной системы является не только детектирование и оповещение об опасных уровнях токсичных и взрывоопасных газовых смесей, с привязкой всех данных к картографической основе, но и прогнозирование значений временных рядов концентраций газов. Качественно проведенное прогнозирование и моделирование ситуации обеспечит своевременное принятие управляющих решений, направленных на удаление скопившихся токсичных и взрывоопасных газовых смесей из рабочей зоны, с целью исключения аварийных ситуаций, минимизации экономического ущерба. На процесс прогнозирования существенное влияние оказывает флуктуация сигнала или присутствие значительной нелинейности в данных. Существует большое количество методов интерполяции и экстраполяции временных рядов [1]. Интерес вызывает разработка комбинированного метода прогнозирования в нейросетевом базисе, с использованием вейвлет-преобразования. Кроме газового контроля на объектах с замкнутым пространством и вероятностью загазованности, решение задачи прогнозирования значений временных рядов находит применение в широком спектре отраслей.

## РАЗРАБОТКА ПОСТА СБОРА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОВОГО КОНТРОЛЯ

В состав поста сбора данных телекоммуникационной системы газового контроля входят два модуля (рис. 1). Модуль А отвечает за сбор информации о наличии в среде легковоспламеняющихся, взрывоопасных и токсичных газообразных веществ и включает в себя один многокомпонентный или несколько, чувствительных к определенному типу газа, датчиков. Второй модуль (модуль Б) предназначен для управления модулем сбора, графической и звуковой индикацией результатов измерения и передачи данных по беспроводному радиоканалу единому информационному центра накопления и обработки информации распределенной телекоммуникационной системы.

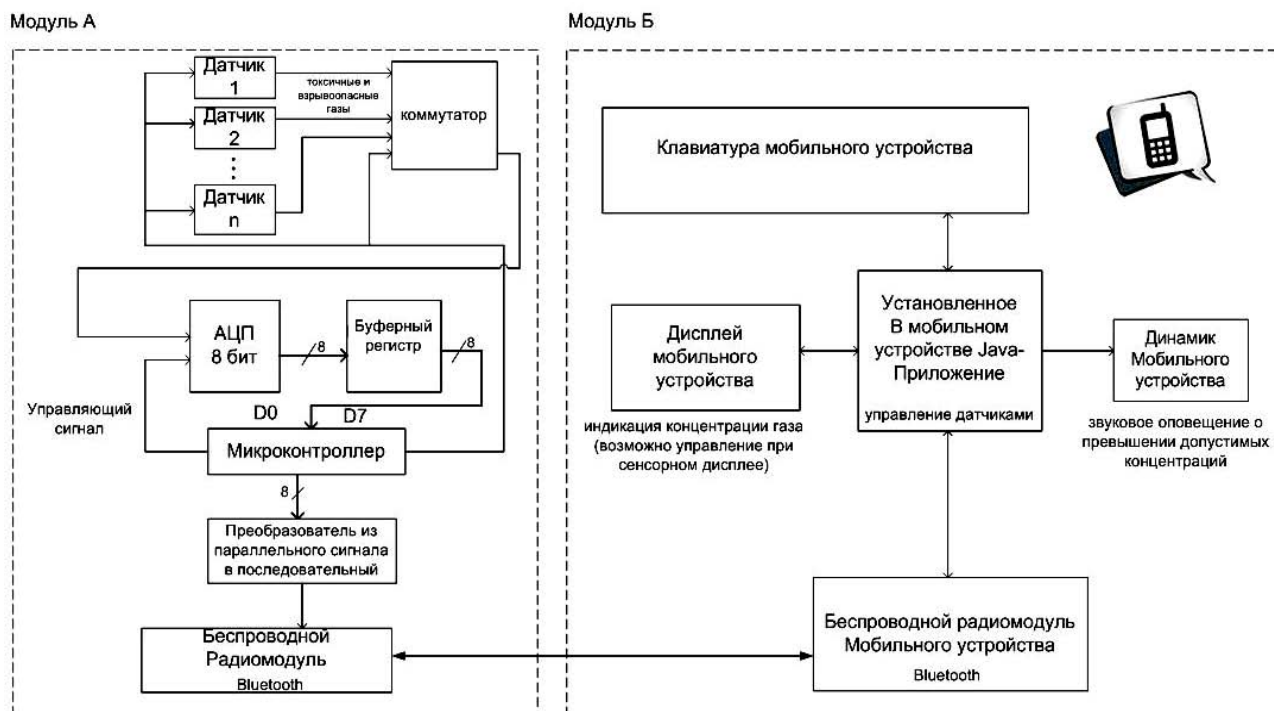


Рисунок 1 – Структура поста сбора данных телекоммуникационной системы

В модуль А входит микроконтроллер, который обеспечивает приём управляющих сигналов от модуля Б, управляет сбором данных от датчиков токсичных и взрывоопасных веществ и преобразует данные о концентрациях к формату, пригодному для передачи по радиоканалу. В модуле А в базовой комплектации используются следующие датчики: датчик метана ( $ch_4$ ) на основе сенсора типа tgs2611 и датчик сероводорода ( $h_2s$ ) на основе сенсора типа tgs 825. Ввиду гибкости системы, тип газовых сенсоров и количество датчиков могут быть подобраны в соответствии с объектом контроля. Коммутатор подключает два канала с датчиков к АЦП. Информация с АЦП через буферный регистр попадает во внутреннюю память микроконтроллера. Он обеспечивает приём управляющих сигналов от модуля Б, управляет сбором данных от датчиков токсичных и взрывоопасных веществ и преобразует данные о концентрациях газов и сигналов аварийного состояния водопровода к формату, пригодному для передачи по радиоканалу Bluetooth. Питание модуля А обеспечивается высокоемкими аккумуляторами.

В качестве второго модуля может выступать переносное мобильное устройство: сотовый телефон, коммуникатор или планшет, с предустановленным программным приложением для iOS, Android, WP7, обеспечивающее управление модулем сбора, индикацию концентраций выбранного газа и оповещение о превышении допустимых норм. Для передачи данных и управляющих сигналов между модулями используется стандартный для большинства современных мобильных устройств беспроводной радио-интерфейс Bluetooth, что повышает надежность, взаимозаменяемость компонентов. В случае выхода из строя штатного мобильного



блока индикации и управления, осуществляющий газовый контроль персонал может применить другое мобильное устройство с поддержкой технологии Bluetooth для дальнейшей работы (анализа среды). Для этого необходимо лишь установить управляющее программное приложение на мобильное устройство.

При этом модуль управления и индикации может располагаться от модуля сбора данных с датчиками на расстоянии, ограниченном спецификацией Bluetooth (до 100 метров). Имеется возможность увеличения радиуса действия до 1 км за счет применения в каждом из модулей приемопередатчиков Bluetooth с антеннами направленного действия. При этом на мобильном устройстве установлено геоинформационное приложение, позволяющее отобразить всю необходимую информацию на карте, которая может быть пригодна для ремонтных и обслуживающих бригад. При этом для передачи данных между стационарными постами контроля, передвижными мобильными станциями и единым информационным центром системы используется встроенный в мобильное устройство трансивер, обеспечивающий связь согласно высокоскоростным технологиям 3G (4G, LTE).

Для хранения данных в едином информационном центре сбора и обработки информации предполагается разработать базы данных. Автоматизированные стационарные посты контроля имеют адресную картографическую привязку, и поэтому вся тематическая и атрибутивная информация будет связана с конкретными объектами картографической основы геоинформационной системы (ГИС) [2]. Интеграционный характер геоинформационной системы позволит создать на их основе мощный инструмент для сбора, хранения, систематизации, анализа и представления информации по вопросам контроля за параметрами загазованности, сигналами обнаружения аварийных ситуаций и дальнейшего прогнозирования газового состояния объектов промышленности и ЖКХ с привязкой к карте.

Все поступающие с автоматизированных постов контроля данные проходят предварительную проверку, включающую в себя оценку достоверности измеряемых параметров с целью выявления метрологических погрешностей и неисправностей измерительного и передающего оборудования.

Все пункты контроля объединяются в сеть и взаимодействуют с вычислительной сетью региона, с сервером, отвечающим за сбор, анализ и хранение информации. Основным звеном в системе является программа, осуществляющая сетевой сбор информации и её обработку.

Предлагаемый проект телекоммуникационной системы контроля предполагает организацию дистанционного мониторинга состояния объектов промышленности и ЖКХ, дистанционного взаимодействия пунктов контроля с вычислительными сетями региона, а также регистрацию и обработку данных дистанционного контроля параметров промышленных объектов и коммунальных сетей с последующим выявлением опасных и проблемных объектов и участков.

Пункты контроля в любое время, без прерывания работы всей вычислительной сети, могут быть подключены к ней или отключены. Функционирование вычислительной сети не зависит от состояния отдельного пункта контроля.

Представляемая телекоммуникационная система газового контроля промышленных и коммунальных объектов имеет открытую архитектуру, что обеспечивает широкие возможности по наращиванию ее мощности как в плане включения в ее состав новых постов контроля, так и в плане их оснащения широким спектром датчиков. Открытость системы базируется на известных принципах работы аппаратного и программного обеспечения.

Система контроля позволяет выдавать информацию оперативно, позволяет определять объективно и достоверно масштабы аварий. На основании полученных данных можно разрабатывать мероприятия по предотвращению человеческих жертв и минимизации экономического ущерба.

В состав проектируемой автоматизированной системы входит также программное обеспечение, предназначенное для прогнозирования уровней концентраций токсичных и взрывоопасных газов на контролируемых объектах и участках.

## АЛГОРИТМ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Общая концепция алгоритма прогнозирования значений временных рядов в нейросетевом базисе с применением вейвлет-преобразования представлена на рисунке 2.

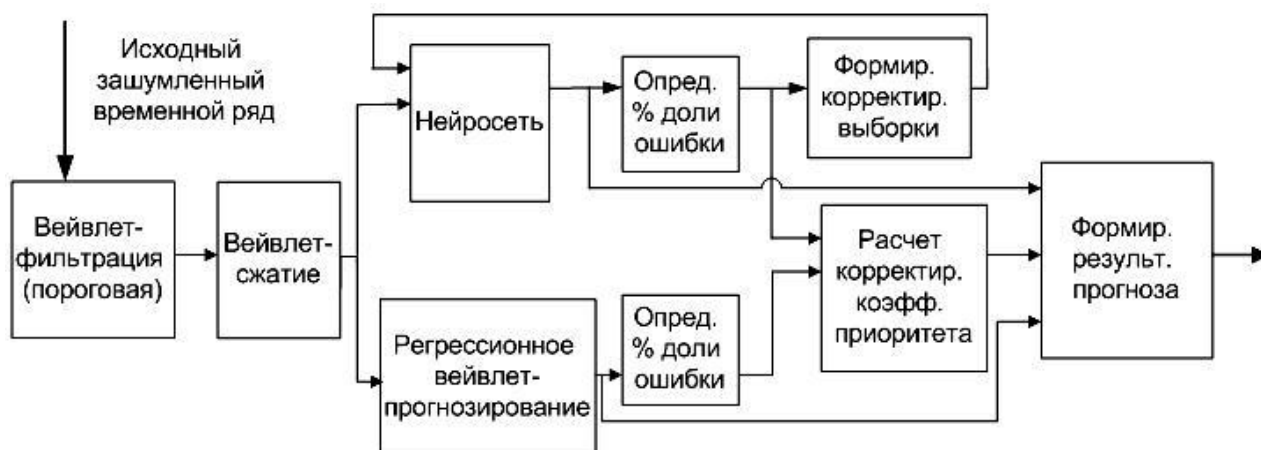


Рисунок 2 – Алгоритм комбинированного прогноза

После выполнения этапа предварительного вейвлет-преобразования [3] (сглаживание и сжатие временного ряда), временной ряд подается на подсистемы прогнозирования и коррекции результатов.

Далее из множества значений ряда выделяются два непересекающихся подмножества (как правило, хронологически следующих одно за другим). Одно из них представляет собой обучающую выборку (ОВ), на которой будет выполняться обучение нейронной сети (НС). Другое подмножество представляет собой контрольную выборку (КВ), которая не предъявляется НС в процессе обучения и используется для проверки качества прогноза. Таким образом, прогнозирование временного ряда сводится к задаче интерполяции функции многих переменных. НС используется для восстановления этой функции по множеству наборов, входящих в состав ОВ.

На этапе структурного синтеза производится выбор архитектуры НС и структуры связей между нейронами.

На этапе параметрического синтеза НС выполняется обучение НС. Как правило, используются методы градиентного спуска, в частности алгоритм обратного распространения ошибки и его модификации.

Далее осуществляется проверка ошибки прогноза НС на КВ. В результате сравнения выходных данных с контрольными, вычисляется процентная доля ошибки для заданного входного временного ряда. Учитывая этот процент ошибки и разницу между выходным сигналом и КВ, формируется корректирующая выборка, представляющая собой модификацию весовых коэффициентов НС. Таким образом, помимо первого этапа формирования начальной процедуры обучения с применением ОВ, происходит постоянная адаптация и усовершенствование НС, с учетом накопленного опыта, то есть повторный переход к этапу параметрического синтеза и, следовательно, сведение вероятности появления ошибки НС к минимуму.

Стоит также отметить, что в данной системе, на начальном этапе её работы, приоритет отдается регрессионному вейвлет-прогнозированию, т.к. НС требуется определенный период, чтобы результат был приемлемого качества, то есть с низкой процентной долей ошибки. Поэтому при первых запусках системы наряду с НС, для получения пусть и не эталонных, но относительно достоверных прогнозов, параллельно включается замещающая подсистема регрессионного вейвлет-прогнозирования, работающая согласно алгоритму:

1) Преобразование временного ряда данных в массив  $(X_b, Y_b)$ , в котором  $X_b$  – равномерно распределенные временные отрезки. Для каждого отрезка  $i$ , находится среднее значение  $Y_b(i)$  на данном отрезке.

2) Выполнение вейвлет-разложения сигнала  $Y_b(i)$ . На данном этапе, посредством скейлинг и вейвлет функций осуществляется аппроксимация сигнала  $Y_b(i)$  коэффициентами разложения. В результате получаются усредненные аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты:

$$\bar{N}_{J,k} \approx \frac{1}{n} \sum_{l=1}^{nb} Y_b(l) \cdot \varphi_{J,k}(X_b(l)); \quad \bar{d}_{J,k} \approx \frac{1}{n} \sum_{l=1}^{nb} Y_b(l) \cdot \psi_{J,k}(X_b(l)).$$

где  $J$  – уровень вейвлет-разложения,  
 $l$  – номер временного интервала.

Полученные коэффициенты полностью характеризуют функцию регрессии  $\bar{f}$ , с помощью которой может быть выполнена операция экстраполяции.

3) С помощью обратного вейвлет-преобразования по коэффициентам  $\bar{C}_{J,k}$  и  $\bar{d}_{J,k}$  восстанавливается прогнозируемое значение временного ряда  $y(j)$  для произвольного значения параметра  $x(j)$ , лежащего внутри или за границами исходного диапазона значений времени:

$$y(j) \approx \bar{C}_J \cdot \varphi_J(x(j)) + \sum_{m=1}^J \bar{d}_m \cdot \psi_J(x(j)).$$

Прогнозированию подвергался исходный тестовый временной ряд концентраций сероводорода (744 отсчета, измерения проводились каждый час в течение месяца).

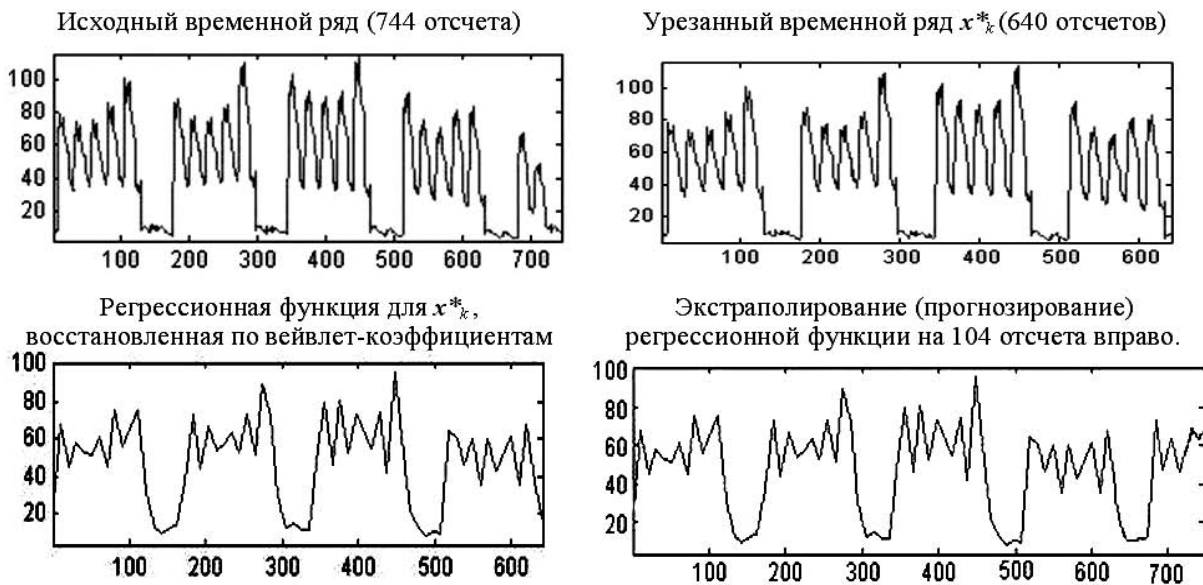


Рисунок 3 – Результаты эксперимента

При этом в качестве обучающей выборки использовался урезанный ряд, состоящий из 640 отсчетов, прогнозировались 104 следующих отсчета (рис. 3), представляющие значения ряда [4].

Была оценена эффективность предварительного регрессионного вейвлет-прогнозирования (табл. 1) по критерию средней процентной ошибки:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{x_k - \bar{x}_k}{x_k} \right| \cdot 100\%.$$

Также для оценки может использоваться логарифмическая ошибка прогноза:

$$EL = \left| \ln \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left( \frac{x_k}{\bar{x}_k} \right) \right| \cdot 100\%, \text{ либо средняя квадратическая ошибка (Mean Square Error):}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-1} e_t^2.$$

Таблица 1 – Статистика и ошибки предварительного этапа прогнозирования

Параметр	26 отсчетов (часов)		52 отсчета (часов)		78 отсчетов (часов)		104 отсчета (часов)	
	Реальн. данные	Прогн. данные	Реальн. данные	Прогн. данные	Реальн. данные	Прогн. данные	Реальн. данные	Прогн. данные
Среднее	16,34	17,31	17,52	19,65	19,25	34,32	20,69	38,34
Мода	4,32	6,34	4,71	7,72	4,72	8,37	4,72	9,77
Максимальное	35,24	32,46	67,55	70,86	67,55	68,82	67,55	70,86
Минимальное	3,43	4,21	3,64	8,61	3,64	8,61	3,64	8,61
Размах вариации	31,81	62,25	63,91	62,25	63,91	60,21	63,91	62,25
Дисперсия	12,67	14,12	22,66	25,49	19,37	25,12	19,43	28,08
<i>MAPE</i>	5,93 %		12,15 %		78,28 %		85,31 %	
<i>MSE</i>	0,94		4,53		227,11		311,52	
<i>EL</i>	5,77 %		11,47 %		57,58 %		61,68 %	

После того, как процентная доля ошибки искусственной нейронной сети и подсистемы регрессионного вейвлет-прогнозирования сравнивается, система автоматически переходит на прогнозирование с применением нейронной сети [5], накопившей к этому моменту необходимый «опыт» для адекватной оценки прогноза и выдающей с каждой следующей выборкой более корректные и точные экстраполированные значения временного ряда.

### ВЫВОДЫ

В ходе исследования была разработана структурная схема поста сбора данных телекоммуникационной системы газового контроля, назначением которого является дистанционный контроль уровней концентраций токсичных и взрывоопасных газов, который необходим для обеспечения безопасной работы на объектах с вероятной загазованностью. При этом в качестве модуля управления-индикации предлагается использовать стандартное мобильное устройство (телефон, КПК, планшет) поддерживающего стандартную технологию беспроводной передачи Bluetooth. Программное обеспечение телекоммуникационной системы и отдельных её частей учитывает основные тенденции рынка ПО мобильных и вычислительных устройств. На основе математических аппаратов вейвлет-преобразования и искусственных нейронных сетей разработан алгоритм комбинированного прогнозирования значений концентраций. Разработанный алгоритм используется в подсистеме прогнозирования единого информационного центра накопления и обработки данных системы. Средняя процентная ошибка при экстраполяции тестового временного ряда на 52 отсчета в подсистеме комбинированного прогнозирования на основе вейвлет преобразования и аппарата НС при этом составляет 12,15 % (высококачественный прогноз). К этому моменту процесс обучения НС должен завершиться. Применение описанного выше подхода позволит повысить качество и оперативность прогнозирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов, А.А. Автоматизированный анализ и обработка временных рядов данных о загрязняющих выбросах в системе экологического контроля [Текст] / А.А. Белов, Ю.А. Кропотов, А.Ю. Проскуряков // Информационные системы и технологии. – 2010. – № 6(62). – С. 28-35.
2. Белов, А.А. Исследование вопросов сжатия и поиска картографической информации методом вейвлет-преобразований в экологической геоинформационной системе [Текст] / А.А. Белов, Ю.А. Кропотов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – № 12. – С. 9-15.
3. Белов, А.А. Вопросы обработки экспериментальных временных рядов в электронной системе автоматизированного контроля [Текст] / А.А. Белов, Ю.А. Кропотов, А.Ю. Проскуряков // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. – 2010. – № 1. – С. 95-101.

4. Белов, А.А. Регрессионное прогнозирование и восстановление временных рядов на основе вейвлет-преобразования в системе экологического мониторинга [Текст] / А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – № 1. – С. 27-31.

5. Белов, А.А. Комбинированный алгоритм прогнозирования на базе вейвлет-преобразования и нейронных сетей [Текст] / А.А. Белов, А.Ю. Проскуряков // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2011. – № 1(13). – С. 109-113.

**Белов Алексей Анатольевич**

Муромский институт (филиал), Владимирский государственный университет, г. Муром  
Канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника»  
Тел.: +7(49234) 77272  
E-mail: aleks.murom@mail.ru

**Проскуряков Александр Юрьевич**

Муромский институт (филиал), Владимирский государственный университет, г. Муром  
Аспирант ВлГУ  
Тел.: +7(49234) 77272  
E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

A.A. BELOV, A.Y. PROSKURYAKOV

**QUESTIONS OF PREDICTION CONCENTRATION LEVELS IN THE  
TELECOMMUNICATIONS INDUSTRIAL AND MUNICIPAL FACILITIES  
GAS CONTROL SYSTEM**

*In given article authors shine a problem of development automated telecommunications system for gas control designed to capture data of toxic and hazardous substances concentrations in the industrial and municipal facilities air, with a closed space and the possibility of gas contamination. Proposed a combined algorithm for predicting concentration values based on artificial neural networks and wavelet transformation*

**Keywords:** telecommunication system, gas detector module, wireless communication, neural network, time series, prediction of the time series.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Belov, A.A. Avtomatizirovannyj analiz i obrabotka vremennyh rjadov dannyh o zagryzajajuwih vybrosah v sisteme jekologicheskogo kontrolja [Tekst] / A.A. Belov, Ju.A. Kropotov, A.Ju. Proskurjakov // Informacionnye sistemy i tehnologii. – 2010. – № 6(62). – S. 28-35.

2. Belov, A.A. Issledovanie voprosov szhatija i poiska kartograficheskoi informacii metodom vejvlet-preobrazovanij v jekologicheskoi geoinformacionnoj sisteme [Tekst] / A.A. Belov, Ju.A. Kropotov // Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij. – 2008. – № 12. – S. 9-15.

3. Belov, A.A. Voprosy obrabotki jeksperimental'nyh vremennyh rjadov v jelektronnoj sisteme avtomatizirovannogo kontrolja [Tekst] / A.A. Belov, Ju.A. Kropotov, A.Ju. Proskurjakov // Voprosy radiojelektroniki. Serija obwetehnicheskaja. – 2010. – № 1. – S. 95-101.

4. Belov, A.A. Regressionnoe prognozirovanie i vosstanovlenie vremennyh rjadov na osnove vejvlet-preobrazovanija v sisteme jekologicheskogo monitoringa [Tekst] / A.A. Belov, A.Ju. Proskurjakov // Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv. – 2010. – № 1. – S. 27-31.

5. Belov, A.A. Kombinirovannyj algoritm prognozirovanija na baze vejvlet-preobrazovanija i nejronnyh setej [Tekst] / A.A. Belov, A.Ju. Proskurjakov // Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii. – 2011. – № 1(13). – S. 109-113.

**Belov Alexey Anatolyevich**

Murom Institute (Branch), Vladimir State University, Murom  
Candidate of technical science, associate professor of department "Electronics and Computer Science"  
Tel.: +7(49234) 77272  
E-mail: aleks.murom@mail.ru

**Proskuryakov Alexandr Yuryevich**

Murom Institute (Branch), Vladimir State University, Murom  
Post-graduate student  
Tel.: +7(49234) 77272  
E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

А.А. ГОРШКОВ, Е.В. ЛАРКИН

## РАСЧЕТ НАБЛЮДАЕМОЙ ПЛОЩАДИ В СИСТЕМЕ С МНОЖЕСТВОМ ВИДЕОКАМЕР

*Получена общая зависимость для расчета площади наблюдаемой территории в системе контроля со множеством видеокамер. Разработана методика расчета площади перекрытия полей зрения видеокамер.*

**Ключевые слова:** видеокамера, видеоконтроль, поле зрения, пересечение площадей.

Системы видеонаблюдения в настоящее время широко применяются как средство охраны территорий предприятий, офисов, складских помещений и других промышленных и непромышленных объектов. Одной из задач, возникающих при проектировании систем подобного типа, является задача оптимизации размещения множества видеокамер по площади, причем в качестве критерия оптимизации может служить общая площадь наблюдаемой сцены, которая для данного количества используемых видеокамер должна иметь максимальное значение [1].

Пусть видеокамеры располагаются в одной плоскости  $xOy$ . Разместим камеру таким образом, чтобы центр выходной линзы объектива совпал с началом координат  $O$ , а главная оптическая ось совпала с осью  $Ox$  (рис. 1). Из законов геометрической оптики известно, что поле зрения видеокамеры представляет собой симметричную трапецию  $A'B'C'D'$ , боковыми сторонами которой являются отрезки  $A'D'$  и  $B'C'$ , формирующие угол  $2w$  зрения объектива  $O$ , а нижнее  $C'D'$  и верхнее  $A'B'$  основания перпендикулярны главной оптической оси [2]. Величины  $a$  и  $b$  представляют собой, соответственно, наименьший передний отрезок объектива и дальнюю границу поля зрения, определяемую из размеров обнаруживаемого объекта и разрешающей способности пары объектив/фотоэлектронный преобразователь.

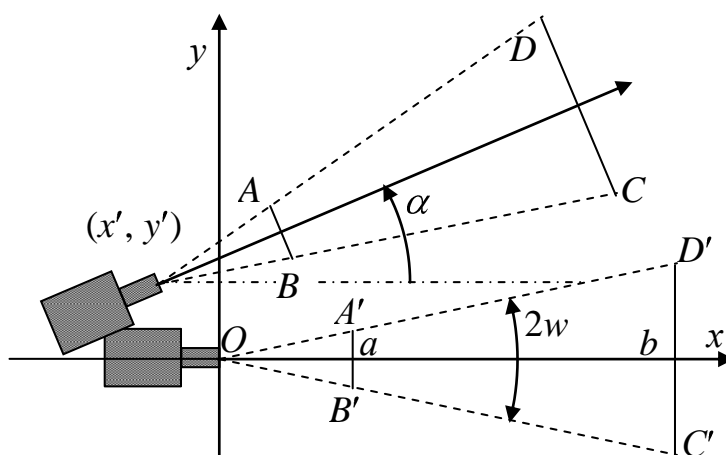


Рисунок 1 – Поле зрения видеокамеры

Координаты угловых точек  $A', B', C', D'$  трапеции имеют значения:

$$\begin{aligned} \langle x_{A'}, y_{A'} \rangle &= \langle a, a \operatorname{tg} w \rangle; \quad \langle x_{B'}, y_{B'} \rangle = \langle a, -a \operatorname{tg} w \rangle; \\ \langle x_{C'}, y_{C'} \rangle &= \langle b, -b \operatorname{tg} w \rangle; \quad \langle x_{D'}, y_{D'} \rangle = \langle b, b \operatorname{tg} w \rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

При смещении камеры относительно начала координат на величину  $(x', y')$  и повороте ее на угол азимута  $\alpha$  координаты точек  $A', B', C', D'$  определяются по зависимости

$$\langle x_{A,B,C,D}, y_{A,B,C,D} \rangle = \langle x_{A',B',C',D'}, y_{A',B',C',D'} \rangle \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} + \langle x', y' \rangle. \quad (2)$$

Площадь территории, наблюдаемой единственной видеокамерой может быть определена как площадь равнобедренной трапеции по зависимости [3]

$$S = \left( a^2 - a^2 \right) \text{tg } w. \quad (3)$$

В распределенной системе видеонаблюдения, включающей  $n$  видеокамер, суммарная наблюдаемая площадь не равна простой сумме площадей, определяемых по зависимости (3), поскольку часть контролируемой территории может быть перекрыта дважды, трижды и т.п. Общая зависимость для вычисления суммарной наблюдаемой площади имеет вид [3]:

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n S_i - \sum_{\substack{i=1, \\ j=1, \\ i \neq j}}^n \left( S_i \cap S_j \right) + \dots + (-1)^{m-1} \sum_{\substack{i=1, \dots, \\ j=1, \dots, \\ m=1, \dots, \\ i \neq \dots \neq j \neq \dots \neq m}}^n \left( S_i \cap \dots \cap S_j \cap \dots \cap S_m \right) + \dots + (-1)^{n-1} \prod_{i=1}^n S_i, \quad (4)$$

где  $S_i$  - площадь поля зрения  $i$ -й видеокамеры;

$\cap$  - знак пересечения;

$S_i \cap S_j$  - площадь пересечения полей зрения  $i$ -й и  $j$ -й видеокамер; ...;

$\prod_{i=1}^n S_i$  - площадь пересечения всех  $n$  камер.

Для определения перекрытия полей зрения видеокамер при их произвольном размещении на охраняемой территории пространство  $xOy$  целесообразно разделить на следующие шесть секторов:  $0^\circ < \alpha < 90^\circ - w$ ;  $90^\circ - w < \alpha < 90^\circ + w$ ;  $90^\circ + w < \alpha < 180^\circ$ ;  $180^\circ < \alpha < 270^\circ - w$ ;  $270^\circ - w < \alpha < 270^\circ + w$ ;  $270^\circ + w < \alpha < 360^\circ$ .

Система неравенств, описывающая попадание точки  $c_k$  с координатами  $(x_{ck}, y_{ck})$  внутрь трапеции с угловыми точками, определяемыми зависимостями (1) и (2), имеет вид:

1) при  $0^\circ < \alpha < 90^\circ - w$  -

$$y_{ck} > x_{ck} \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} + \frac{x_B y_A - x_A y_B}{x_A - x_B}; \quad y_{ck} > x_{ck} \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} + \frac{x_B y_C - x_C y_B}{x_C - x_B};$$

$$y_{ck} < x_{ck} \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} + \frac{x_C y_D - x_D y_C}{x_D - x_C}; \quad y_{ck} < x_{ck} \frac{y_A - y_D}{x_A - x_D} + \frac{x_D y_A - x_A y_D}{x_A - x_D};$$

2) при  $90^\circ - w < \alpha < 90^\circ + w$  -

$$y_{ck} > x_{ck} \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} + \frac{x_B y_A - x_A y_B}{x_A - x_B}; \quad y_{ck} > x_{ck} \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} + \frac{x_B y_C - x_C y_B}{x_C - x_B};$$

$$y_{ck} < x_{ck} \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} + \frac{x_C y_D - x_D y_C}{x_D - x_C}; \quad y_{ck} > x_{ck} \frac{y_A - y_D}{x_A - x_D} + \frac{x_D y_A - x_A y_D}{x_A - x_D};$$

3)  $90^\circ + w < \alpha < 180^\circ$  -

$$y_{ck} > x_{ck} \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} + \frac{x_B y_A - x_A y_B}{x_A - x_B}; \quad y_{ck} < x_{ck} \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} + \frac{x_B y_C - x_C y_B}{x_C - x_B};$$

$$y_{ck} < x_{ck} \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} + \frac{x_C y_D - x_D y_C}{x_D - x_C}; \quad y_{ck} > x_{ck} \frac{y_A - y_D}{x_A - x_D} + \frac{x_D y_A - x_A y_D}{x_A - x_D};$$

4)  $180^\circ < \alpha < 270^\circ - w$  -

$$y_{ck} < x_{ck} \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} + \frac{x_B y_A - x_A y_B}{x_A - x_B}; \quad y_{ck} < x_{ck} \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} + \frac{x_B y_C - x_C y_B}{x_C - x_B};$$

$$y_{ck} > x_{ck} \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} + \frac{x_C y_D - x_D y_C}{x_D - x_C}; \quad y_{ck} > x_{ck} \frac{y_A - y_D}{x_A - x_D} + \frac{x_D y_A - x_A y_D}{x_A - x_D};$$

5)  $270^\circ - w < \alpha < 270^\circ + w$  -

$$y_{ck} < x_{ck} \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} + \frac{x_B y_A - x_A y_B}{x_A - x_B}; y_{ck} < x_{ck} \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} + \frac{x_B y_C - x_C y_B}{x_C - x_B};$$

$$y_{ck} > x_{ck} \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} + \frac{x_C y_D - x_D y_C}{x_D - x_C}; y_{ck} < x_{ck} \frac{y_A - y_D}{x_A - x_D} + \frac{x_D y_A - x_A y_D}{x_A - x_D};$$

б)  $270^\circ + w < \alpha < 360^\circ$  -

$$y_{ck} < x_{ck} \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} + \frac{x_B y_A - x_A y_B}{x_A - x_B}; y_{ck} > x_{ck} \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} + \frac{x_B y_C - x_C y_B}{x_C - x_B};$$

$$y_{ck} > x_{ck} \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} + \frac{x_C y_D - x_D y_C}{x_D - x_C}; y_{ck} < x_{ck} \frac{y_A - y_D}{x_A - x_D} + \frac{x_D y_A - x_A y_D}{x_A - x_D}. \quad (5)$$

Выполнение всех неравенств одной из шести групп означает, что точка с координатами  $(x_{ck}, y_{ck})$  попадает внутрь трапеции данной группы. Таким образом, если одна из угловых точек поля зрения  $i$ -й видеокамеры попадает внутрь поля зрения  $j$ -й камеры, это означает, что  $i$ -е и  $j$ -е поля зрения перекрываются.

Другой случай перекрытия полей зрения видеокамер идентифицируется по пересечению отрезков, ограничивающих площади полей зрения. Для  $i$ -й и  $j$ -й камер, угловые точки полей зрения которых имеют координаты  $(x_{Ai}, y_{Ai}), (x_{Bi}, y_{Bi}), (x_{Ci}, y_{Ci}), (x_{Di}, y_{Di})$  и  $(x_{Aj}, y_{Aj}), (x_{Bj}, y_{Bj}), (x_{Cj}, y_{Cj}), (x_{Dj}, y_{Dj})$ , точки  $c_k$  пересечения отрезков определяются в результате решения следующих систем уравнений и неравенств:

$$\begin{cases} \frac{x_{ck} - x_{\beta i}}{y_{ck} - y_{\beta i}} = \frac{x_{ck} - x_{\gamma i}}{y_{ck} - y_{\gamma i}}; \\ \frac{x_{ck} - x_{\beta j}}{y_{ck} - y_{\beta j}} = \frac{x_{ck} - x_{\gamma j}}{y_{ck} - y_{\gamma j}}; \\ x_{\beta i} \leq x_{ck} \leq x_{\gamma i}, \text{ или } y_{\beta i} \leq y_{ck} \leq y_{\gamma i}; \\ \beta, \gamma \in \{A, B\} \text{ или } \{B, C\} \text{ или } \{C, D\} \text{ или } \{D, A\}. \end{cases} \quad (6)$$

Некоторые случаи пересечения полей зрения приведены на рисунке 2. Геометрические фигуры, получающиеся в результате пересечения, имеют вид выпуклых многоугольников с количеством углов от трех до восьми. Вершины многоугольников  $c_k$  ( $k = 1, \dots, K; K = 3, \dots, 8$ ) на рисунке 2 обозначены кружками.

Для определенности можно считать, что нумерация вершин многоугольника соответствует порядку их появления при обходе периметра геометрической фигуры в направлении по часовой стрелке. Если выбрать вершину  $c_1$  и провести из нее отрезки в вершины  $c_3, \dots, c_{K-1}$ , то в результате многоугольник разбивается на  $K - 2$  треугольников, координаты вершин которых известны: это или угловые точки  $i$ -го ( $j$ -го) поля зрения, попавшие внутрь  $j$ -го ( $i$ -го) поля зрения, определяемые по зависимости (2) в соответствии с неравенствами (5), или точки пересечения отрезков, определяемые из системы уравнений и неравенств (6). В общем случае координаты вершин треугольника будут иметь вид:  $(x_{c1}, y_{c1}), (x_{ck}, y_{ck}), (x_{cl}, y_{cl}), 1 = k + 1, 2 \leq k \leq K - 1$ . Общая зависимость для определения площади перекрытия полей зрения может быть получена с применением формулы Герона [4] для площадей треугольников:

$$S_i \cap S_j = \frac{1}{4} \sum_{k=2}^{K-1} \sqrt{(L_{k1} + L_{k2} + L_{k3})(L_{k1} + L_{k2} - L_{k3})(L_{k1} - L_{k2} + L_{k3})(L_{k1} + L_{k2} + L_{k3})}, \quad (7)$$

где

$$L_{k1} = \sqrt{(x_{c1} - x_{ck})^2 + (y_{c1} - y_{ck})^2}; L_{k2} = \sqrt{(x_{ck} - x_{cl})^2 + (y_{ck} - y_{cl})^2};$$

$$L_{k3} = \sqrt{(x_{cl} - x_{c1})^2 + (y_{cl} - y_{c1})^2}; 1 = k + 1.$$



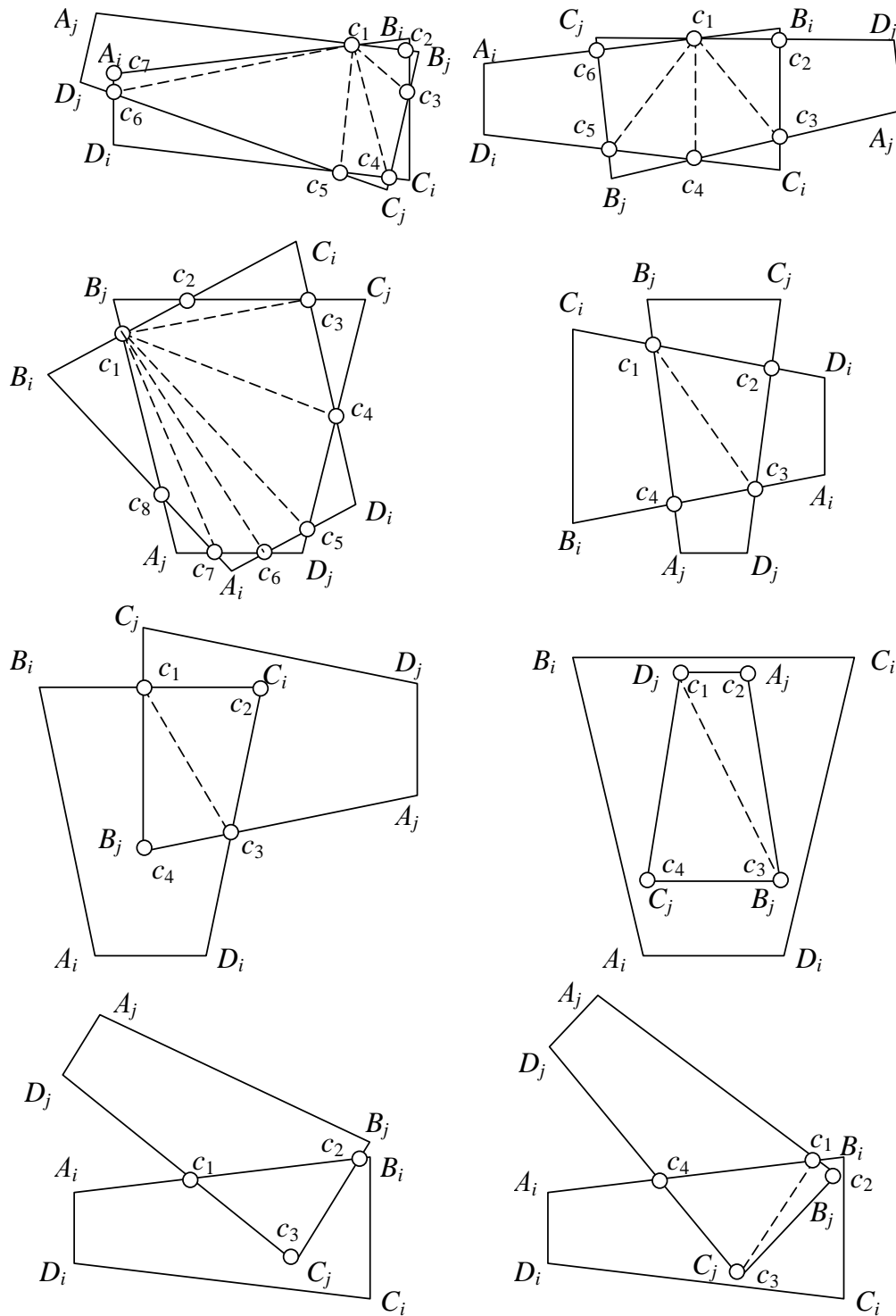


Рисунок 2 – Перекрывание полей зрения видеокамер

Площади по зависимости (7) должны быть рассчитаны для всех пар перекрывающихся полей зрения из (4).

Площадь пересечения  $m$  полей зрения может быть получена в результате  $(m - 1)$ -шаговой процедуры. Пусть на  $(m - 2)$ -м этапе процедуры получен многоугольник пересечения  $m - 1$  полей зрения, и в систему видеонаблюдения добавляется  $m$ -я видеокамера. С помощью группы неравенств, подобных (5) и составляемых для всех угловых точек  $m$ -го поля зрения и прямых, формирующих многоугольник, определяются точки поля зрения  $m$ -й камеры, попавшие внутрь многоугольника. С помощью уравнений и неравенств, подобных (6), определяются точки пересечения отрезков, образующих многоугольник и отрезков, формирующих поле зрения  $m$ -й видеокамеры. Из найденных точек строится новый многоугольник,

представляющий собой пересечение полей зрения  $m$  видеокамер. Далее полученный многоугольник разбивается на треугольники, суммарная площадь которых, рассчитанная по зависимости (7), дает искомую площадь перекрывающихся полей зрения из  $m$  видеокамер.

Таким образом, площадь пересекающихся полей зрения видеокамер и суммарная наблюдаемая площадь может быть найдена по известным площадям полей зрения отдельных модулей и их взаимному расположению (координаты видеокамер и углы азимута их главных оптических осей) на наблюдаемой территории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларкин, Е.В. Оптимизация размещения ТВ-камер по площади охраняемых объектов / Е.В. Ларкин, М.Е. Тюханов // Интеллектуальные и информационные системы: материалы Всероссийской научно-технической конференции «Интеллект-2009». - Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – С. 166 - 168.
2. Быков, Р.Е. Основы телевидения и видеотехники: учебник для вузов / Р.Е. Быков. – М.: Горячая линия - Телеком, 2006. – 399 с.
3. Тюханов, М.Е. Оценка площади наблюдаемой территории в распределенной видеосистеме / М.Е. Тюханов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.2 в 2-х ч. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 166 - 172.
4. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 832 с.

### **Горшков Алексей Анатольевич**

Академия ФСО России, г. Орел  
сотрудник  
Тел. 89536177004  
E-mail: gorsch@inbox.ru

### **Ларкин Евгений Васильевич**

Тульский государственный университет, г. Тула  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Робототехники и автоматизации производства»

---

A.A. GORSHKOV, E.V. LARKIN

## COMPUTATION OF OBSERVED SQUARE IN A MULTI-VIDEO-CAMERA SYSTEM

*The common dependence for computation of observed territory in a multi-video-camera control system is obtained. The method of video-cameras intersected vision fields square calculation is worked out.*

**Keywords:** video-camera, video-control, vision fields, intersection of squares.

## BIBLIOGRAPHY

1. Larkin, E.V. Optimizacija razmewenija TV-kamer po plowadi ohranjaemyh ob#ektov / E.V. Larkin, M.E. Tjuhanov // Intellektual'nye i informacionnye sistemy: materialy Vserossijskoj nauchno-tehni-cheskoj konferencii «Intellekt-2009». - Tula: Izd-vo TulGU, 2009. – S. 166 - 168.
2. Bykov, R.E. Osnovy televidenija i videotehniki: uchebnik dlja vuzov / R.E. Bykov. – М.: Gorjachaja linija - Telekom, 2006. – 399 s.
3. Tjuhanov, M.E. Ocenka plowadi nabljudaeмой territorii v raspredeleнной videosisteme / M.E. Tjuhanov // Izvestija TulGU. Tehniceskie nauki. Vyp.2 v 2-h ch. - Tula: Izd-vo TulGU, 2010. – Ch. 2. – S. 166 - 172.
4. Korn, G. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T. Korn. – М.: Nauka, 1978. – 832 s.

### **Gorshkov Aleksei Anatolievich**

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol  
officer  
Tel. 89536177004  
E-mail: [gorsch@inbox.ru](mailto:gorsch@inbox.ru)

### **Larkin Evgeny Vasilievich**

Tula state University, Krasnodar. Tula  
Doctor of technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Robotics and automation»

**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 3 до 7 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.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
  - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
  - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
  - не применять произвольные словообразования;
  - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

*Рисунок 1 – Текст подписи*

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте [www.gu-unprk.ru](http://www.gu-unprk.ru).

*Плата с аспирантов 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) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 43-48-90  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.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 Григорьева О.Ю.  
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 28.04.2012 г.

Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,3.

Тираж 600 экз.

Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.