

## 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.

## Редколлегия

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,  
55-05-81  
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, 2013

## Содержание

### Естественные науки

<i>Штиганович А.Н., Зацепин Е.П., Ищенко А.Е.</i> Обеспечение рациональных электрических и тепловых режимов электротеплических агрегатов организацией наилучшего алгоритма работы регулятора мощности.....	3
<i>Дозоров А.А., Манжосов В.К.</i> Синтез виброударной системы при периодической пульсирующей силе с ударами о преграды.....	8
<i>Карпов И.Г., Зырянов Ю.Т., Мельник О.В.</i> Модифицированное уравнение пирсона для распределений непрерывных случайных величин.....	16
<i>Елисеев С.В., Большаков Р.С.</i> К вопросу об обратных связях механических колебательных систем.....	24
<i>Шадрин И.Ф.</i> Жёсткие стержни на двумерной поверхности и аномальное энтропийное взаимодействие. Агрегаты (Кластеры).....	29

### Моделирование технологических процессов

<i>Лашко В.А., Бердник А.Н.</i> Физическое моделирование процессов в системах воздухообеспечения поршневых комбинированных двигателей.....	38
--	----

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Буйновос А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А.</i> Модель эксплуатационного износа сложной технической системы.....	52
<i>Кащеева П.В.</i> О проектировании диагональных газовых турбин ГТД.....	58

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Бабичев А.П., Эссоло Д., Коваль Н.С.</i> Разборка резьбовых соединений виброволновым методом в ходе ремонта и утилизации изделий машиностроения.....	62
<i>Жигалов Р.В., Гусев В.Г.</i> Влияние статической неуравновешенности инструмента на производительность плоского торцового шлифования.....	67
<i>Киричек А.В., Хасьянов У., Албагачиев А.Ю., Хасьянова Д.У.</i> Механическая обработка сплавов на основе Ti-Ni.....	72
<i>Кошин А.А., Дьяконов А.А.</i> Анализ механики микрорезания и дисперсной структуры металлополимеров....	83

### Инновации и кадры в машиностроении

<i>Пронюшкина Т.Г., Морозова А.В.</i> Конкурентоспособность как интегрирующий потенциал формирования организационной культуры инженера.....	89
---	----

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

<i>Родичева М.В., Абрамов А.В., Павловская А.А.</i> Мезомодели структуры капиллярно-пористых коллоидных полостей.....	93
<i>Кваскова Т.В., Проколова Е.В.</i> Влияние конфигурации формы функционально-декоративных элементов на технологическую однородность моделей и эффективность работы двухгольного оборудования	98

### Приборостроение и биотехнические системы

<i>Шкилько А.М., Компанецев И.В.</i> Факторы, ограничивающие чувствительность измерителя контактной разности потенциалов.....	103
<i>Богданов С.П., Басов О.О.</i> Управляемый режим работы автономных устройств резонансного контроля влажности материалов.....	108
<i>Куценко Д.О.</i> Исследование погрешности измерения вихрековым методом отношения «медь/не медь» в сверхпроводниках на основе соединения Nb <sub>3</sub> Sn за счет асимметрии слабопроводящей сердцевинки.....	114
<i>Васильев А.М., Слещев В.В.</i> Алгоритм адаптивного управления информационным потоком в распределенных информационно-измерительных системах гибких автоматизированных производств..	119

### Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Сычев С.Н., Гаврилина В.А., Пузырев С.Е., Подмастерьев К.В., Пахолкин Е.В.</i> Применение метода высокочастотной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) для исследования смазочных материалов. Часть 2. Хроматографические условия для анализа присадок и продуктов термо- и термоокислительной деструкции.....	126
<i>Шкатов П.Н., Елисов А.А.</i> Измерение глубины поверхностных трещин на сложнопольных участках электропотенциальным методом.....	133
<i>Горохов Д.Е., Гребенев С.В., Ивкин В.Б., Сергеенков В.Ю.</i> Аналитическая модель информационного поля контроля состояния сети связи.....	138
<i>Чернышов В.Н., Мишин В.В., Майоров М.В.</i> Экспериментальное исследование сигнала активного сопротивления подшипника в режиме сухого трения.....	145



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

**№ 1 (297) 2013**

January-February

# 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,  
55-05-81

www.gu-unpk.ru

E-mail: met\_lit@ostu.ru

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

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

© State University – ESPC, 2013

## Contents

### Natural science

<i>Shpigianovich A.H., Zatsepin E.P., Ishchenko A.E.</i> Providing rational electric and thermal modes of electrooven units with the organization of the best algorithm of operation of the regulator.....	3
<i>Dozorov A.A., Manzhosov V.K.</i> Synthesis of vibro-impact system under periodic fluctuating force with impacts about hard barriers.....	8
<i>Karpov I.G., Zyryanov YU.T., Melnik O.V.</i> The modified equation pearson for distributions of continuous random variables.....	16
<i>Eliseev S.V., Bolshakov R.S.</i> To the question about the feedbacks ties of mechanical oscillations systems..	24
<i>Shadrin I.F.</i> Rigid cores on the two-dimensional surface and abnormal entropy interaction. Units (Clusters)....	29

### Process modeling

<i>Lashko V.A., Berdnik A.N.</i> Physical modelling of processes in systemsairsupply of the piston combined engines.....	38
--	----

### Construction, calculation, material

<i>Bujnosov A.P., Pyshnyi I.M., Tikhonov V.A.</i> Model of operational deterioration of difficult technical system.....	52
<i>Kascheyeva P.V.</i> About design of diagonal gas turbines of turbofans.....	58

### Machine building technology and toolware

<i>Babichev A.P., Essola D., Koval N.S.</i> Disassembly of threaded connections using vibrowave method in the process of repairing and utilization of machine-building industries products.....	62
<i>Zhigalov R.V., Gusev V.G.</i> Influence of the tool static unbalance on a flat face grinding productivity.....	67
<i>Kirichek A.V., Khasyanov U., Albagachiev A.U., Khasyanova D.U.</i> Mechanical processing of alloys based on TI-NI.....	72
<i>Koshin A.A., Dyakonov A.A.</i> Analysis of mechanics of microcutting and disperse structure of metal-polymers.....	83

### Innovation and frame in machine building

<i>Pronyushkina T.G., Morozova A.V.</i> Competitiveness as an integrating potential formation of organizational culture engineer.....	89
---	----

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

<i>Rodicheva M.V., Abramov A.V., Pavlovskaya A.A.</i> Mesomodels of structure of capillary and porous colloidal cloths.....	93
<i>Kvaskova T.V., Prokopova E.V.</i> The influence of the configuration of the form of functional-decorative elements on technological uniformity of models and overall performance of the two-needle equipment..	98

### Instrument making and biotechnological system

<i>Shkilkov A.M., Kompaneets I.V.</i> Factors limiting sensitivity of contact potential difference meter.....	103
<i>Bogdanov S.P., Basov O.O.</i> Managed operation of resonance control autonomous devices of materials humidity.....	108
<i>Kutsenko D.O.</i> Study of errors in measuring by eddy current method of the ratio of the "CU/S" in superconductors on the basis of connection of NB3SN due to the asymmetry of weakly conducting core	114
<i>Vasil'ev A.M., Sleptsov V.V.</i> Algorithm of adaptive management of the information stream in the distributed information-measuring systems of the flexible automated manufactures.....	119

### Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Sychev S.N., Gavrulina V.A., Puzyrev S.E., Podmaster'ev K.V., Paholkin E.V.</i> Application by HPLC to investigate the lubricant. Part 2. Chromatographic condition for analysis of additives and products of thermal and oxidative degradation.....	126
<i>Shkatov P.N., Elisov A.A.</i> Measuring the depth of surface cracks on the figurine plots by electropotential method.....	133
<i>Gorokhov D.E., Grebenev S.V., Ivkin V.B., Sergeenkov V.Y.</i> Analytical model of the communication network condition control information field.....	138
<i>Chernyshov V.N., Mishin V.V., Mayorov M.V.</i> Experimental research of the signal bearing resistance in mode dry friction.....	145

The journal is on the List of the peer-reviewed journals and editions stated by the High Attestation Commission at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the publication of the main scientific results of the thesis for the academic degree.

## **ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

УДК 621.365.2:669.18

А.Н. ШПИГАНОВИЧ, Е.П. ЗАЦЕПИН, А.Е. ИЩЕНКО

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ АГРЕГАТОВ ОРГАНИЗАЦИЕЙ НАИЛУЧШЕГО АЛГОРИТМА РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ**

*В статье описан алгоритм работы регулятора мощности электропечных агрегатов, основанный на предварительном определении параметров плавки путем анализа системы дифференциальных уравнений теплового баланса с последующей их коррекцией во время работы агрегата под током посредством поддержания максимума коэффициента интенсивности нагрева металла. Приведено сравнение результатов математического моделирования работы агрегатов «печь-ковш» с регулятором мощности, реализующим предложенный алгоритм, с параметрами их работы, полученными в ходе промышленной эксплуатации.*

**Ключевые слова:** агрегат «печь-ковш», коэффициент мощности; тепловой баланс; система дифференциальных уравнений; коэффициент интенсивности нагрева; регулятор мощности.

Обеспечение рациональных электрических и тепловых режимов работы электропечных агрегатов (дуговая сталеплавильная печь (ДСП), агрегат «печь-ковш» (АПК)) представляет собой актуальную задачу, поскольку из-за большой единичной мощности и негативного влияния на системы электроснабжения их работа в нерациональном режиме приводит к значительным расходам на минимизацию этих явлений. Так, кроме ухудшения показателей качества электроэнергии, применение ДСП и АПК загружает питающую энергосистему реактивной мощностью, что приводит к повышенным потерям электроэнергии в ней и нерациональному режиму напряжения. Улучшение ситуации может быть достигнуто организацией такого режима работы агрегатов, при которых минимизация потребления реактивной мощности сочетается с сохранением или улучшением основных технологических характеристик (скорость нагрева металла; срок службы футеровки).

Наиболее низкий коэффициент мощности ДСП наблюдается на стадии рафинировки металла. У АПК это единственный режим работы, поэтому для них эта проблема является наиболее актуальной. Как правило, параметры режима работы АПК (ток и напряжение дуги; состав и толщина слоя рафинировочного шлака) определяются из опыта эксплуатации и в течение плавки поддерживаются равными усредненным эмпирическим значениям. Это не вполне корректно потому, что в ковше присутствует рафинировочный шлак, который по причине высокой основности и толщины, обладает сравнительно высокой электропроводностью, увеличивающейся с ростом температуры. Это приводит к тому, что часть тока электрода ответвляется в шлак, причем это явление выражается тем сильнее, чем дольше длится плавка. Таким образом, поддерживаемым постоянными току электрода и напряжению дуги не соответствует постоянное усвоение выделяемой в ковше мощности. Это делает необходимым по ходу плавки изменять уставки регулятора мощности с тем, чтобы постоянно поддерживать требуемый электрический и тепловой режим работы агрегата.

Одним из подходов к анализу режимов работы АПК с учетом указанных особенностей является описание теплового баланса агрегата с помощью системы дифференциальных уравнений. С учетом распределения тепловых потоков можно составить систему из двух дифференциальных уравнений, где первое уравнение будет описывать тепловое состояние металла, а второе – шлака:

$$\begin{cases} dQ_{\bar{A},i} + dQ_{i,\bar{O}\bar{A}\bar{r}\bar{e}} = k \cdot (dQ_M + dQ_{i,\bar{N}\bar{o}} + dQ_{i,\bar{A}i}); \\ dQ_{\bar{A},\bar{O}} + dQ_{\bar{O},\bar{D}\bar{a}\bar{c}} = k \cdot (dQ_{\bar{O}} + dQ_{i,\bar{O}\bar{A}\bar{r}\bar{e}} + dQ_{i,\bar{E}\bar{O}} + dQ_{i,\bar{A}} + dQ_{i,\bar{A}}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $dQ_{\bar{A},i}$  - дифференциал количества теплоты, выделяемого дугой в пределах металла;  $dQ_{i,\bar{O}\bar{A}\bar{r}\bar{e}}$  - дифференциал количества теплоты, предаваемого металлу шлаком;  $k$  – коэффициент

ент, определяющий долю теплоты, обусловленной электрическим нагревом, в общем количестве теплоты, получаемом металлом и шлаком (согласно [1] при рафинировке на электрический нагрев приходится около 50 % приходной части теплового баланса (остальное обусловлено химическими реакциями и теплотой, вносимой предварительно подогретыми шлакообразующими и присадками));  $dQ_M$  - дифференциал теплосодержания металла;  $dQ_{\bar{A},\theta}$  - дифференциал количества теплоты, выделяемого дугой в пределах шлака;  $dQ_{\theta, \text{Д} \bar{A} \bar{C}}$  - дифференциал количества теплоты, выделяемого в шлаке за счет резистивного нагрева;  $dQ_{\theta}$  - дифференциал теплосодержания шлака;  $dQ_{I, \bar{A}i}$ ,  $dQ_{I, \bar{N} \bar{o}}$ ,  $dQ_{I, \bar{E} \bar{o}}$  - дифференциалы потерь тепла конвекцией и излучением через днище, стенки, крышку ковша соответственно;  $dQ_{I, \bar{A}}$ ,  $dQ_{I, \bar{A}}$  - дифференциалы потерь тепла с отходящими газами и охлаждающей водой [1, 2].

Количества теплоты  $Q_i$ , из дифференциалов которых составлена данная система дифференциальных уравнений, являются функциями массы металла  $m_i$ ; толщины  $h_{\theta}$ , основности  $x$ , массы шлака  $m_{\theta}$ ; геометрических параметров агрегата; активной мощности, выделяемой в металле  $P_{\bar{A},i}$  и шлаке  $P_{\bar{A},\theta}$ ,  $P_{\theta, \text{Д} \bar{A} \bar{C}}$ ; тока электрода  $I_{\bar{Y}}$ ; температуры металла  $t_i$  и шлака  $t_{\theta}$ . Из всех величин, функциями которых являются  $Q_i$ , по ходу плавки постоянно изменяются только температуры металла и шлака, остальные же или сохраняются постоянными или, как активные мощности, выделяемые в металле и шлаке, зависят от  $t_i$  и  $t_{\theta}$ . Все это позволяет говорить о (1) как о системе из двух дифференциальных уравнений относительно функций  $t_i(\tau)$  и  $t_{\theta}(\tau)$  и их производных, где  $\tau$  - время плавки. Решение ее будет иметь вид:

$$\begin{cases} t_i = f(\tau, I_{\bar{Y}}, h_{\theta}, t_{0,i}, t_{0,\theta}); \\ t_{\theta} = f(\tau, I_{\bar{Y}}, h_{\theta}, t_{0,i}, t_{0,\theta}), \end{cases} \quad (2)$$

где  $t_{0,i}$ ,  $t_{0,\theta}$  - температуры металла и шлака к началу плавки.

Значения  $t_{0,i}$  и  $t_{0,\theta}$  определяются замерами, а подбором  $I_{\bar{Y}}$  и  $h_{\theta}$  можно достичь такого режима, при котором скорость нарастания  $t_i$  от  $t_{0,i}$  до требуемой величины  $t_{i, \text{д} \bar{A} \bar{A}}$  будет наибольшей. По найденному рациональному значению  $I_{\bar{Y}}$  легко определить напряжение дуги  $U_{\bar{A}}$ .

Однако при составлении дифференциальных уравнений теплового баланса вводятся допущения о постоянстве мощности потерь тепла, поскольку учет обратного приводит к значительному усложнению вычислений. Поэтому применение данного подхода возможно только для получения рациональных значений  $I_{\bar{Y}}$ ,  $U_{\bar{A}}$  и  $h_{\theta}$  на момент начала плавки, затем они должны корректироваться с определенной периодичностью.

Одним из показателей работы электропечных агрегатов, характеризующих оптимальное соотношение между мощностью дуги и усвоением ее энергии металлом, является коэффициент интенсивности нагрева  $k_{\bar{E},i}$ , равный произведению длины дуги на ее ток. Экспериментально установлено, что основной технологический показатель работы АПК – скорость нагрева металл – практически пропорционален  $k_{\bar{E},i}$ . Характер зависимости  $k_{\bar{E},i}$  от тока электрода является экстремальным, таким образом, максимуму этой величины будет соответствовать максимальная скорость нагрева металла. Для рассматриваемого случая  $k_{\bar{E},i}$  определяется как:

$$k_{\bar{E},i} = \frac{h_{\theta} \cdot \left[ \sqrt{U_C'^2 - (I_{\bar{Y}} X_{\Sigma})^2} - I_{\bar{Y}} R_{\Sigma} \right]}{R_{\theta, Y, \bar{O} \bar{A}}^2} \cdot \left[ I_{\bar{Y}} \cdot (R_{\theta, Y, \bar{O} \bar{A}} + h_{\theta} R_{\Sigma}) - h_{\theta} \sqrt{U_C'^2 - (I_{\bar{Y}} X_{\Sigma})^2} \right]^2, \quad (3)$$

где  $R_{\Sigma}$ ,  $X_{\Sigma}$  - активное и реактивное сопротивления печного контура;  $R_{\text{O.Y.OA}}$  - удельное сопротивление слоя шлака единичной толщины (например 1, см), определяемое согласно [3].

При расчете коэффициента интенсивности нагрева металла не принимаются во внимание потери тепла, упрощенный учет которых имеет место при составлении системы дифференциальных уравнений теплового баланса, поэтому поддержание максимума данного параметра можно взять за основу при корректировке в течение плавки тока электрода и напряжения дуги. Исходя из этого, может быть предложен следующий алгоритм работы регулятора мощности АПК:

- в вычислительное устройство (ВУ) постоянно введены данные, не зависящие от параметров плавки: зависимость сопротивления печного контура от тока электрода и степени трансформации  $\tilde{O}_{\Sigma} = f(U'_C; I_Y)$ ; коэффициент  $k_{R_{\text{O}}}$ , учитывающий форму ковша и толщину слоя шлака, предназначен для перевода удельного сопротивления шлака  $\rho_{\text{O}} (^{\circ}\text{t})$  в фактическое  $R_{\text{O.Y.OA}}$ ; не зависящее от тока электрода и степени трансформации активное сопротивление короткой сети  $R_{\text{E.N}}$ ; сумма падений напряжения в анодной и катодной областях дуги  $U_{\text{A-K}}$ ; массив данных, зависящих от степени напряжения печного трансформатора, в который входят величина активного сопротивления печного трансформатора  $R_{\text{Oo.i}}$ , усредненная скорость нагрева металла  $v_{\text{i.i}}$  и длительно допустимый ток короткой сети  $I_{\text{ait.i}}$ , равный номинальному току печного трансформатора;

- перед началом плавки вводятся величины, определяющие ее параметры: требуемая скорость нагрева металла  $v_{\text{i.oaaa}}$ ; основность шлака  $x$ ; температура металла  $^{\circ}t_{\text{i.oaaa}}$ , которую необходимо получить по окончании обработки; время  $\tau_{\text{iaa}}$ , через которое производится повторный замер температуры и толщины слоя шлака и начинается повторное определение максимума  $k_{\text{E.i}}$ ;

- производятся замеры температуры металла на выпуске из конвертора  $^{\circ}t_{\text{o.i}}$  и температуры вносимых шлакообразующих и присадок  $^{\circ}t_{\text{o.o}}$ ;

- для сокращения объема вычислений производится выбор двух ступеней регулирования напряжения, на которых достижима заданная скорость нагрева металла. Если такие ступени подобрать нельзя, задание считается некорректным;

- вводится значение минимальной по соображениям технологии толщины шлака  $h_{\text{o.o}}$  и  $\Delta h_{\text{o}}$  - степень ее приращения по мере циклических вычислений оптимального значения  $h_{\text{o}}$ , обе величины пересчитываются на массу шлака;

- для сокращения объема вычислений определяется минимальное значение тока электрода, участвующие в циклических расчетах по определению наименьшего времени плавки. Этой величине тока соответствует максимум коэффициента износа футеровки  $R_{\text{F}}$ . Такое определение  $I_{\text{Y.i.o}}$  объяснимо тем, что максимуму  $k_{\text{E.i}}$  соответствует нисходящий участок кривой  $R_{\text{F}}$ .

- для каждой из выбранных ступеней регулирования напряжения последовательным увеличением значения  $h_{\text{o}}$  и  $I_{\text{Y}}$  осуществляется расчет максимальной скорости нагрева до тех пор, пока значение  $(v_{\text{i.i}}; v_{\text{i.i+1}})$  из предыдущего расчетного цикла не станет превышать это значение из последующего;

- при расчете тока электрода  $(I_{\text{Y.i}}; I_{\text{Y.i+1}})$ , соответствующего максимуму скорости нагрева металла, его величина сравнивается с допустимой  $(I_{\text{ait.i}}; I_{\text{ait.i+1}})$  по соображениям термической стойкости печного трансформатора и короткой сети, т.к. на высоких ступенях трансформации это условие может не соблюдаться;

- после определения оптимальной для каждой ступени толщины шлака ( $h_{0.i}; h_{0.i+1}$ ), тока электрода ( $I_{Y.i}; I_{Y.i+1}$ ), и соответствующей им скорости нагрева металла, из двух выбирается наибольшая и соответствующая ей ступень регулирования напряжения, если это не противоречит перечисленным ранее ограничивающим факторам;

- в ковш вносится требуемое количество шлакообразующих;

- определяются величины коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ , при которых соблюдается выполнение условия  $k_1 \cdot U_{\bar{A}} - k_2 \cdot I_Y \rightarrow 0$  [4]. Эти коэффициенты наравне с током электрода и напряжением дуги, соответствующим максимуму  $k_{\dot{E}.i}$  задаются как уставка регулятору мощности;

- переключаящее устройство переводится на нужную ступень регулирования напряжения и начинается плавка;

- по истечении времени  $\tau_{\text{раб}}$  выдается команда на отключение печного выключателя и подъем электродов, т.к. горящие дуги вносят погрешности в работу измерительной аппаратуры. После этого проводится повторный замер температур металла и шлака, а также толщины шлака, которая могла измениться в результате химических реакций или вспенивания. Если  $t_i$  равна заданной, или превышает ее, и нет необходимости в проведении дальнейшей обработке металла, подается команда на окончание плавки. Если заданная температура не достигнута, то проводится расчет тока и напряжения дуги, соответствующих максимуму  $k_{\dot{E}.i}$ . При этом производится проверка не превышения этим током допустимой величины тока короткой сети или печного трансформатора на соответствующей ступени напряжения. Если превышение установлено, оператору предлагается на выбор продолжать плавку на заданных ранее параметрах или перейти на максимально допустимые их величины;

- определенные, исходя из максимума  $k_{\dot{E}.i}$ , ток и напряжение дуги задаются регулятору мощности как новая уставка, выдается команда на включение печного выключателя и опускание электродов;

- далее процесс плавки продолжается подобным образом, пока не будет достигнут оптимальный состав или заданная температура металла.

Как показало сравнение результатов математического моделирования режимов работы 330 т. АПК Конверторного цеха №2 ОАО «НЛМК» с эмпирическими данными, потребление активной электроэнергии при работе на 1-3 ступенях трансформации снизилось на 4,60%, реактивной – снизилось на 5,57%; скорость нагрева увеличилась на 5,12%, коэффициент мощности увеличился на 4,35%. Применение предложенного алгоритма работы регулятора мощности на более высоких ступенях трансформации невозможно для рассматриваемых агрегатов из-за того, что максимуму  $k_{\dot{E}.i}$  соответствуют токи электрода, превышающие допустимые значения для соответствующих ступеней трансформации. Однако предложенный режим работы будет более эффективным для высокоимпедансных ДСП и АПК, а также агрегатов с подобными параметрами короткой сети, имеющими более низкие ступени трансформации. При этом максимум  $k_{\dot{E}.i}$  смещается в сторону меньших значений токов электрода, соответственно возрастает число ступеней регулирования напряжения, где он не будет превышать максимально допустимого для них значения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский, Л.Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1981. – 320 с.
2. Смоляренко, В.Д. Энергетический баланс дуговых сталеплавильных печей [Текст] / В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов. – М.: Энергия, 1973. – 88 с.
3. Пирожников, В.Е. Автоматизация контроля и управления электросталеплавильными установками [Текст] / В.Е. Пирожников, А.Ф. Каблуковский. – М.: Металлургия, 1974. – 208 с.
4. Петров, Г.А. Теория сварочных процессов / Г.А. Петров, А.С. Тумарев. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.

**Шпиганович Александр Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»  
д-р техн. наук, профессор, кафедра электрооборудования  
398600, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д.30  
т. 32-80-48  
E-mail: kaf-eo@stu.lipetsk.ru

**Зацепин Евгений Петрович**

ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»  
канд. техн. наук, доцент, кафедра электрооборудования  
398600, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д.30  
т. 8-906-687-96-17  
E-mail: ezats@mail.ru

**Ищенко Андрей Евгеньевич**

ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»  
аспирант кафедры электрооборудования  
398042, Россия, г. Липецк, ул. Космонавтов, д.36/4, кв. 23  
т. 34-50-15  
E-mail: iek@lipetsk.ru

A.N. SHPIGANOVICH, E.P. ZATSEPIN, A.E. ISHCENKO

**PROVIDING RATIONAL ELECTRIC AND THERMAL MODES OF  
ELECTROOVEN UNITS WITH THE ORGANIZATION OF THE BEST  
ALGORITHM OF OPERATION OF THE REGULATOR OF POWER**

*In article the algorithm of operation of the regulator of power of the electrooven units, based on preliminary determination of parameters of melting by the analysis of system of the differential equations of thermal balance with the subsequent their correction is described during operation of the unit alive by means of maintenance of a maximum of coefficient of intensity of heating of metal. Comparison of results of mathematical modeling of operation of furnace ladle units with the regulator of the power realizing offered algorithm, with the parameters of their work received during commercial operation is given.*

**Keywords:** furnace ladle unit, power factor; thermal balance; system of the differential equations; coefficient of intensity of heating; power regulator.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Nikol'skij, L.E. Teplovaja rabota dugovyh staleplavil'nyh pechej / L.E. Nikol'skij, V.D. Smolja-renko, L.N. Kuznecov. – M.: Metallurgija, 1981. – 320 s.
2. Smoljarenko, V.D. Jenergeticheskij balans dugovyh staleplavil'nyh pechej [Tekst] / V.D. Smoljarenko, L.N. Kuznecov. – M.: Jenergija, 1973. – 88 s.
3. Pirozhnikov, V.E. Avtomatizacija kontrolja i upravlenija jelektrostaleplavil'nymi ustanovkami [Tekst] / V.E. Pirozhnikov, A.F. Kablukovskij. – M.: Metallurgija, 1974. – 208 s.
4. Petrov, G.A. Teorija svarochnyh processov / G.A. Petrov, A.S. Tumarev. – M.: Vysshaja shkola, 1977. – 392 s.

**Shpiganovich Alexander Nikolaevich**

FGBOU VPO "Lipetsk State Technical University"  
Dr.Sci.Tech., professor, electric equipment chair  
398600, Russia, Lipetsk, Moskovskaya St., 30,  
t. 32-80-48  
E-mail: kaf-eo@stu.lipetsk.ru

**Zatsepin Evgeny Petrovitch**

FGBOU VPO "Lipetsk State Technical University"  
Cand.Tech.Sci., associate professor, electric equipment chair  
398600, Russia, Lipetsk, Moskovskaya St., 30,  
t. 8-906-687-96-17  
E-mail: ezats@mail.ru

**Ishchenko Andrey Evgenyevich**

FGBOU VPO "Lipetsk State Technical University"  
graduate student of chair of electric equipment  
398042, Russia, Lipetsk, Kosmonavtov St., 36/4, quarter 23,  
t. 34-50-15  
E-mail: iek@lipetsk.ru

А.А. ДОЗОРОВ, В.К. МАНЖОСОВ

## СИНТЕЗ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ СИЛЕ С УДАРАМИ О ПРЕГРАДЫ

Рассмотрена виброударная система, представленная в виде движущегося между двумя преградами ударника, на который действуют периодическая пульсирующая сила и сила упруго сжимаемой пружины. Математическая модель описывает движение ударной массы с учетом условий периодичности и условий соударения о жесткие ограничители. Получены расчетные зависимости, устанавливающие определенные соотношения между параметрами системы, обеспечивающие заданный режим движения. Для моделирования движения ударной системы разработан программный продукт, обеспечивающий численное решение дифференциальных уравнений движения с учетом условий периодичности и условий соударения, графическое и числовое воспроизведение параметров движения в процессе моделирования. Результаты моделирования показали, что реализация вычисленных характеристик цикла, обеспечивает заданный периодический режим движения

**Ключевые слова:** синтез виброударной системы, периодический удар, модель удара, ударная система, движение с ударами о преграды, периодический режим движения, моделирование

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Использование удара широко применяется в технических системах, связанных с деформированием или разрушением технологической среды [1]. Реализация периодического удара осуществляется с использованием ударных машин [2, 3, 4, 7]. При их создании возникает необходимость построения рациональных законов движения ударной массы [2, 5].

С целью формирования концепции рационального рабочего процесса исследователи обращаются к наиболее общей динамической схеме изучаемых систем, представляя ее в виде поступательно движущегося тела массой  $m$ , на которое действует некоторое переменное во времени возмущение  $P(t)$ , а также ограничителя, моделирующего свойства технологической среды.

На режим движения ударной массы оказывает влияние множество факторов, к числу которых можно отнести силы, разгоняющие массу для нанесения удара и отводящие ее в исходное состояние, заданный период между ударами, время переключения сил, восстановление скорости ударника и другие [6]. Определение параметров системы, обеспечивающих устойчивый режим движения ударника и периодические удары с заданной скоростью по правому ограничителю (технологической среде) при периодическом силовом воздействии является актуальной задачей создания виброударных технологических систем.

В данной работе рассмотрена модель виброударной системы (рис. 1), представленной в виде движущегося вдоль оси  $x$  тела массой  $m$ , на которое действуют периодическая пульсирующая сила  $P(t)$  и усилие пружины жесткостью  $c$ , назначение которой связано с необходимостью возврата ударника в исходное состояние для нанесения последующих ударов. Полагаем, что  $x$  – координата центра масс ударника,  $\dot{x}$  – скорость ударника,  $t$  – время,  $t_1$  – длительность действия силы  $P_1$ ,  $T$  – период.

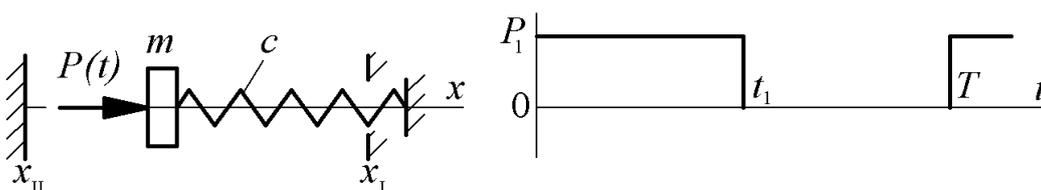


Рисунок 1 – Схема ударной системы с упругим элементом и ограничителями

При движении ударника массой  $m$  вдоль оси  $x$  происходит его столкновение с ограничителями (левым и правым), положение которых определяется координатами  $x_I$  и  $x_{II}$ . Задача

виброударной системы – обеспечить периодические удары с заданной скоростью по правому ограничителю, моделирующему свойства технологической среды.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ**

Периодический режим движения ударной системы, который необходимо реализовать, качественно представлен на рисунке 2.

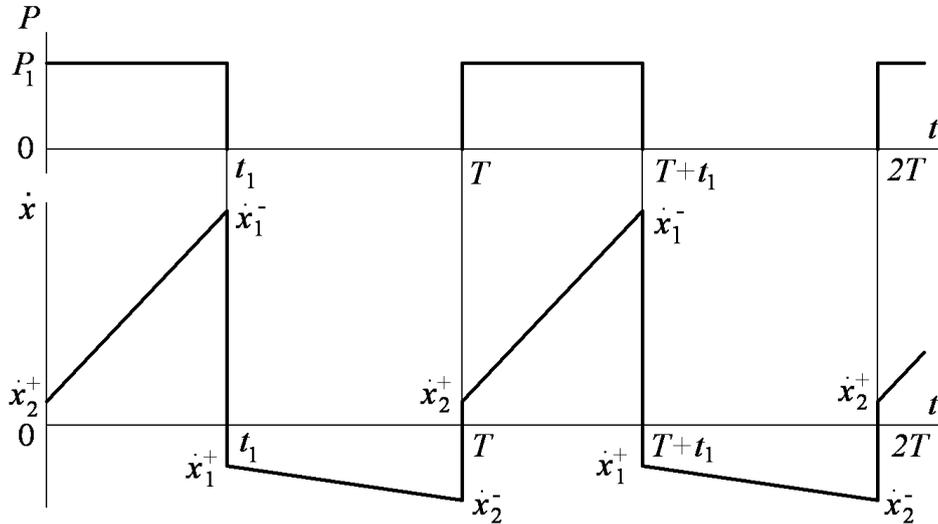


Рисунок 2 – Качественная диаграмма периодического режима движения ударной массы

В момент начала действия силы  $P_1$  ударник находится у левого ограничителя ( $x = x_{II}$ ) и скорость ударника равна  $\dot{x}_2^+$ . Под действием силы  $P_1$  ударник, преодолевая силу упруго сжимаемой пружины, перемещается в направлении правого ограничителя. При  $t = t_1$  ударник достигает правого ограничителя ( $x = x_I$ ) и наносит удар со скоростью  $\dot{x}_1^-$ .

Полагаем, что удар мгновенный и скорость ударника после нанесения удара принимает значение  $\dot{x}_1^+ = -k_1 \dot{x}_1^-$  (где  $k_1$  – коэффициент восстановления скорости при ударе о правый ограничитель).

На интервале  $t_1 \leq t \leq T$  сила  $P_1 = 0$  и ударник перемещается к левому ограничителю под действием силы упруго сжатой пружины. В момент времени  $t = T$  ударник достигнет левого ограничителя ( $x = x_{II}$ ), имея перед столкновением с ним скорость  $\dot{x}_2^-$ .

При столкновении с левым ограничителем ( $t = T$ ) скорость ударника принимает значение  $\dot{x}_2^+ = -k_2 \dot{x}_2^-$  (где  $k_2$  – коэффициент восстановления скорости при ударе о левый ограничитель). В этот момент на ударник вновь начинает действовать сила  $P_1$ . Далее процесс движения повторяется.

Движение ударной массы с учетом условий периодичности и условий соударения о жесткие ограничители описывается уравнениями:

$$m\ddot{x} = \begin{cases} P(t) - c(\Delta + x), & \text{если } (i-1)T \leq t < (i-1)T + t_1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \\ -c(\Delta + x), & \text{если } (i-1)T + t_1 \leq t < i \cdot T, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \end{cases} \quad (1)$$

$$P(t) = P_1, \quad \Delta = \Delta_0 - x_{II}, \quad (2)$$

$$x = x_{II}, \quad \dot{x} = \dot{x}_2^+, \quad \text{если } t \in [(i-1)T, i = 1, 2, 3, \dots], \quad (3)$$

$$x = x_I, \quad \dot{x} = \dot{x}_1^-, \quad \text{если } \dot{x}_1^- > 0, \quad t \in [(i-1)T + t_1, i = 1, 2, 3, \dots], \quad (4)$$

$$x = x_I, \quad \dot{x} = \dot{x}_1^+ = -k_1 \dot{x}_1^-, \quad \text{если } \dot{x}_1^- > 0, \quad t \in [(i-1)T + t_1, i = 1, 2, 3, \dots], \quad (5)$$

$$x = x_{II}, \dot{x} = \dot{x}_2^-, \text{ если } \dot{x}_2^- < 0, t \in [i \cdot T, i = 1, 2, 3, \dots], \quad (6)$$

$$x = x_{II}, \dot{x} = \dot{x}_2^+ = -k_2 \dot{x}_2^-, \text{ если } \dot{x}_2^- < 0, t \in [i \cdot T, i = 1, 2, 3, \dots], \quad (7)$$

где  $i$  – номер цикла,

$\Delta$  – максимальная осадка пружины,

$\Delta_0$  – осадка пружины при расположении ударной массы у левого ограничителя.

### ПАРАМЕТРЫ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАНЕСЕНИИ УДАРА ПО ОГРАНИЧИТЕЛЯМ В МОМЕНТЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛЫ

Преобразуем уравнение (1) к виду

$$\ddot{x} + \omega^2 x = \begin{cases} P_1 / m - \omega^2 \Delta, & \text{если } (i-1)T \leq t < (i-1)T + t_1, i = 1, 2, 3, \dots, \\ -\omega^2 \Delta, & \text{если } (i-1)T + t_1 \leq t < i \cdot T, i = 1, 2, 3, \dots, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\omega = \sqrt{c/m}$  – круговая частота.

Так как движение ударной массы периодическое и повторяется на каждом цикле, достаточно рассмотреть это движение на первом цикле, когда  $i = 1$ .

Решение уравнения

$$\ddot{x} + \omega^2 x = P_1 / m - \omega^2 \Delta, \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (9)$$

на интервале  $0 \leq t \leq t_1$  имеет вид

$$x = (x_{II} + \Delta - P_1 / \omega^2 m) \cos \omega t + (\dot{x}_2^+ / \omega) \sin \omega t + P_1 / \omega^2 m - \Delta, \quad (10)$$

$$\dot{x} = -\omega((x_{II} + \Delta - P_1 / \omega^2 m)) \sin \omega t + \dot{x}_2^+ \cos \omega t, \quad (11)$$

При  $t = t_1$  ударник достигнет правого ограничителя. При этом

$$x|_{t=t_1} = x_1, \quad x_1 = (x_{II} + \Delta - P_1 / \omega^2 m) \cos \omega t_1 + (\dot{x}_2^+ / \omega) \sin \omega t_1 + P_1 / \omega^2 m - \Delta, \quad (12)$$

$$\dot{x}|_{t=t_1} = \dot{x}_1^-, \quad \dot{x}_1^- = -\omega(x_{II} + \Delta - P_1 / \omega^2 m) \sin \omega t_1 + \dot{x}_2^+ \cos \omega t_1. \quad (13)$$

Из (13) следует, что

$$\sin \omega t_1 = -\dot{x}_1^- / \omega C_1 + C_2 \cos \omega t_1 / C_1, \quad C_1 = (x_{II} + \Delta - P_1 / \omega^2 m), \quad C_2 = \dot{x}_2^+ / \omega. \quad (14)$$

Учитывая (14) в (12), получим

$$x_1 - x_{II} + C_1 + C_2 \dot{x}_1^- / \omega C_1 = \cos \omega t_1 \cdot (C_1^2 + C_2^2) / C_1,$$

откуда

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{1 + (x_1 - x_{II}) / C_1 + C_2 \dot{x}_1^- / (C_1^2 \omega)}{1 + (C_2 / C_1)^2}. \quad (15)$$

Из теоремы об изменении кинетической энергии механической системы при движении ударной массы от левого ограничителя к правому ограничителю следует, что

$$\frac{1}{2} m [(\dot{x}_1^-)^2 - (\dot{x}_2^+)^2] = P_1(x_1 - x_{II}) - c \Delta_0(x_1 - x_{II}) - \frac{1}{2} c(x_1 - x_{II})^2,$$

откуда

$$(\dot{x}_1^-)^2 - (\dot{x}_2^+)^2 = 2A_p(x_1 - x_{II}) - 2\omega^2 \Delta_0(x_1 - x_{II}) - \omega^2(x_1 - x_{II})^2, \quad A_p = P_1 / m, \quad (16)$$

$$\omega^2 = \frac{2A_p(x_1 - x_{II}) + (\dot{x}_2^+)^2 - (\dot{x}_1^-)^2}{2\Delta_0(x_1 - x_{II}) + (x_1 - x_{II})^2}. \quad (17)$$

Рассматриваем режим движения, когда ударная масса под действием силы  $P_1$  разгоняется для нанесения удара по правому ограничителю, т. е.  $\dot{x}_1^- > \dot{x}_2^+$ .

Так как левая часть равенства (17) положительна, то положительна и правая часть:

$$\frac{2A_p(x_1 - x_{II}) + (\dot{x}_2^+)^2 - (\dot{x}_1^-)^2}{2\Delta_0(x_1 - x_{II}) + (x_1 - x_{II})^2} > 0. \quad (18)$$

Учитывая, что  $(x_1 - x_{II}) > 0$ , находим, что знаменатель в неравенстве (18)

$$2\Delta_0(x_1 - x_{II}) + (x_1 - x_{II})^2 > 0,$$

а, следовательно, и числитель должен удовлетворять неравенству

$$2A_p(x_1 - x_{II}) + (\dot{x}_2^+)^2 - (\dot{x}_1^-)^2 > 0. \quad (19)$$

Рассмотрим теперь интервал движения  $t_1 \leq t \leq T$ , когда сила  $P_1 = 0$ . Решение уравнения

$$\ddot{x} + \omega^2 x = -\omega^2 \cdot \Delta, \quad 0 \leq t - t_1 \leq T - t_1$$

имеет вид

$$x = D_1 \cos \omega \tau + D_2 \sin \omega \tau - \Delta, \quad \tau = t - t_1, \quad 0 \leq \tau \leq T - t_1, \quad (20)$$

$$\dot{x} = -\omega D_1 \sin \omega \tau + \omega D_2 \cos \omega \tau, \quad 0 \leq \tau \leq T - t_1, \quad (21)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий:

$$x|_{\tau=0} = x_1, \quad \dot{x}|_{\tau=0} = \dot{x}_1^+. \quad (22)$$

При  $\tau = 0$  из (20) и (21) следует:

$$x_1 = D_1 - \Delta, \quad D_1 = x_1 + \Delta, \quad (23)$$

$$\dot{x}_1^+ = \omega D_2, \quad D_2 = \dot{x}_1^+ / \omega. \quad (24)$$

При  $\tau = T - t_1 = t_2$  ударная масса достигнет левой преграды ( $x|_{\tau=t_2} = x_{II}$ ,  $\dot{x}|_{\tau=t_2} = \dot{x}_2^-$ ). Ее координата и скорость из (20) и (21) при этом будут равны

$$x_{II} = D_1 \cos \omega t_2 + D_2 \sin \omega t_2 - \Delta, \quad (25)$$

$$\dot{x}_2^- = -\omega D_1 \sin \omega t_2 + \omega D_2 \cos \omega t_2. \quad (26)$$

Из (26) следует, что

$$\sin \omega t_2 = \frac{D_2}{D_1} \cos \omega t_2 - \frac{\dot{x}_2^-}{\omega D_1}.$$

Учитываем данное равенство в (25):

$$x_{II} + \Delta = D_1 \cos \omega t_2 + \frac{D_2^2}{D_1} \cos \omega t_2 - \frac{\dot{x}_2^- D_2}{\omega D_1},$$

откуда следует, что

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{(x_{II} + \Delta) / D_1 + D_2 \frac{\dot{x}_2^-}{\omega D_1}}{1 + D_2^2 / D_1^2}. \quad (27)$$

Из теоремы об изменении кинетической энергии механической системы при движении ударной массы от правого ограничителя к левому ограничителю следует, что

$$\frac{1}{2} m [(\dot{x}_2^-)^2 - (\dot{x}_1^+)^2] = c \Delta_0 (x_1 - x_{II}) + \frac{1}{2} c (x_1 - x_{II})^2,$$

откуда

$$\dot{x}_2^- = -\sqrt{2\omega^2 \Delta_0 (x_1 - x_{II}) + \omega^2 (x_1 - x_{II})^2 + (\dot{x}_1^+)^2}. \quad (28)$$

К параметрам виброударной системы, определяющим ее движение, относятся следующие: сила  $P_1$ , разгоняющая ударную массу при движении ее от левого ограничителя к правому; масса ударника  $m$ ; жесткость пружины  $c$ ; круговая частота  $\omega$ ; скорость нанесения удара  $\dot{x}_1^-$  по правому ограничителю;  $k_1$  – коэффициент восстановления скорости при ударе о правый ограничитель; скорость ударной массы  $\dot{x}_1^+$  после нанесения удара по правому ограничителю; скорость нанесения удара  $\dot{x}_2^-$  по левому ограничителю (в конце цикла движения);  $k_2$  – коэффициент восстановления скорости при ударе о левый ограничитель; скорость удар-

ной массы  $\dot{x}_2^+$  после нанесения удара по левому ограничителю (в начале цикла движения); координата левого ограничителя  $x_{II}$ ; координата правого ограничителя  $x_I$ ;  $\Delta$  – осадка пружины при перемещении ударной массы от левого ограничителя до правого ограничителя;  $\Delta_0$  – предварительная осадка пружины при расположении ударной массы у левого ограничителя; ускорение ударной массы  $A_p$  от действия силы  $P_1$ ; время  $t_1$ , определяющее длительность действия силы  $P_1$  и соответствующее времени перемещения ударника от левого ограничителя к правому ограничителю; время  $t_2$ , определяющее время перемещения ударника от правого ограничителя к левому ограничителю; период цикла  $T$ .

Расчетные зависимости (10) ÷ (28) устанавливают такие соотношения между этими параметрами, которые обеспечивают заданный режим движения ударника. Так как число независимых выражений меньше числа параметров системы, определенная часть параметров системы должна быть задана.

### ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1. *Заданы* жесткость пружины  $c$ , масса ударника  $m$ , скорость нанесения удара по правому ограничителю  $\dot{x}_1^-$ , коэффициент восстановления скорости при ударе о правый ограничитель  $k_1$ , коэффициент восстановления скорости при ударе о левый ограничитель  $k_2$ , координата правого ограничителя  $x_I$ , координата левого ограничителя  $x_{II}$ , предварительная осадка пружины при расположении ударной массы у левого ограничителя  $\Delta_0$ .

*Определить* круговую частоту  $\omega$ , силу  $P_1$ , осадку пружины при перемещении ударной массы от левого ограничителя до правого ограничителя  $\Delta$ , скорость нанесения удара по левому ограничителю  $\dot{x}_2^-$ , скорость ударной массы в начале цикла движения  $\dot{x}_2^+$ , время  $t_1$ , период цикла  $T$ .

Пусть  $c = 1000$  Н/м,  $m = 1$  кг,  $\dot{x}_1^- = 4,8$  м/с,  $k_1 = 0,2$ ,  $k_2 = 0,02$ ,  $x_I = 0$ ,  $x_{II} = -0,03$  м,  $\Delta_0 = 0$ .

Определим параметры виброударной системы:

– круговая частота  $\omega = \sqrt{c/m} = \sqrt{1000} = 31,62$  с<sup>-1</sup>;

– осадка пружины при перемещении ударной массы от левого ограничителя до правого ограничителя  $\Delta = \Delta_0 - x_{II} = 0 - (-0,03) = 0,03$  м;

– скорость ударной массы после нанесения удара по правому ограничителю

$$\dot{x}_1^+ = -k_1 \dot{x}_1^- = -0,2 \cdot 4,8 = 0,96 \text{ м/с};$$

– скорость нанесения удара по левому ограничителю

$$\dot{x}_2^- = -\sqrt{2\omega^2 \Delta_0 (x_I - x_{II}) + \omega^2 (x_I - x_{II})^2 + (\dot{x}_1^+)^2} = -\sqrt{1000(0,03)^2 + 0,96^2} = -1,35 \text{ м/с};$$

– скорость ударной массы в начале цикла движения

$$\dot{x}_2^+ = -k_2 \dot{x}_2^- = -0,02 \cdot (-1,35) = 0,027 \text{ м/с};$$

– ускорение ударной массы  $A_p$  от действия силы  $P_1$

$$A_p = \frac{\omega^2 [2\Delta_0 (x_I - x_{II}) + (x_I - x_{II})^2] - (\dot{x}_2^+)^2 + (\dot{x}_1^-)^2}{2(x_I - x_{II})} = \frac{1000 \cdot 0,03^2 - (0,027)^2 + (4,8)^2}{2 \cdot 0,03} = 400 \text{ м/с}^2;$$

– сила  $P_1 = A_p \cdot m = 400 \cdot 1 = 400$  Н;

$$C_1 = x_{II} + \Delta - P_1 / \omega^2 m = -0,4 \text{ м}; \quad C_2 = \dot{x}_2^+ / \omega = 0,00085 \text{ м};$$

– длительность действия силы  $P_1$

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{C_1(x_1 - x_{II}) + C_1^2 + C_2 \dot{x}_1^- / \omega}{(C_1^2 + C_2^2)} = \frac{1}{31,62} \arccos \frac{-0,012 + 0,16 + 0,0001}{0,16} = 0,0123 \text{ с};$$

$$D_1 = x_1 + \Delta = 0,03 \text{ м}; \quad D_2 = \dot{x}_1^+ / \omega = -0,0303 \text{ м};$$

– длительность возврата ударника от правой преграды к левой преграде

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{D_1(x_{II} + \Delta) + D_2 \frac{\dot{x}_2^-}{\omega}}{D_1^2 + D_2^2} = \frac{1}{31,62} \arccos \frac{0,03(-0,03 + 0,03) + \frac{0,0303 \cdot 1,35}{31,62}}{(0,03^2 + 0,0303^2)} = 0,025 \text{ с};$$

– период цикла

$$T = t_1 + t_2 = 0,0123 + 0,025 \approx 0,0375 \text{ с}.$$

Для моделирования движения ударной системы разработан программный продукт, обеспечивающий численное решение дифференциальных уравнений (1) с учетом условий периодичности (3), (6) и условий соударения (5), (7); графическое и числовое воспроизведение параметров движения в процессе моделирования.

Общий вид интерфейса программного продукта для моделирования процесса движения виброударной системы с двумя ограничителями при периодической пульсирующей силе представлен на рисунок 3.

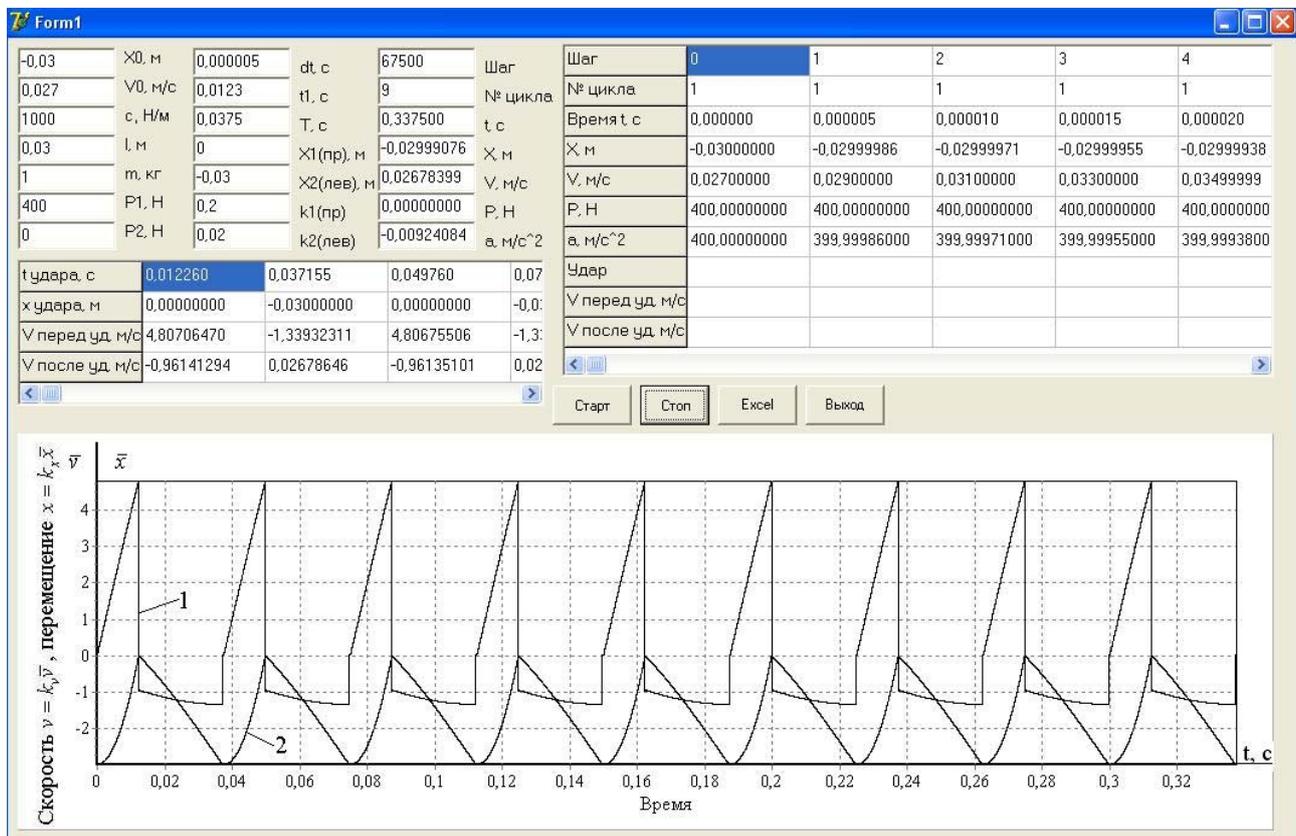


Рисунок 3 – Общий вид интерфейса программного продукта

1 – диаграмма скорости  $v$  ударной массы при  $k_v = 1$  м/с; 2 – диаграмма перемещения ударной массы  $x$  при  $k_x = 0,01$  м

При моделировании виброударной системы в качестве исходных приняты параметры системы, рассчитанные по изложенной выше методике ( $c = 1000$  Н/м;  $m = 1$  кг;  $P_1 = 400$  Н;  $k_1 = 0,2$ ;  $k_2 = 0,02$ ;  $x_1 = 0$ ;  $x_{II} = -0,03$  м;  $\Delta = 0,03$  м;  $t_1 = 0,0123$  с;  $T = 0,0375$  с).

После остановки процедуры расчета отображается диаграмма перемещения и скорости объекта. По оси абсцисс откладывается расчетное время  $t$ , с. Значение скорости и перемещения объекта определяется как

$$v = k_v \cdot \bar{v}, \quad x = k_x \cdot \bar{x},$$

где  $k_v$  – коэффициент, определяющий масштаб диаграммы скорости ( $k_v = 1$  м/с);

$\bar{v}$  – числовое значение скорости на оси ординат;

$k_x$  – коэффициент, определяющий масштаб диаграммы перемещения ( $k_x = 0,01$  м);

$\bar{x}$  – числовое значение перемещения на оси ординат.

Результаты моделирования показали, что реализация вычисленных характеристик цикла, обеспечивает периодический режим движения с заданной скоростью удара о правый ограничитель.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрена виброударная система в виде движущегося вдоль оси  $x$  тела массой  $m$ , на которое действуют периодическая пульсирующая сила и сила упруго сжимаемой пружины. Представлена математическая модель, описывающая движение ударной массы с учетом условий периодичности и условий соударения о жесткие ограничители.

Получены расчетные зависимости, устанавливающие определенные соотношения между параметрами системы, обеспечивающие заданный режим движения.

Определены параметры системы, обеспечивающие периодические удары с заданной скоростью по правому ограничителю и реализующие требуемый закон движения ударника.

Результаты моделирования показали, что реализация вычисленных характеристик цикла, обеспечивает заданный периодический режим движения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов, О.Д. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремянц. – М.: Наука, 1985. – 354 с.
2. Алимов, О.Д. Гидравлические виброударные системы / О.Д. Алимов, С.А. Басов. – М.: Наука, 1990. – 352 с.
3. Ешуткин, Д.Н. Гидравлические ручные машины ударного действия / Д.Н. Ешуткин, А.В. Журавлева, А.И. Абдурашитов. – Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2011. – 137 с..
4. Крупенин, В.Л. Ударные и виброударные машины и устройства / В.Л. Крупенин // Вестник научно-технического развития, № 4 (20), 2009. – С. 3 – 32.
5. Манжосов, В.К. Динамика и синтез кулачковых ударных механизмов / В.К. Манжосов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 218 с.
6. Манжосов, В.К. Моделирование режимов движения ударной системы при периодическом силовом воздействии / В.К. Манжосов, Д.А. Новиков // Известия Саратовского университета. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2010, Т. 10, вып. 4. – С. 65 – 71.
7. Ушаков, Л.С. Гидравлические машины ударного действия / Л.С. Ушаков, Ю.Е. Котылев, В.А. Кравченко. – М.: Машиностроение, 2000. – 416 с.

### Дозоров Алексей Александрович

ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск  
аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, УлГТУ  
Тел.: (8422) 778-264  
E-mail: tpm@ulstu.ru, a.dozorov@bk.ru

### Манжосов Владимир Кузьмич

ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»  
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, УлГТУ  
Тел.: (8422) 778-264; 43-13-17  
E-mail: tpm@ulstu.ru, v.manjosov@ulstu.ru

A.A. DOZOROV, V.K. MANZHOSOV

## SYNTHESIS OF VIBRO-IMPACT SYSTEM UNDER PERIODIC FLUCTUATING FORCE WITH IMPACTS ABOUT HARD BARRIERS

*We have examined a vibro-impact system represented as a hammer moving between two barriers and influenced by the periodic fluctuating force and the force of cushioning spring. The mathematical model describes the movement of the impact mass taking into account conditions of periodicity and collision about uncushioned stoppers. We have obtained a rated dependency which defines a correlation between system's parameters and assures the desired motion mode. In order to model the shock system we have developed a software product providing a computational solution for differential equations of a subject motion taking into account conditions of periodicity and collision, graphical and numerical reproduction of motion parameters in the process of modeling. The modeling results have shown that implementation of the calculated cycle characteristics assures the desired periodic motion mode.*

**Keywords:** *synthesis of vibro-impact system, periodic impact, model of the impact, shock system, motion with impacts about barriers, periodic motion mode, modeling*

### BIBLIOGRAPHY

1. Alimov, O.D. Udar. Rasprostranenie voln deformacij v udarnyh sistemah / O.D. Alimov, V.K. Manzhosov, V.Je. Erem'janc. – M.: Nauka, 1985. – 354 s.
2. Alimov, O.D. Gidravlicheskie vibroudarnye sistemy / O.D. Alimov, S.A. Basov. – M.: Nauka, 1990. – 352 s.
3. Eshutkin, D.N. Gidravlicheskie ruchnye mashiny udarnogo dejstvija / D.N. Eshutkin, A.V. Zhuravleva, A.I. Abdurashitov. – Orel: FGOU VPO «Gosuniversitet – UNPK», 2011. – 137 s..
4. Krupenin, V.L. Udarnye i vibroudarnye mashiny i ustrojstva / V.L. Krupenin // Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitija, № 4 (20), 2009. – S. 3 – 32.
5. Manzhosov, V.K. Dinamika i sintez kulachkovykh udarnyh mehanizmov / V.K. Manzhosov. – Ul'janovsk: UIGTU, 2006. – 218 s.
6. Manzhosov, V.K. Modelirovanie rezhimov dvizhenija udarnoj sistemy pri periodicheskom silovom vozdejstvii / V.K. Manzhosov, D.A. Novikov // Izvestija Saratovskogo universiteta. Serija Matematika. Mehanika. Informatika. – 2010, T. 10, vyp. 4. – S. 65 – 71.
7. Ushakov, L.S. Gidravlicheskie mashiny udarnogo dejstvija / L.S. Ushakov, Ju.E. Kotylev, V.A. Kravchenko. – M.: Mashinostroenie, 2000. – 416 s.

#### **Dozorov Alexey Alexandrovich**

FGBOU VPO Ulyanovsk state technical University, Ulyanovsk  
post-graduate student of the Department «Theoretical and applied mechanics»  
Russia, 432027, str. Ulyanovsk, ul. The Northern Crown, 32, ULGTU  
Tel.: (8422) 778-264  
E-mail: tpm@ulstu.ru, a.dozorov@bk.ru

#### **Manzhosov Vladimir Kuzmich**

FGBOU VPO "Ulyanovsk State Technical University", Ulyanovsk  
Doctor of Engineering, professor, head of the department "Theoretical and applied mechanics"  
Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venets St., 32, ULGTU  
Tel.: (8422) 778-264; 43-13-17  
E-mail: tpm@ulstu.ru, v.manjosov@ulstu.ru

## МОДИФИЦИРОВАННОЕ УРАВНЕНИЕ ПИРСОНА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НЕПРЕРЫВНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

*Предложено модифицированное уравнение Пирсона, которое позволяет получить более широкий класс распределений случайных величин, чем классическая система распределений Пирсона.*

**Ключевые слова:** распределение Пирсона, модифицированное уравнение Пирсона, аппроксимация законов распределения экспериментальных данных, прямые степенные моменты, обратные степенные моменты, логарифмические моменты.

Известно [1,2], что большой класс непрерывных плотностей распределения вероятностей (ПРВ)  $p(x)$ , называемый системой распределений Пирсона, удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{d p(x)}{d x} = \frac{a_1 x + a_0}{b_2 x^2 + b_1 x + b_0} p(x), \quad (1)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – постоянные параметры распределения.

В зависимости от значений отдельных параметров в качестве решения уравнения (1) получают 12 типов кривых. Эти кривые также используют для аппроксимации экспериментальных односторонних распределений. Однако в настоящее время система плотностей вероятностей, введенная К. Пирсоном еще в 1894 году, является до некоторой степени устаревшей [2]. Это обусловлено в первую очередь тем, что на сегодняшний день очень часто используется на практике целый ряд законов распределений, таких как распределения Релея, Накагами, Вейбулла, обобщенное экспоненциальное, обобщенное гамма - распределение, которые нельзя получить в виде частных случаев из системы распределений Пирсона.

**Цель статьи** - рассмотреть модифицированное уравнение Пирсона, позволяющее получить значительно более широкий класс законов распределений, чем система распределений Пирсона. Модификация уравнения Пирсона заключается в следующем. Во-первых, параметр  $b_0$  в уравнении (1) заменяется на параметр  $c$ , характеризующий собой показатель степени переменной  $x$ , причем  $c > 0$ . Во-вторых, предполагается, что соответствующее распределение  $p(x)$  является односторонним, то есть существует только на положительной части оси  $x$ . Тогда уравнение (1) принимает вид

$$\frac{d p(x)}{d x} = \frac{a_0 + a_1 x^c}{b_1 x + b_2 x^{c+1}} p(x), \quad (2)$$

либо

$$\frac{d}{d x} \ln(p(x)) = \frac{a_0 + a_1 x^c}{b_1 x + b_2 x^{c+1}}. \quad (3)$$

Используя общие свойства плотностей распределения вероятностей, установим правила определения параметров  $a_1, a_0, b_2$  и  $b_1$ ; входящих в уравнение (2). Для этого запишем уравнение (2) в следующем виде:

$$x^{cn} (b_1 x + b_2 x^{c+1}) dp(x)/dx = x^{cn} (a_1 x^c + a_0) p(x). \quad (4)$$

Пусть допустимые значения непрерывной случайной величины (СВ)  $\xi$  с ПРВ  $p(x)$  заключены в интервале  $(l_1, l_2)$ . Проинтегрируем левую часть равенства (4) по частям. Считая, что интегралы существуют, получим

$$\begin{aligned} \left\{ x^{cn} [b_1 x + b_2 x^{c+1}] p(x) \right\}_{l_1}^{l_2} - \int_{l_1}^{l_2} [(cn+1)b_1 + (cn+c+1)b_2 x^c] x^{cn} p(x) dx = \\ = \int_{l_1}^{l_2} x^{cn} (a_1 x^c + a_0) p(x) dx. \end{aligned}$$

Выражение в фигурных скобках обращается в нуль на верхней и нижней границах интервала интегрирования. Тогда, используя определение начальных моментов для непрерывной СВ, имеем

$$[a_0 + (cn + 1)b_1]m_{cn} = -[a_1 + (cn + c + 1)b_2]m_{c(n+1)}, \quad (5)$$

где  $m_s = M\{x^s\}$  - начальный момент  $s$ -го порядка, в том числе и дробного.

Уравнение (5) позволяет получить рекуррентные соотношения для определения моментов более высокого порядка по моментам более низкого порядка. Последовательно полагая в (5)  $n = 0, 1, 2, 3$  и учитывая, что  $m_0 = 1$ , получим:

$$\begin{aligned} a_0 + b_1 &= -[a_1 + (c + 1)b_2]m_{1c}; \\ [a_0 + (c + 1)b_1]m_{1c} &= -[a_1 + (2c + 1)b_2]m_{2c}; \\ [a_0 + (2c + 1)b_1]m_{2c} &= -[a_1 + (3c + 1)b_2]m_{3c}; \\ [a_0 + (3c + 1)b_1]m_{3c} &= -[a_1 + (4c + 1)b_2]m_{4c}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из решения системы уравнений (6) следует, что параметры  $a_i$  и  $b_i$  модифицированных распределений Пирсона, описываемых уравнением (2), определяются выражениями:

$$\begin{aligned} b_2 &= 0,5(K_2 - 1); & b_1 &= (1 + K_2 - 2K_1K_2)m_{1c}/2K_1; \\ a_1 &= -(3c + 1)b_2 - c; & a_0 &= cK_2m_{1c} - b_1, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$K_1 = \frac{m_{1c}^2}{m_{2c}}; \quad K_2 = \frac{m_{1c}m_{3c} - m_{2c}^2}{m_{2c}(m_{2c} - m_{1c}^2)}. \quad (8)$$

Решение уравнения (2) либо уравнения (3) можно записать следующим образом:

$$p(x) = K_n \exp[\phi(x)], \quad \phi(x) = \int \frac{a_0 + a_1 x^c}{b_1 x + b_2 x^{c+1}} dx, \quad (9)$$

где  $K_n$  - коэффициент нормировки. Очевидно, что характер кривой  $\phi(x)$ , а следовательно и ПРВ  $p(x)$ , может быть различным в зависимости от величины параметров  $b_1$  и  $b_2$ . При этом возможны пять типов распределений, области существования которых представлены на рисунке 1 в плоскости переменных  $K_1$  и  $K_2$ , определяемых выражением (8) при  $c = 1$ .

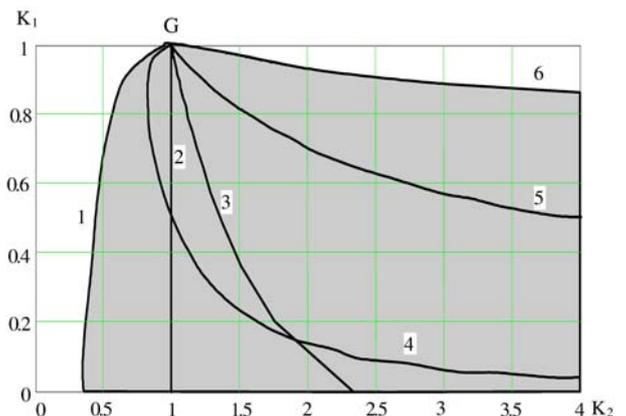
Рассмотрим подробнее указанные пять типов распределений.

**I тип распределения.** Распределение этого типа имеет место, когда параметр  $b_1 > 0$ , а параметр  $b_2 < 0$ . Представив подынтегральное выражение в (9) в виде

$$\frac{a_0 + a_1 x^c}{b_1 x + b_2 x^{c+1}} = \frac{a_0}{b_1 x} + \frac{(a_1 - a_0 b_2 / b_1) x^{c-1}}{b_1 + b_2 x^c} \quad (10)$$

и положив в нем  $b_2 = -1/\chi^c$ ,  $a_1/b_2 - a_0/b_1 = c(v-1)$ ,  $b_1 = 1$ ,  $a_0/b_1 = \alpha c - 1$  после интегрирования [3] с учетом коэффициента  $K_n$  получим

$$p(x) = \frac{c x^{\alpha c - 1}}{B(\alpha, v) \chi^{\alpha c}} \left(1 - \frac{x^c}{\chi^c}\right)^{v-1}, \quad 0 < x < \chi, \quad (11)$$



**Рисунок 1 – Области существования законов распределения**

где  $\alpha > 0, \nu > 0, c > 0$  - параметры формы;  $\chi > 0$  - параметр масштаба.

Частными случаями данного распределения являются степенной закон при  $c = 1$  и  $\nu = 1$ ; бета-распределение при  $c = 1$ . Предельным случаем (11) является логнормальное распределение при  $\alpha \rightarrow \infty, \nu \rightarrow \infty$  и  $c \rightarrow 0$ .

Используя (11) и соотношение [2]

$$m_s = \int_0^{\infty} x^s p(x) dx, \quad (12)$$

можно получить начальные моменты  $s$ -го порядка

$$m_s = \frac{\chi^s \Gamma(\alpha + s/c) \Gamma(\alpha + \nu)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\alpha + \nu + s/c)}. \quad (13)$$

Таким образом, выражение (11) можно использовать в качестве ПРВ для ограниченной сверху непрерывной СВ. На рис.1 область существования **распределения I типа** расположена слева от кривой 5, характеризующей собой область существования логнормального распределения. Кривая 1 характеризует область существования степенного закона. Область существования бета-распределения расположена слева от кривой 3, характеризующей собой область существования гамма-распределения.

Если ограниченная сверху случайная величина может принимать как положительные, так и отрицательные значения и является несимметричной относительно оси ординат, то в качестве ее закона распределения можно также использовать выражение (11) с учетом параметра сдвига  $\mu$ . А если она является симметричной с нулевым математическим ожиданием, то вместо (11) необходимо применять выражение

$$p(x) = \frac{0,5c |x|^{\alpha c - 1}}{B(\alpha, \nu) \chi^{\alpha c}} \left(1 - \frac{|x|^c}{\chi^c}\right)^{\nu - 1}, \quad -\chi < x < \chi. \quad (14)$$

Частными случаями (14) являются: равномерный закон при  $\nu = \alpha = 1, c = 1$ ; треугольный закон при  $\alpha = 1, \nu = 2$  и  $c = 1$ ; закон арксинуса при  $c = 2, \alpha = 0,5, \nu = 0,5$ ; параболическое распределение при  $\alpha = 0,5, \nu = 2, c = 2$ ; эллиптическое распределение при  $\alpha = 0,5, \nu = 1,5, c = 2$ ; обобщенное бета-распределение [4] при  $\alpha = 1/\gamma, \nu = (1 + \eta)/\gamma$  и  $c = \gamma$ .

**II тип распределения (обобщенное гамма-распределение).** В данном случае параметр  $b_1 \neq 0$ , а параметр  $b_2 = 0$ . Положив в (9)  $a_0/b_1 = \alpha c - 1, a_1/b_1 = -c/\beta^c$  и проинтегрировав, получим с учетом  $K_n$

$$p(x) = \frac{c x^{\alpha c - 1}}{\Gamma(\alpha) \beta^{\alpha c}} \exp\left(-\frac{x^c}{\beta^c}\right), \quad 0 < x < \infty, \quad (15)$$

где  $\alpha > 0, c > 0$  - параметры формы;  $\beta > 0$  - параметр масштаба. Данное распределение называют обобщенным гамма-распределением. Его частными случаями являются: распределение Релея при  $\alpha = 1, \beta = \sqrt{2} \sigma$  и  $c = 2$ ; экспоненциальное распределение при  $\alpha = 1$  и  $c = 1$ ; гамма-распределение при  $c = 1$  и  $\alpha = \nu + 1$ ; распределение хи-квадрат при  $\alpha = 0,5n, c = 1$  и  $\beta = 2$ ; распределение Накагами при  $\alpha = m, \beta = \sqrt{\Omega/m}$  и  $c = 2$ ; распределение Вейбулла при  $\alpha = 1$  и  $\beta^{-c} = \lambda$ . Предельными случаями (15) являются степенной закон при  $\alpha \rightarrow 0$  и  $c \rightarrow \infty$ ; логнормальное распределение при  $\alpha \rightarrow \infty$  и  $c \rightarrow 0$ . Само обобщенное гамма-распределение является предельным случаем распределения (11) при  $\nu \rightarrow \infty$ .

Подставив (15) в (12) и проинтегрировав, получим начальные моменты  $s$ -го порядка

$$m_s = \beta^s \frac{\Gamma(\alpha + s/c)}{\Gamma(\alpha)} \quad (16)$$

Следует отметить важное свойство моментов, присущее распределению (15) и представленное в виде равенства:

$$\frac{m_{(n+1)c} m_{1c} - m_{nc} m_{2c}}{(n-1)m_{nc}(m_{2c} - m_{1c}^2)} = 1, \quad (17)$$

где  $n \geq 2$ . Это свойство доказывается подстановкой выражения (16) в (17) для соответствующих начальных моментов.

На рисунке 1 область существования **распределения II типа** расположена между кривыми 1 и 5. Прямая 2 характеризует область существования **распределения II типа** при  $c = 2$ , а кривая 4 – распределения Вейбулла.

Если неограниченная СВ может принимать как положительные, так и отрицательные значения и является несимметричной относительно оси ординат, то в качестве ее закона распределения можно также использовать выражение (15) с учетом параметра сдвига  $\mu$ . А если она является симметричной с нулевым математическим ожиданием, то вместо (15) необходимо применять выражение

$$p(x) = \frac{0,5c |x|^{\alpha c - 1}}{\Gamma(\alpha) \beta^{\alpha c}} \exp\left(-\frac{|x|^c}{\beta^c}\right), \quad -\infty < x < \infty. \quad (18)$$

Частными случаями распределения (18) являются: гауссовский закон при  $\alpha = 0,5$ ,  $c = 2$  и  $\beta = \sqrt{2} \sigma$ ; распределение Лапласа при  $\alpha = 1$  и  $c = 1$ ; обобщенное экспоненциальное распределение [4] при  $\alpha = 1/\gamma$  и  $c = \gamma$ . Само распределение (18) является предельным случаем распределения (14) при  $\nu \rightarrow \infty$ .

Произведем функциональное преобразование  $z = \ln(x)$  обобщенного гамма-распределения (15). В результате получим

$$p(z) = \frac{c \exp(\alpha c(z - \mu))}{\Gamma(\alpha)} \exp[-\exp(c(z - \mu))], \quad -\infty < z < \infty, \quad (19)$$

где  $\mu = \ln(\beta)$  - параметр сдвига.

Частным случаем распределения (19) при  $\alpha = 1$  является распределение Гумбеля для минимальных значений [28].

**III тип распределения.** В этом случае параметр  $b_1 > 0$  и параметр  $b_2 > 0$ . Если положить в (9)  $a_0/b_1 = \alpha c - 1$ ,  $a_1/b_2 - a_0/b_1 = -c(\alpha + \nu)$ ,  $b_2 = 1$ ,  $b_1 = \lambda^c$  и проинтегрировать [3], то в результате получим ПРВ

$$p(x) = \frac{c \lambda^{\nu c} x^{\alpha c - 1}}{B(\alpha, \nu)(\lambda^c + x^c)^{\alpha + \nu}}, \quad 0 < x < \infty, \quad (20)$$

где  $\alpha > 0$ ,  $\nu > 0$ ,  $c > 0$  - параметры формы;  $\lambda > 0$  - параметр масштаба.

Частными случаями данного распределения являются: бета-распределение II рода при  $c = 1$ ; F- распределение при  $\alpha = 0,5n_1$ ,  $\nu = 0,5n_2$ ,  $c = 1$  и  $\lambda = n_2/n_1$ . Предельным случаем распределения (20) является обобщенное гамма-распределение (15) при  $\nu \rightarrow \infty$ .

Подставив (20) в (12) и проинтегрировав, получим начальные моменты  $s$ -го порядка

$$m_s = \frac{\lambda^s \Gamma(\alpha + s/c) \Gamma(\nu - s/c)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\nu)}. \quad (21)$$

Из (21) следует, что для ПРВ (20) существуют только те начальные моменты, порядок  $s$  которых удовлетворяет условию  $s < \nu c$ . На рисунке 1 область существования **распределения III** расположена между кривой 1 и кривой 6. Она перекрывается значительно с областью существования распределения I и включает в себя полностью область существования **распределения II**.

Если неограниченная СВ может принимать как положительные, так и отрицательные значения и является несимметричной относительно оси ординат, то в качестве ее закона распределения можно также использовать выражение (20) с учетом параметра сдвига  $\mu$ . А если она является симметричной с нулевым математическим ожиданием, то вместо (20) необхо-

димо применять

$$p(x) = \frac{0,5c \lambda^{vc} |x|^{\alpha c - 1}}{B(\alpha, v)(\lambda^c + |x|^c)^{\alpha+v}}, \quad -\infty < x < \infty. \quad (22)$$

Частными случаями (22) являются: распределение Коши при  $\alpha = v = 0,5, c = 2$ ; обобщенное распределение Коши [4] при  $\alpha = \eta/\gamma, c = \gamma/\eta, v = 1/\gamma$ ; закон Стьюдента при  $\alpha = 0,5, v = 0,5n, c = 2$  и  $\lambda = \sqrt{n}$ ; обобщенный закон Стьюдента [4] при  $\alpha = 1/\gamma, c = \gamma$  и  $v = 0,5\eta$ ; распределение Холла при  $c = 2, \alpha = 0,5$  и  $v = 0,5(\theta - 1)$ ; гиперболический закон при  $\alpha = 1, v = \rho - 1$  и  $c = 1$ . Предельным случаем ПРВ (22) является распределение (18) при  $v \rightarrow \infty$ .

Произведем функциональное преобразование  $z = \ln(x)$  распределения (20). В результате получим

$$p(z) = \frac{c \exp(\alpha c(z - \mu))}{B(\alpha, v)[1 + \exp(c(z - \mu))]^{\alpha+v}}, \quad 0 < z < \infty, \quad (23)$$

где  $\mu = \ln(\lambda)$  - параметр сдвига.

Частным случаем распределения ПРВ (23) при  $\alpha = 1, v = 1$  является логистическое распределение [5].

**IV тип распределения.** Распределение этого типа имеет место, когда параметр  $b_1 = 0$ , а параметр  $b_2 \neq 0$ . Если положить в (9)  $a_1/b_2 = -\alpha c - 1, a_0/b_2 = -c\beta^c$  и проинтегрировать, то с учетом коэффициента  $K_n$  получим

$$p(x) = \frac{c \beta^{\alpha c}}{\Gamma(\alpha) x^{\alpha c + 1}} \exp\left(-\frac{\beta^c}{x^c}\right), \quad 0 < x < \infty. \quad (24)$$

где  $\alpha > 0, c > 0$  - параметры формы;  $\beta > 0$  - параметр масштаба.

Частными случаями (24) при  $c = 1$  является **V тип распределения** Пирсона, а при  $c \rightarrow \infty$  - распределение Парето. Подставив (24) в (12) и проинтегрировав, получим начальные моменты  $s$ -го порядка

$$m_s = \beta^s \Gamma(\alpha - s/c) / \Gamma(\alpha). \quad (25)$$

Из (25) следует, что для ПРВ (24) существуют только те начальные прямые моменты, порядок  $s$  которых удовлетворяет условию  $s < \alpha c$ . На рис.1 область существования **распределения IV типа** расположена между кривыми 5 и 6.

Произведем функциональное преобразование  $z = \ln(x)$  распределения (24). В результате получим

$$p(z) = \frac{c \exp(-\alpha c(z - \mu))}{\Gamma(\alpha)} \exp[-\exp(-c(z - \mu))], \quad -\infty < z < \infty, \quad (26)$$

где  $\mu = \ln(\beta)$  - параметр сдвига.

Частным случаем распределения (26) при  $\alpha = 1$  является распределение Гумбеля для максимальных значений [5].

**V тип распределения.** В этом случае параметры  $b_1 < 0, b_2 > 0$ . Представив подинтегральное выражение в (9) в виде

$$\frac{a_0 + a_1 x^c}{b_1 x + b_2 x^{c+1}} = \frac{a_1}{b_2 x} + \frac{a_0 - a_1 b_1 / b_2}{x(b_1 + b_2 x^c)} \quad (27)$$

и положив в нем  $a_1/b_2 - a_0/b_1 = c(v - 1), a_1/b_2 = -c\alpha - 1, b_2 = 1, b_1 = -\chi^c$ , после интегрирования (27) получим [3]

$$p(x) = \frac{c \chi^{\alpha c}}{B(\alpha, v) x^{\alpha c + 1}} \left(1 - \frac{\chi^c}{x^c}\right)^{v-1}, \quad \chi < x < \infty. \quad (28)$$

Частным случаем ПРВ (28) является распределение Парето при  $\nu = 1, c = 1$ . При  $\nu \rightarrow \infty$  распределение (28) преобразуется в распределение (24).

Подставив ПРВ (28) в (12) и проинтегрировав, получим начальные моменты  $s$ -го порядка

$$m_s = \frac{\chi^s \Gamma(\alpha - s/c) \Gamma(\alpha + \nu)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\alpha + \nu - s/c)}. \quad (29)$$

Из (29) следует, что для ПРВ (28) существуют только те начальные прямые моменты, порядок  $s$  которых удовлетворяет условию  $s < \alpha c$ . На рис.1 область существования **распределения *V tina*** расположена справа от кривой 5. Кривая 6 характеризует область существования распределения Парето.

Необходимо отметить, что для ПРВ (11) выполняется условие  $K_2 < 1$ , для ПРВ (15) -  $K_2 = 1$  и для распределения (20) -  $K_2 > 1$ . Если в соотношение (8) вместо прямых степенных моментов подставить обратные моменты, то при этом для ПРВ (20) по-прежнему выполняется условие  $K_2 > 1$ , для ПРВ (24) -  $K_2 = 1$  и для ПРВ (28) -  $K_2 < 1$ . Рассмотренные условия используются при определении параметров модифицированных распределений Пирсона.

Рассмотрим теперь три предельных распределения для модифицированных распределений Пирсона, когда параметр  $c \rightarrow 0$ . Так как степенная функция связана с логарифмической функцией с помощью неравенства [6]

$$\ln(x) \leq n(x^{1/n} - 1),$$

которое переходит в равенство при  $n \rightarrow \infty$ , то можно положить в подынтегральном выражении (9)  $x^c = c \ln(x) + 1$ . В результате получим

$$p(x) = K_n \exp[\phi(x)], \quad \phi(x) = \int \frac{a_0 + a_1 \ln(x)}{b_1 x + b_2 x \ln(x)} dx. \quad (30)$$

**VI тип распределения (логнормальное распределение).** В данном случае параметр  $b_1 \neq 0$ , а параметр  $b_2 = 0$ . Если положить также в выражении (30)  $a_0/b_1 = -1 + \mu/\sigma^2$  и  $a_1/b_1 = -1/\sigma^2$ , то после интегрирования (30) получим логнормальное распределение

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad 0 < x < \infty, \quad (31)$$

где  $\mu > 0, \sigma > 0$  - параметры распределения.

Область существования ПРВ (31) представлена на рисунке 1 кривой 5. Параметры распределения определяются первым начальным и вторым центральным логарифмическими моментами.

**VII тип распределения.** Распределение этого типа имеет место, когда параметр  $b_1 > 0$ , а параметр  $b_2 < 0$ . Положим в подынтегральном выражении (30)  $b_2 = -1$  и представим его в виде

$$\frac{a_0 + a_1 \ln(x)}{b_1 x + b_2 x \ln(x)} = -\frac{a_1}{x} + \frac{a_0 + a_1 b_1}{x(b_1 - \ln(x))}. \quad (32)$$

Если положить в (32)  $b_1 = \ln(\chi), a_1 = -(\beta - 1), a_0 + a_1 b_1 = -(\nu - 1)$ , то после интегрирования (32) с учетом коэффициента  $K_n$  получим

$$p(x) = \frac{\beta^\nu x^{\beta-1}}{\Gamma(\nu) \chi^\beta} \left( \ln\left(\frac{\chi}{x}\right) \right)^{\nu-1}, \quad 0 < x < \chi; \quad (33)$$

где  $\nu > 0, \beta > 0$  – параметры формы;  $\chi > 0$  – параметр масштаба. При  $\nu \rightarrow \infty$  распределение (33) преобразуется в логнормальное распределение (31).

Подставив ПРВ (33) в соотношение (12) и проинтегрировав, получим начальные мо-

менты  $s$ -го порядка

$$m_s = (\beta / (\beta + s))^v \chi^s. \quad (34)$$

На рисунке 1 область существования *распределения VII типа* расположена слева от кривой 5.

*VIII тип распределения.* В этом случае параметры  $b_1 < 0$ ,  $b_2 > 0$ . Положим  $b_2 = 1$  и представим подынтегральное выражение в (30) в виде

$$\frac{a_0 + a_1 \ln(x)}{b_1 x + b_2 x \ln(x)} = \frac{a_1}{x} + \frac{a_0 - a_1 b_1}{x(b_1 + \ln(x))}. \quad (35)$$

Если положить в (35)  $b_1 = -\ln(\chi)$ ,  $a_1 = -(\beta + 1)$ ,  $a_0 - a_1 b_1 = \nu - 1$ , то после интегрирования (35) в результате получим

$$p(x) = \frac{\beta^v \chi^\beta}{\Gamma(\nu) x^{\beta+1}} \left( \ln \left( \frac{x}{\chi} \right) \right)^{\nu-1}, \quad \chi < x < \infty, \quad (36)$$

где  $\nu > 0$ ,  $\beta > 0$  – параметры формы;  $\chi > 0$  – параметр масштаба. При  $\nu \rightarrow \infty$  ПРВ (36) преобразуется в логнормальное распределение (31).

Подставив ПРВ (36) в (12) и проинтегрировав, получим начальные моменты  $s$ -го порядка

$$m_s = (\beta / (\beta - s))^v \chi^s. \quad (37)$$

Из (37) следует, что для распределения (36) существуют все обратные начальные моменты и только те прямые моменты, порядок которых удовлетворяет условию  $s < \beta$ . На рис.1 область существования *распределения VIII типа* расположена справа от кривой 5. Параметры распределения (37) определяются соотношением (37) с помощью обратных моментов.

Таким образом, предложена модификация уравнения Пирсона, которая позволяет получить широкий класс односторонних и двухсторонних распределений. С помощью законов распределения (11), (15), (20), (24), (28), (31), (33) и (35) можно осуществлять аппроксимацию законов распределения экспериментальных данных, принимающих только положительные значения, в соответствии с алгоритмом, рассмотренным в [7]. Для идентификации законов распределения используются прямые и обратные степенные моменты, а также логарифмические моменты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
2. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер. – Том 2. – М.: Мир. – 1967. – 752 с.
3. Прудников, А.П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 797 с.
4. Шелухин, О.И. Негауссовские процессы / О.И. Шелухин, И.В. Беляков. – СПб.: Политехника, 1992. – 312 с.
5. Справочное пособие по теории вероятностей и математической статистике (законы распределения) / Г.А. Соколов, Н.А. Чистякова. - М.: Высшая школа, 2007. – 247 с.
6. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. - М.: Наука, 1979. – 832 с.
7. Карпов, И.Г. Аппроксимация теоретических и экспериментальных распределений с использованием степенных и логарифмических моментов / И.Г. Карпов, В.В. Евсеев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – №11. – С. 30 – 37.

### Карпов Иван Георгиевич

ФГБОУ ВПО Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов  
 Доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и защита информации  
 392000, Тамбов, ул. Советская, 106  
 Тел: (4752) 73-26-27, +9108595874  
 zeratul68@mail.ru

**Зырянов Юрий Трифонович**

ФГБОУ ВПО Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

Доктор технических наук, профессор кафедры конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем

392000, Тамбов, ул. Советская, 106

Тел: (4752) 72-69-64, +9156662190

zut-tmb@mail.ru

**Мельник Олег Васильевич**

ФГБОУ ВПО Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов

аспирант кафедры конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем

392000, Тамбов, ул. Советская, 106

Тел: (4752) 45-42-63, +9156795568

melfice.bft@gmail.com

I.G. KARPOV, YU.T. DJAKOV ZYRYANOV, O.V. MELNIK

**THE MODIFIED EQUATION PEARSON FOR DISTRIBUTIONS  
OF CONTINUOUS RANDOM VARIABLES**

*The modified equation of Pearson, which allows get a wider class of distributions of random variables than the classical system of distributions Pearson.*

**Keywords:** *distribution of Pearson, Pearson modified equation, the approximation of the laws of distribution of experimental data, direct power moments, inverse power moments, logarithmic moments.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Tihonov, V.I. Statisticheskaja radiotekhnika / V.I. Tihonov. – M.: Radio i svjaz', 1982. – 624 s.
2. Feller, V. Vvedenie v teoriju verojatnostej i ee prilozhenija / V. Feller. – Tom 2. – M.: Mir. – 1967. – 752 s.
3. Prudnikov, A.P. Integraly i rjady. Jelementarnye funkicii / A.P. Prudnikov, Ju.A. Brychkov, O.I. Marichev. – M.: Nauka, 1981. – 797 s.
4. Sheluhin, O.I. Negaussovskie processy / O.I. Sheluhin, I.V. Beljakov. – SPb.: Politehnika, 1992. – 312 s.
5. Spravochnoe posobie po teorii verojatnostej i matematicheskoj statistike (zakony raspredelenija) / G.A. Sokolov, N.A. Chistjakova. - M.: Vysshaja shkola, 2007. – 247 s.
6. Spravochnik po special'nyh funkcijam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablicami / Pod red. M. Abramovica i I. Stigan. - M.: Nauka, 1979. – 832 s.
7. Karpov, I.G. Approksimacija teoreticheskikh i jeksperimental'nyh raspredelenij s ispol'zovaniem stepennyh i logarifmicheskikh momentov / I.G. Karpov, V.V. Evseev // Uspehi sovremennoj radioelektroniki. – 2008. – №11. – S. 30 – 37.

**Karpov Ivan Georgievich**

Tambov state technical University, str. Tambov

Doctor of technical Sciences, Professor of the Department of information systems and protection of information

392000, Tambov, ul. Soviet, 106

Tel: (4752) 73-26-27, +9108595874

zeratul68@mail.ru

**Zyryanov Yuri Trifonovich**

Tambov state technical University, str. Tambov

Doctor of technical Sciences, Professor of the Department of designing of radio-electronic and microprocessor systems

392000, Tambov, ul. Soviet, 106

Tel: (4752) 72-69-64, +9156662190

zut-tmb@mail.ru

**Melnic Oleg Vasilyevich**

Tambov state technical University, str. Tambov

post-graduate student of the Department of designing of radio-electronic and microprocessor systems

392000, Tambov, ul. Soviet, 106

Tel: (4752) 45-42-63, +9156795568

melfice.bft@gmail.com

С.В. ЕЛИСЕЕВ, Р.С. БОЛЬШАКОВ

## К ВОПРОСУ ОБ ОБРАТНЫХ СВЯЗЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Рассматриваются особенности структуры колебательных механических систем. Показано, что при выделении объекта защиты оставшаяся часть системы может рассматриваться в качестве обратных связей. При выборе соответствующих систем координат можно выделить различные формы самоорганизации движения при действии гармонической внешней силы.*

**Ключевые слова:** обратные связи в механических колебательных системах, динамическое гашение колебаний, формы самоорганизации движения.

**I. Введение.** Учет обратных связей в упругих колебательных системах обычно связан с построением структурных моделей [1,2] и позволяет развивать достаточно рациональные подходы в задачах динамического синтеза виброзащитных систем. В меньшей степени изученными оказались системы с несколькими степенями свободы, в которых объект защиты от вибраций может взаимодействовать с одним из фрагментов системы в целом. В этом случае возникает ряд вопросов, связанных с преобразованием структур и особенностями отображения объекта защиты.

**II.** В предлагаемой работе авторы рассматривают внешнее воздействие, приложенное к элементу  $m_1$  и два кинематических возмущения  $z_1$  и  $z_2$  со стороны основания системы. На рис. 1 *a*, *b*, *в* и *г* представлены расчетная (1*a*) и структурные схемы системы в различных координатах: рис. 1 *b* –  $y_1, y_2$ ; рис. 1 *в* –  $y, y_1$  (при этом  $y = y_2 - y_1$ ; рис. 1 *г* – система координат  $y, y'_1$  ( $y'_1 = y_1 + y_2$ ). Выражениями (I), (II), (III) на позиции рис. 1 *д* обозначены передаточные функции: «выходная координата  $\bar{y}_1$  – входная координата  $\bar{z}_1 - W_6(p) = \frac{\bar{y}}{z_1}$ , а также

$W_6(p) = \frac{\bar{y}}{\bar{z}_1}$  и  $W_2(p) = \frac{\bar{y}'}{\bar{z}_1}$ ; при этом принято, что  $z_1 \neq 0, z_2 = 0, F = 0$  Случай, когда  $z_1 \neq 0,$

$z_2 \neq 0, F \neq 0$ , представляют собой особую ситуацию комплексного воздействия на систему и должны рассматриваться отдельно. Сравнение передаточных функций показывает, что характеристическое уравнение во всех случаях остается неизменным, тогда как числители выражений (I), (II), (III) на рисунке 1 будут различными. Используя выражение (II), найдем, что частота динамического гашения по координате  $y$  определится выражением

$$\omega_{дин}^2 = \frac{k_3}{m_2}, \quad (1)$$

то есть на этой частоте выполняется условие  $y = 0$  или  $y_1 = y_2$ , что соответствует некоторому частному случаю самоорганизации движения в системе на рисунке 1 *a*: две массы двигаются в одной фазе с одинаковыми амплитудами колебаний при действии внешнего кинематического возмущения  $z_1$ . При этом особенности режима движения раскрываются по схеме определения частот динамического гашения в традиционной постановке задачи динамического гашения колебаний [3].

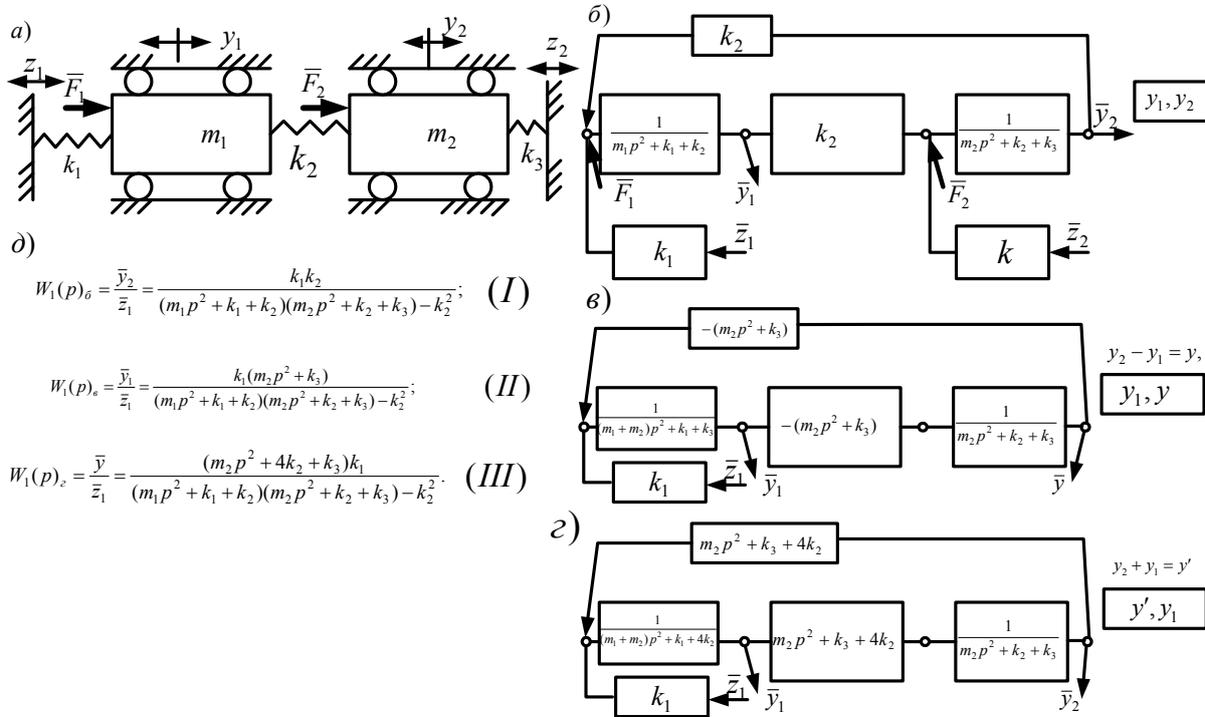
**III.** К задачам динамического гашения колебаний в традиционной постановке можно отнести задачу «обнуления» координаты объекта защиты в условно неподвижной системе координат  $y_1, y_2$ . При использовании выражения (III) на рисунке 1 *д* режим динамического гашения по координате  $y'$  определится из выражения:

$$\omega_{дин}^2 = \frac{4k_2 + k_3}{m_2}, \quad (2)$$

при этом  $y' = y_1 + y_2$ . Отметим, что в этом случае из условия  $y' = 0$ , следует  $y_1 = -y_2$ , то есть на частоте (2) возникает режим самоорганизации движения элементов с массами  $m_1$  и  $m_2$

в противофазе при равенстве амплитуд. Такой режим в системе координат  $y', y_1$  можно рассматривать как режим динамического гашения, принимая во внимание условие  $\bar{y}' = 0$ , тогда как имеют место и другие формы взаимодействия элементов системы.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что режимы динамического гашения в обычном понимании необходимо соотносить только с системами координат, связанными с неподвижной системой отсчета, либо увязывать ожидаемые эффекты при «занулении» числителя передаточной функции с выбранной системой обобщенных координат.



Изменение системы координат изменяет представления о динамических свойствах

Рисунок 1 – Схема формирования режимов динамического гашения в разных системах обобщенных координат

IV. Полагая, что режим динамических колебаний возникает в механических колебательных системах, содержащих, кроме объекта защиты, еще и элементы, способные своим движением формировать дополнительные «внутренние» инерционные силы, которые взаимодействуют с внешними возмущениями, рассмотрим цепную систему с двумя степенями свободы, как показано на рисунке 2 а. Для этой системы выбраны обобщенные координаты  $y_1, y_2$ . Структурная схема системы представлена на рисунке 2 б, на котором можно выделить две парциальные системы и упругие перекрестные связи в виде упругого элемента с передаточной функцией  $k_2$ . В физическом плане – эта связь является элементом соединения двух масс, а наличие двух каналов взаимодействия отражает физическую сущность 3-его закона Ньютона. Принимая в качестве объекта защиты элемент с массой  $m_1$ , преобразуем структурную схему (рис. 2 б) к виду, как показано на рисунке 2 в. Режим динамического гашения колебаний по координате  $y_1$  может быть определен из дополнительной положительной обратной связи с передаточной функцией  $\frac{k_2^2}{m_2 p^2 + k_2}$ , при условии, что

$$\frac{k_2^2}{m_2 p^2 + k_2}, \text{ при условии, что}$$

$$\omega_{дин}^2 = \frac{k_2}{m_2}. \quad (3)$$

В этом случае обратная связь приобретает общий коэффициент усиления  $\rightarrow \infty$ , что обеспечивает  $y_1 \rightarrow 0$ . В общем виде передаточная функция для структурной схемы на рисунке 2 в имеет вид:

$$W(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{z}_1} = \frac{k_1(m_2 p^2 + k_2)}{(m_1 p^2 + k_1 + k_2)(m_2 p^2 + k_2) - k_2^2}. \quad (4)$$

V. В более общем случае режим динамического гашения колебаний может рассматриваться в системе с общим объектом защиты  $m_1$  и двумя присоединенными массами  $m_2$  и  $m_3$ , как показано на рис. 2 з. В этом случае структурная схема механической системы в координатах  $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$  примет вид в соответствии с рис. 2 д. При выбранном объекте защиты  $y_1$  структурная схема системы примет вид, как показано на рис. 2 е.

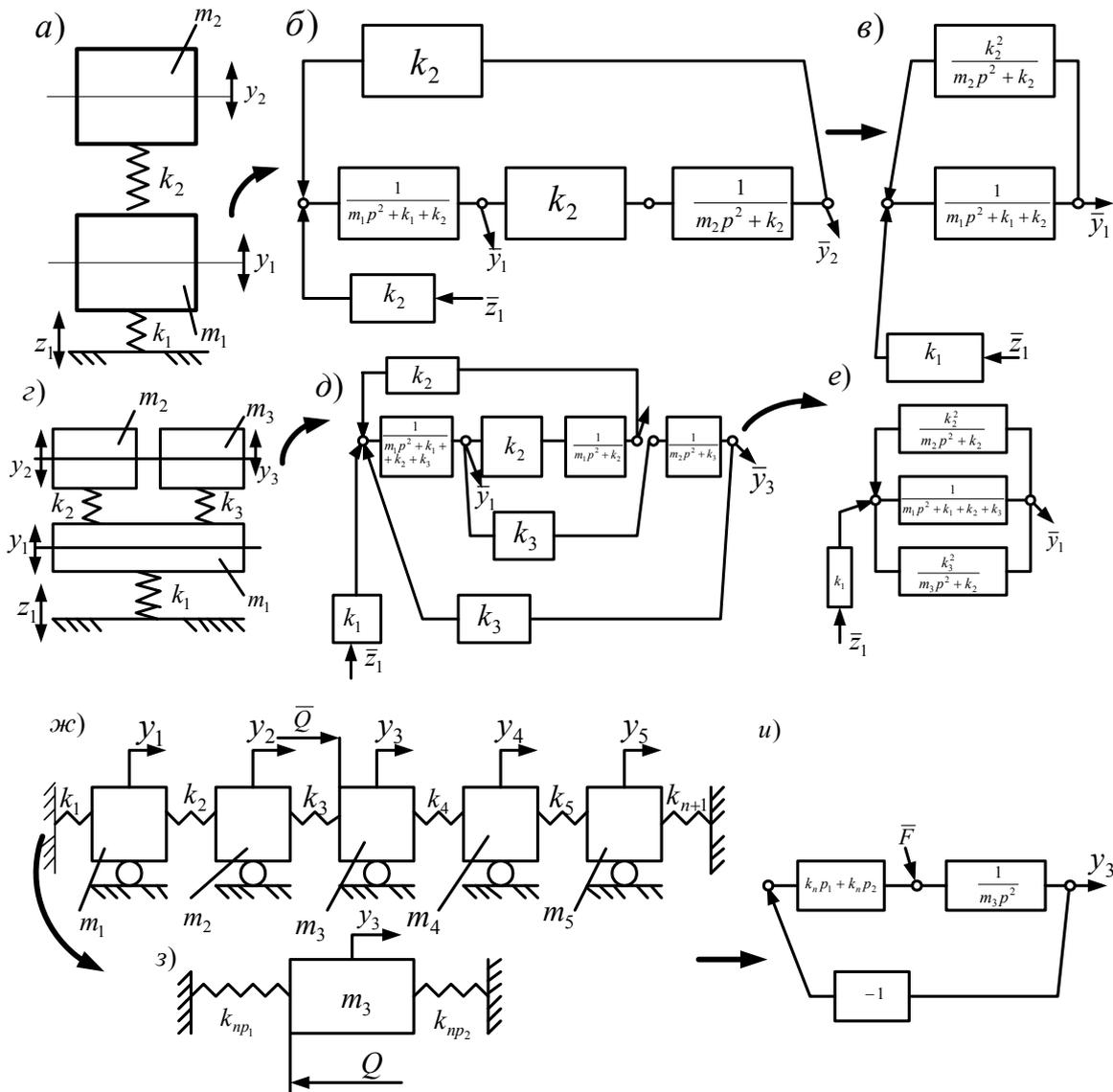


Рисунок 2 – Общая схема определения режимов динамического гашения колебаний

Из схемы (рис.2) следует, в частности, что при двух присоединенных массах гасителей объект защиты приобретает две положительные обратных дополнительных связи с соответствующими передаточными функциями:

$$W_{2don}(p) = \frac{k_2^2}{m_2 p^2 + k_2}, \quad (5)$$

$$W_{3don}(p) = \frac{k_3^2}{m_3 p^2 + k_3}. \quad (6)$$

Из анализа (5), (6) следует, что в системе (рис. 2) возможны два независимых режима динамического гашения колебаний на частотах:

$$\omega_{дин1}^2 = \frac{k_2}{m_2}, \quad (7) \quad \omega_{дин2}^2 = \frac{k_3}{m_3}. \quad (8)$$

Присоединение двух дополнительных элементов с массами  $m_2$  и  $m_3$  изменяет параметры парциальной системы; при этом, парциальная частота собственных колебаний объекта защиты  $m_1$  определится выражением:

$$\omega_{парц}^2 = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{m_1}. \quad (9)$$

То есть присоединение дополнительных масс с целью построения в системе координат, связанной с неподвижной системой отсчета, динамического гасителя колебаний на несколько частот внешних кинематических воздействий, приводит к увеличению значений частоты собственных колебаний парциальной системы, содержащей объект защиты. Передаточная функция для системы на рисунке 2 в может быть определена с помощью обычных правил преобразования структурных схем систем автоматического управления.

**VI.** Общие подходы в построении передаточных функций цепных механических колебательных систем имеют свою специфику, так как обычная механическая цепь имеет трехдиагональную матрицу коэффициентов дифференциальных уравнений движения. Это облегчает структурные преобразования. На рисунке 2 ж показана расчетная схема механической колебательной системы с пятью степенями свободы в системе координат  $y_1 \div y_5$ . В качестве объекта защиты выбран элемент массой  $m_3$ ; к этому элементу приложена внешняя сила  $Q$ . Особенностью цепной системы является возможность замены левой и правой частей цепи (по отношению к объекту защиты) через эквивалентные в динамическом отношении обобщенные пружины с приведенными коэффициентами жесткости  $k_{np1}$  и  $k_{np2}$ . Упрощенная расчетная схема системы представлена на рисунке 2 з, а ее структурная схема примет вид, как показано на рисунке 2 и. Передаточная функция системы в этом случае имеет вид:

$$W_3(p) = \frac{\bar{y}_3}{Q} = \frac{1}{m_3 p^2 + k_{np1} + k_{np2}}. \quad (10)$$

Для выражения (10)  $k_{np1}$  и  $k_{np2}$  определяются по правилам преобразования цепных структур, что приведено в работе [4]. В данном случае коэффициент приведенной жесткости обобщенной пружины  $k_{np1}$  определяется выражением:

$$k_{np1} = \frac{\left\{ \frac{(m_1 p^2 + k_1) k_2}{m_1 p^2 + k_1 + k_2} + m_2 p^2 \right\} k_3}{\left\{ \frac{(m_1 p^2 + k_1) k_2}{m_1 p^2 + k_1 + k_2} \right\} + k_3}. \quad (11)$$

Аналогичную структуру имеет выражение для  $k_{np2}$ . Преобразуя выражение (11) для передаточной функции и переходя к  $k_{np} = k_{np1} + k_{np2}$ , можно получить дробно-рациональное выражение, которое, в конечном итоге, после преобразований сформирует общее выражение для передаточной функции с числителем и знаменателем, что позволит найти частоты динамического гашения и частоты собственных колебаний системы. Предлагаемый подход может быть распространен и на системы с  $n$ -числом степеней свободы. При этом должны соблюдаться определенные условия: отсутствие кинематических возмущений; силовое возмущение прикладывается к выделенному объекту защиты.

**Заключение.** Таким образом, системы с несколькими степенями свободы могут рассматриваться в задачах виброзащиты в структурном плане как объект, относительно которого вводятся одна или более обратных связей. Характер связей зависит от структуры парциальной системы, что в целом позволяет выявлять простейшие формы самоорганизации движения при периодическом гармоническом воздействии. Отметим также, что в построении моделей силы трения полагались малыми, что, как известно, имеет свои пределы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев, С.В. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С.В. Елисеев, Ю.Н. Резник, А.П. Хоменко, А.А. асядко. – Иркутск: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2008. – 523 с.
2. Елисеев, С.В. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем / С.В. Елисеев, Ю.Н. Резник, А.П. Хоменко. – Новосибирск: Наука. – 2011. – 394 с.
3. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики: в 2 т. Т 2. Динамика / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М.: Наука, 1968. – 638 с.

### **Елисеев Сергей Викторович**

ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск  
Доктор технических наук, профессор, директор НОЦ СТСАМ  
тел.: 8-902-5-665-129,  
E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

### **Большаков Роман Сергеевич**

ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск  
аспирант.  
тел.: 89086614263

---

S.V. ELISEEV, R.S. BOLSHAKOV

## TO THE QUESTION ABOUT THE FEEDBACKS TIES OF MECHANICAL OSCILLATIONS SYSTEMS

*Structure features of oscillation mechanical systems are considered. It is shown that when selection of protection object can be considered as feedback ties. Different forms of self-organization motion under the action of harmonical external power can be select at selection relevant of coordinates systems.*

**Keywords:** *feedback ties in mechanical oscillation systems, dynamical absorbtion of oscillations, forms of self-organization motion.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Eliseev, S.V. Dinamicheskij sintez v obobshhennyh zadachah vibrozashhity i vibroizoljicii tehniche-skih ob#ektov / S.V. Eliseev, Ju.N. Reznik, A.P. Homenko, A.A. asjadko. – Irkutsk: Izd-vo Irk. gos. un-ta, 2008. – 523 s.
2. Eliseev, S.V. Mehatronnye podhody v dinamike mehanicheskikh kolebatel'nyh sistem / S.V. Elise-ev, Ju.N. Reznik, A.P. Homenko. – Novosibirsk: Nauka. – 2011. – 394 s.
3. Lojczjanskij, L.G. Kurs teoreticheskoy mehaniki: v 2 t. T 2. Dinamika / L.G. Lojczjanskij, A.I. Lur'e. – M.: Nauka, 1968. – 638 s.

### **Yeliseyev Sergey Viktorovich**

FGBOU VPO "Irkutsk State University of Means of Communication", Irkutsk  
Doctor of Engineering, professor, director of NOTs STSAM  
ph.: 8-902-5-665-129,  
E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

### **Bolshakov Roman Sergejevich**

FGBOU VPO "Irkutsk State University of Means of Communication", Irkutsk  
graduate student.  
ph.: 89086614263

И.Ф. ШАДРИН

## ЖЁСТКИЕ СТЕРЖНИ НА ДВУМЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И АНОМАЛЬНОЕ ЭНТРОПИЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ. АГРЕГАТЫ (КЛАСТЕРЫ)

*Компьютерное моделирование методом Монте-Карло использовано для изучения локальной структуры в системе твёрдых стержней находящихся на плоской (2d) поверхности. Поиск спонтанно возникающих структур из стержней, производится по определённым правилам, применяемым к стержням, имеющим общую область контакта, и дан в терминах взаимного расположения стержней модифицированной теории Асакуры-Оосавы [5]. По статистике спонтанно возникающих структур из стержней (агрегаты, кластеры) обнаружены две области линеаризации по критериям кластерообразования. Функциональная зависимость доли вхождения стержней в кластеры от критериев кластерообразования указывает на дуальность поведения системы стержней. На малых расстояниях между стержнями (поперечное ~ 40% диаметра и ~30% соосной продольной длины по центрам стержней) преобладает энтропия близкодествующего объёмного взаимодействия (depletion interacting), а на больших расстояниях преобладает дальнедействующее конфигурационное энтропийное взаимодействие.*

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

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Двумерные системы стержней с жёстким потенциалом взаимодействия привлекают исследователей широкой распространённостью в природе и своей простотой для аналитических и экспериментальных исследований. Экспериментально и теоретически исследуются, например, системы с вирусными частицами [1-4], псевдо-жидкие состояния системы стержней и сфер (вибро-оживлённые) [5-7] и компьютерное моделирование [8, 9]. Как правило, в данных работах приводятся и аналитические выкладки по анализу проведённых исследований.

Из классических работ [10, 11] известно, что дальний порядок в двумерных системах невозможен из-за неограниченного роста тепловых флуктуаций направлений директора ориентации и что расходимость является логарифмической. Во многих теоретических и экспериментальных работах исследуется вопрос перехода из изотропного в анизотропное состояние двумерной системы стержней с жёстким потенциалом взаимодействия, в некоторых из них этот переход обнаруживается [12, 13].

Наша работа направлена на изучение и описание локальной структуры в 2d-системах анизотропных частиц и уточнение морфологических структур, возникающих в этих системах, посредством введения структурообразующего элемента – агрегата (кластера) [14,15]. Агрегат (кластер) – это образование из рядом расположенных стержней, пространственное расположение которых согласуется с определёнными критериями. Агрегаты (кластеры) можно обнаруживать и при низких, и при высоких концентрациях стержней. Термины «агрегат» и «кластер» в данной статье используются как практически эквивалентные друг другу. Однако можно заметить, что между ними имеются некоторые различия: термин «кластер» используется, как правило, для обозначения компактного и регулярного агрегата. Некоторые мезофазы в системах жёстких стержней и их сосуществование в 2d-системах анизотропных частиц можно описать через иерархию агрегатов различной степени «плотности и упорядоченности».

### 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Нами исследовалась континуальная двумерная система твёрдых стержней (дископрямоугольников) с осевыми отношениями  $L/D = 6; 15; 30$  ( $L, D$  – длина и диаметр стержня соответственно), между которыми имеется только объёмно-топологическое взаимодействие,

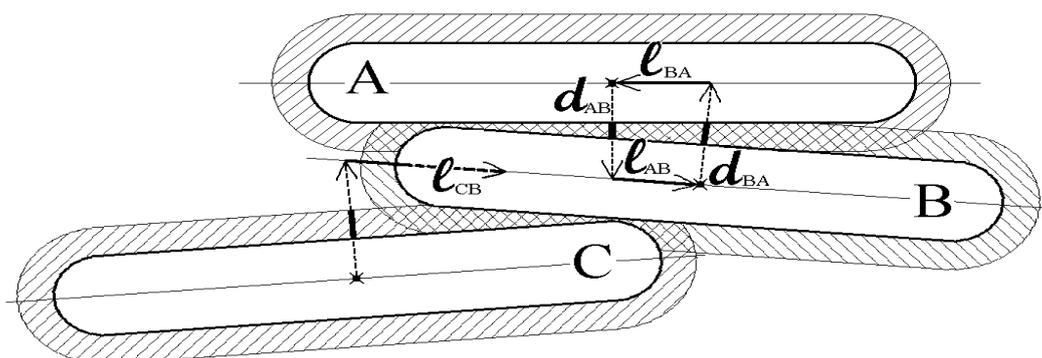
что является характерным для лиотропных жидкокристаллических систем. Для уменьшения граничных эффектов использовались периодические граничные условия. В данной работе исследовались три различных (характерных) области концентрации: низкая, средняя и плотная [15].

Анализ образующейся локальной структуры стержней удобно проводить по критериям, приведенным в работах [14, 15], в которых проводился анализ по выявлению геометрических структур взаимного локального расположения стержней в хаотической системе стержней. В данной статье мы адаптируем геометрические критерии агрегатообразования к физически интерпретируемым в терминах агрегации (кластерообразования) модифицированной теории Асакуры-Оосавы [5] и работ, непосредственно использующих энтропийное взаимодействие [5, 7] (depletion interacting).

Под агрегатом (кластером) понималось такое расположение стержней (рис.1), при котором для любой соседней пары стержней в агрегате выполняются следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} (d_{ij}, d_{ji})_{\max} &\leq \gamma * D \\ (l_{ij}, l_{ji})_{\max} &\leq \beta * (L/2) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $d_{ij}$  – длина перпендикуляра, проходящего по пространству между поверхностями стержней (жирные и сплошные части отрезков, рис.1), опущенного из центра  $i$ -го стержня до пересечения с осью  $j$ -го стержня;  $l_{ji}$  – длина отрезка по оси от центра  $j$ -го стержня до точки пересечения с перпендикуляром, опущенным из центра  $i$ -го стержня;  $L$  и  $D$  – длина и диаметр стержня (дископрямоугольника) соответственно;  $\gamma$  и  $\beta$  – параметры критерия кластерообразования (ПКК).



**Рисунок 1 – Определение вхождения стержня в агрегат (кластер) согласно системе неравенств ур. 1. при ПКК  $\gamma = 1$  и  $\beta = 1$**

*Перпендикуляры, опущенные из центров стержней, отсекают следующие отрезки для стержней A и B:  $(d_{AB}, d_{BA})_{\max} < D$  (жирные и сплошные части отрезков) и  $(l_{AB}, l_{BA})_{\max} < (L/2)$ , они входят в один кластер. Перпендикуляр, опущенный из центра стержня C, пересекает ось стержня B за его пределами, поэтому стержень C не входит в кластер*

Из рис. 1 видно, что, например, при  $\gamma = 1.0$  и  $\beta = 1.0$  стержни A и B принадлежат одному кластеру, а стержень C не принадлежит этому кластеру, так как перпендикуляр, опущенный из центра стержня C, пересекается с осью стержня B за его пределами. В сравнении с работами [14, 15, 16], мы формально произвели замену переменных, и геометрически алгоритм поиска (определения) вхождения стержней в агрегаты остался прежним, поэтому все результаты, полученные в этих работах, остаются в силе. В обновленном определении (ур. 1) мы получаем возможность физической интерпретации параметров кластерообразования в терминах теории Асакуры-Оосавы (depletion interacting). Параметры критерия кластерообразования обладают непрерывностью и монотонностью в довольно широких пределах, и агрегаты из стержней образуются в широком диапазоне концентраций стержней от низких до высоких [15, 16].

### **3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ**

Из статей [14, 15, 16] следует, что агрегаты (кластеры) в системе стержней образуются в широком диапазоне концентраций. Нами исследовались концентрации системы стержней (10, 30, 50)% при разных осевых отношениях стержней  $L/D = 6; 15; 30$ . Как следует из определения агрегата (ур. 1), он может быть рыхлым и плотным, плохо и хорошо упорядоченным, в зависимости от того, как стержни в среднем будут располагаться в агрегате. 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 ПКК  $\beta$  отвечает за близость центров стержней в их соосном (продольном) упорядочении, следовательно, и за упорядоченность образующихся кластеров и их похожесть на смектические или столбчатые структуры. Таким образом, варьируя величину ПКК, можно выявлять разнообразные морфологические структуры в хаотической системе стержней.

Из работ [14, 15, 16] следует, что в хаотической системе стержней на двумерной плоскости образуется система агрегатов (кластеров) различной степени плотности и упорядоченности, их количество в среднем непрерывно и монотонно зависит от концентрации стержней в системе и величины параметров ПКК. И если в области малых концентраций число стержней, входящих в систему агрегатов, мало, то при средних и больших концентрациях большая часть стержней системы входит в агрегаты. При низкой концентрации стержней в системе число кластеров с большими значениями ПКК преобладает, а 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 агрегаты, которые с повышением концентрации заменяются более плотными и регулярными кластерами, и этот процесс происходит в среднем непрерывно и монотонно. Непрерывность и монотонность процесса кластерообразования соблюдается до точки перколяции [17] и выше, следует из работ [15, 16].

Новое переопределение и изменение диапазона вариации параметра ПКК  $\gamma$  (ур. 1), отвечающего за близость поверхностей стержней друг к другу в агрегате, а значит, суммарно чувствительного к энтропийному взаимодействию между стержнями, позволило выявить интересные закономерности. Доля стержней, входящих в кластеры, в функции параметра ПКК  $\gamma$  линеаризуется в двойных логарифмических координатах, имеет степенную зависимость для всех осевых отношений стержней, что показано на (рис. 2 и 3). Переходной интервал между областями линеаризации данных «сшит» непрерывно и гладко полиномом третьей степени. Подгонка параметров прямых, области линеаризации и полинома «гладкой сшивки» с условием монотонности в переходной области, произведены по методу наименьших квадратов. Таким образом, выявлены две области линеаризации, на рисунке отображаются двумя толстыми прямыми, для всех исследованных осевых отношений стержней и имеющих разный характер поведения для разных концентраций системы стержней. Область линеаризации «А» – для малых значений параметра ПКК  $\gamma$ , область «Б» – для больших значений. В этих областях мы имеем функциональную зависимость:

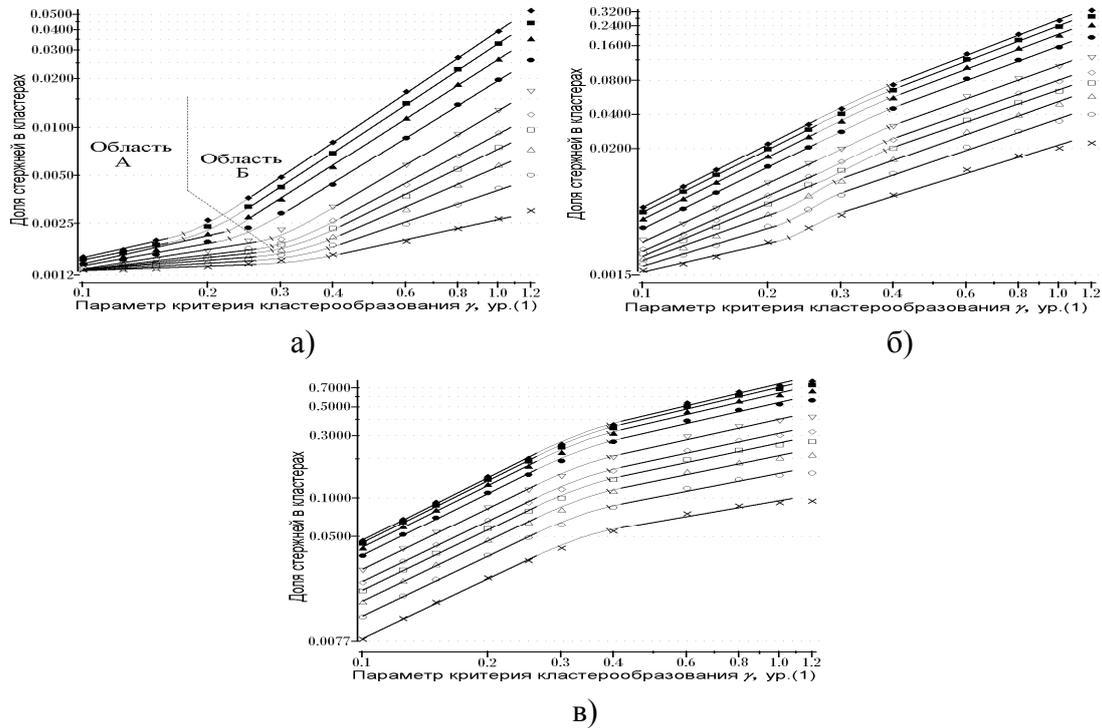
$$Y(\gamma) = a_0 * \gamma^{a_1}, \tag{2}$$

где  $Y(\gamma)$  – доля стержней в кластерах;  $a_0, a_1$  – константы, определяемые по расчётным данным численного эксперимента.

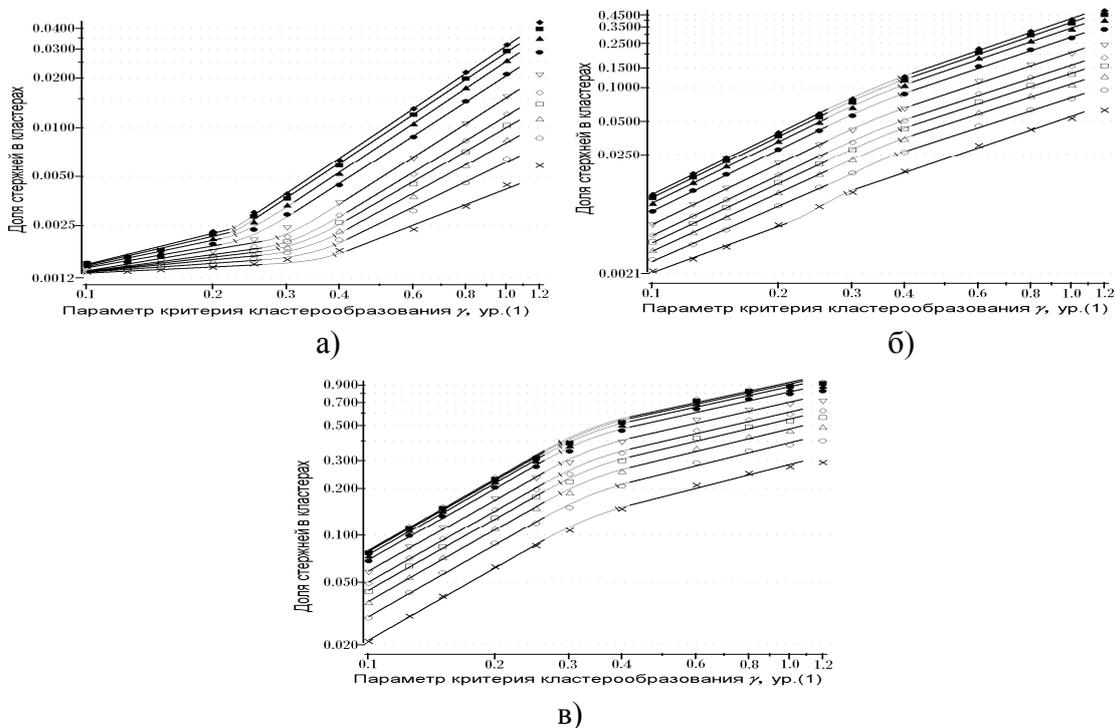
На графиках (рис. 2, 3) переходной интервал отображается тонкой линией и в области наибольшей кривизны помечен пересечением коротким отрезком линии. Значение и ширина переходного интервала зависит от параметров ПКК, концентрации стержней в системе и их осевого отношения.

Например, при 10% концентрации стержней и осевом отношении  $L/D = 6$  приближенные центры интервалов имеют значения  $\gamma \approx (0.18 \div 0.4)$ , а для  $L/D = 30$  –  $\gamma \approx (0.22 \div 0.4)$ . При концентрации стержней (10 и 50)% взаимный характер наклонов прямых качественно различается. Если при 10% концентрации стержней при экстраполяции прямых из области «Б» в область «А» они прогнозируют меньшее количество стержней в кластерах, чем имеется

по измерениям, то при концентрации 50% стержней в системе экстраполяция прямых из области «Б» в область «А» прогнозируется большее значение, чем имеется по результатам моделирования.

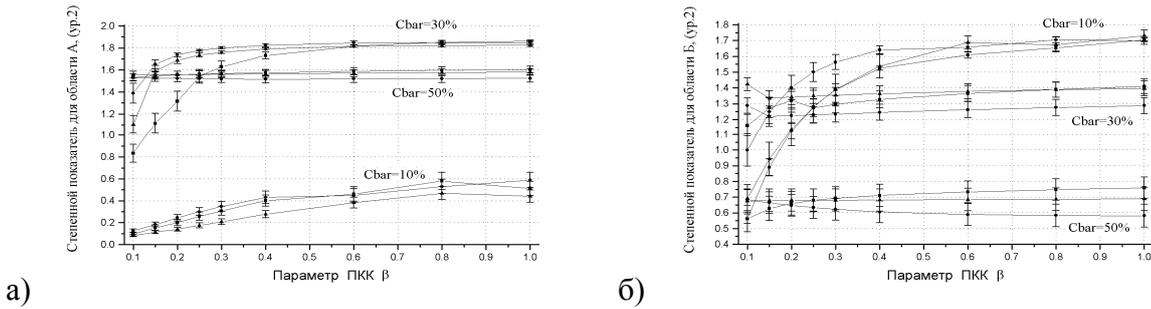


**Рисунок 2 – Доля стержней, входящих в кластеры, в функции параметра ПКК  $\gamma$  при осевом отношении стержней  $L/D = 6$  и различных концентрациях стержней а) = 10%; б) = 30%; в) = 50%. Параметр  $\beta$  имеет значения  $\times$ -0.1;  $\circ$ -0.15;  $\triangle$ -0.2;  $\square$ -0.25;  $\diamond$ -0.3;  $\nabla$ -0.4;  $\bullet$ -0.6;  $\blacktriangle$ -0.8;  $\blacksquare$ -1.0;  $\blacklozenge$ -1.2;**



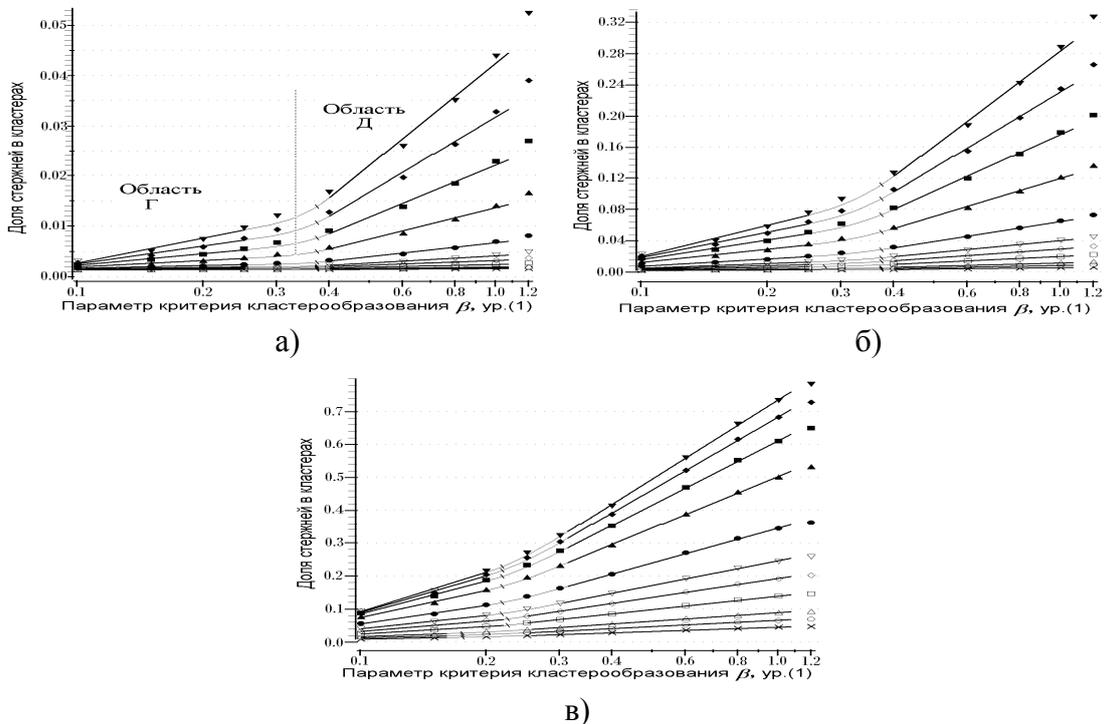
**Рисунок 3 – Доля стержней, входящих в кластеры, в функции параметра ПКК  $\gamma$  при осевом отношении стержней  $L/D = 30$  и различных концентрациях стержней а) = 10%; б) = 30%; в) = 50%. Параметр  $\beta$  имеет значения  $\times$ -0.1;  $\circ$ -0.15;  $\triangle$ -0.2;  $\square$ -0.25;  $\diamond$ -0.3;  $\nabla$ -0.4;  $\bullet$ -0.6;  $\blacktriangle$ -0.8;  $\blacksquare$ -1.0;  $\blacklozenge$ -1.2;**

При концентрации 30% стержней в системе имеется примерное равенство наклонов линеаризованных графиков в областях «А» и «Б», это видимо, свидетельствует о том, что в системе имеется равновесное состояние по всему диапазону изменения параметра ПКК  $\gamma$ . И если мы говорим в терминах теории Асакуры-Оосавы (depletion interacting), то в окрестностях концентрации 30% стержней в системе наблюдается равновесное состояние энтропии близкодействующего объёмного взаимодействия и дальнедействующей конфигурационной энтропии (по теориям Онзагера, Флори). Области изменения степенной зависимости параметра ПКК  $\gamma$  очень близки друг к другу при одной концентрации системы и разных осевых отношениях стержней (рис. 4), а при разных концентрациях стержней в системе – отличаются по величине.



**Рисунок 4 – Зависимость степенного показателя (коэффициент  $a_\gamma$ , ур. 2) в функции параметра ПКК  $\beta$**

а) область «А» – для малых значений ПКК  $\gamma$ ; б) область «Б» – для больших значений ПКК  $\gamma$ .  
Осевое отношение стержней: ●-6; ▲-15; ■-30; Длина вертикального отрезка, проходящего через символ, соответствует величине среднеквадратичной ошибки



**Рисунок 5 – Доля стержней, входящих в кластеры, в функции параметра ПКК  $\beta$  при различных значениях параметра  $\gamma$ , имеющего значения**

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

При осевом отношении стержней  $L/D = 6$  и различных концентрациях  
а) = 10%; б) = 30%; в) = 50%.

Поведение доли вхождения стержней системы в кластеры в функции параметра ПКК  $\beta$  имеет особенности, практически не зависящие от осевого отношения стержней и монотонно зависящие от концентрации стержней. На (рис. 5, 6) выявлены две области, линеаризующиеся в полулогарифмических координатах по параметру ПКК  $\beta$ :

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

где  $Y(\beta)$  – доля стержней в кластерах;  $b_0, b_1$  – константы, определяемые по расчётным данным численного эксперимента.

Области линеаризации «Г» и «Д» на (рис. 5, 6) отображаются двумя толстыми прямыми. Переходной интервал между областями «Г» и «Д» линеаризации данных «сшит» непрерывно и гладко полиномом третьей степени. Подгонка параметров прямых, области линеаризации и полинома «гладкой сшивки» с условием монотонности в переходной области, произведены по методу наименьших квадратов. На графиках (рис. 5, 6) переходной интервал отображается тонкой линией и в области наибольшей кривизны помечен пересечением коротким отрезком линии.

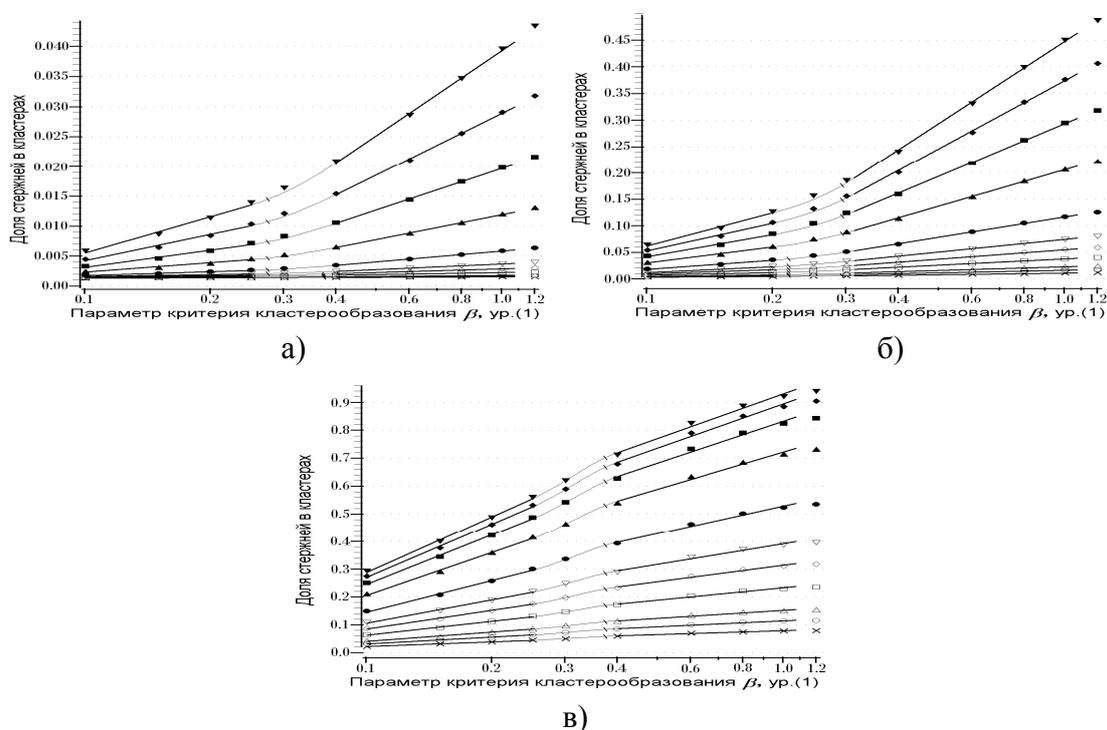


Рисунок 6 – Доля стержней, входящих в кластеры, в функции параметра ПКК  $\beta$  при различных значениях параметра  $\gamma$ , имеющего значения

$\times$ -0.1;  $\circ$ -0.125;  $\triangle$ -0.15;  $\square$ -0.2;  $\diamond$ -0.25;  $\nabla$ -0.3;  $\bullet$ -0.4;  $\blacktriangle$ -0.6;  $\blacksquare$ -0.8;  $\blacklozenge$ -1.0;  $\blacktriangledown$ -1.2;

При осевом отношении стержней  $L/D = 30$  и различных концентрациях

а) = 10%; б) = 30%; в) = 50%.

На рисунке 7 показана зависимость коэффициента  $b_1$  (ур.3; рис.5, 6) в функции параметра ПКК  $\gamma$ , видна слабая зависимость от осевого отношения стержней и монотонная зависимость от концентрации системы стержней. Сильное отличие в поведении стержней с осевым отношением  $L/D = 30$  при концентрации 50% можно объяснить структурным переходом в системе стержней от рыхлых кластеров к более плотным и регулярным, описанным в работе [16].

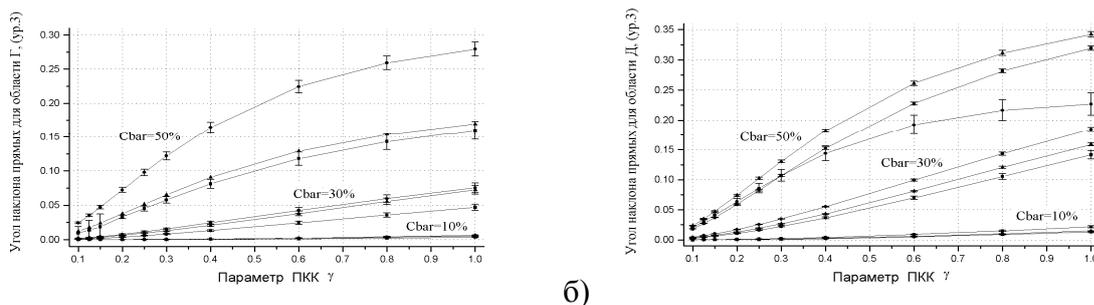


Рисунок 7 – Зависимость наклона линеаризованных прямых (рис. 5, 6) в функции параметра ПКК  $\gamma$

а) область «Г» – для малых значений ПКК  $\beta$ ; б) область «Д» – для больших значений ПКК  $\beta$ . Осевое отношение стержней: ●–6; ▲–15; ■–30; Длина вертикального отрезка, проходящего через символ, соответствует величине среднеквадратичной ошибки

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье были применены видоизменённые правила поиска спонтанно возникающих структур в системе стержней, описанных в работах [14, 15], данных в терминах взаимного расположения стержней модифицированной теории Асакуры-Оосавы [5]. Проведённые численные эксперименты показали, что в системе 2d-стержней, некоторые характеристики средних величин, спонтанно возникающих структур из стержней (агрегаты, кластеры) описываются универсальными зависимостями от параметров кластерообразования (ур. 1,  $\gamma$  и  $\beta$ ) в широком диапазоне осевых отношений и концентраций стержней в системе. Например, функциональная зависимость доли вхождения стержней в кластеры от параметров ПКК  $\gamma$  и  $\beta$  указывает на дуалистичность поведения системы стержней, то есть органического сочетания близкодействующих и дальнедействующих потенциалов взаимодействия. На малых поперечных расстояниях между поверхностями стержней (до 40% диаметра стержня; рис. 2, 3) и малых соосных продольных расстояниях между центрами стержней (до 40% длины стержня; рис. 5, 6) преобладает энтропия близкодействующего объёмного взаимодействия (depletion interacting), а на больших расстояниях преобладает дальнедействующее конфигурационное энтропийное взаимодействие. Для уточнения переходной области локализации между близкодействующим и дальнедействующим энтропийным взаимодействием необходимо проведение дальнейших исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Howard J. Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton [Текст] / J. Howard // Sinauer, Sunderland, MA, 2001, pp. 198–283.
- Doi M. The Theory of Polymer Dynamics [Текст] / M. Doi, S.F. Edwards // Clarendon, Oxford, 1986.
- Aranson I.S. Pattern formation of microtubules and motors: Inelastic interaction of polar rods [Текст] / I.S. Aranson, I.S. Tsimring // Physical Review E 71, 050901 (2005).
- Ziebert F. Pattern formation driven by nematic ordering of assembling biopolymers [Текст] / F. Ziebert, W. Zimmermann // Physical Review E 70, 022902 (2004).
- Galanis J. Depletion forces drive polymer-like self-assembly in vibrofluidized granular materials [Текст] / J. Galanis, R. Nossala, D. Harries // Soft Matter, 2010, 6, 1026–1034.
- Daniels L.J. Dynamics of gas-fluidized granular rods [Текст] / L.J. Daniels, Y. Park, T.C. Lubensky, D.J. Durian // Physical Review E. 79, 041301 (2009).
- Aranson I.S. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles [Текст] / I.S. Aranson, D. Volfson, S. Lev // Physical Review E 75, 051301 (2007).
- Bates M.A. Phase behavior of two-dimensional hard rod fluids [Текст] / M.A. Bates, D. Frenkel // J. of Chemical Physics 2000, V.112, N.22, p.10034-10041.
- Watanabe G. Orientational correlations in two-dimensional liquid crystals studied by molecular dynamics simulation [Текст] / G. Watanabe, J.I. Saito, N. Kato, Y. Tabe // J. Chem. Phys. 134, 054513 (2011).
- Ландау, Л.Д. О теории фазовых переходов. II [Текст] / Л.Д. Ландау // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1937, – Т. 7., – №3, – с.627

11. Stanley, H. E. Phase Transitions and Critical Phenomena [Текст] / H. E. Stanley // Oxford University Press: New York, – 1971
12. Varga S. Nematic-nematic phase separation in binary mixtures of thick and thin hard rods: Results from Onsager-like theories [Текст] / S. Varga, K. Purdy, A. Galindo, S. Fraden, G. Jackson // Physical Review E 72, 051704 (2005).
13. Varga S. Demixed and ordered phases in hard-rod mixtures [Текст] / S. Varga, A. Grabor, E. Velasco, L. Mederos, F.J. Vesely // Molecular Physics Vol. 106, No. 15, 2008, 1939–1947.
14. 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.
15. Шадрин И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры [Текст] / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012, №3 (293), С.3-9.
16. Шадрин И.Ф. Жёсткие стержни на двумерной поверхности. Кластеры II [Текст] / И.Ф. Шадрин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2012г, №4 (294), С.14-20.
17. А.Л. Эфрос "Физика и геометрия беспорядка" Библиотечка "Квант" в.19

**Шадрин Иван Фёдорович**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет - УНПК» г. Орел,  
канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе д. 29,  
E-mail: Ivshadr@mail.ru

I.F.SHADRIN

**RIGID CORES ON THE TWO-DIMENSIONAL SURFACE AND ABNORMAL ENTROPY INTERACTION. UNITS (CLUSTERS)**

*Computer modeling by the Monte-Carlo method is used for studying of local structure in system of the firm cores being on flat (2d) to a surface. Search of spontaneously arising structures from cores, is made by the certain rules applied to cores by having the general area of contact and is given in terms of a relative positioning of cores of the modified theory of Asakury-Oosava [5]. According to spontaneously arising structures from cores (units, clusters) are found two areas of linearization by criteria of a cluster formation. Functional dependence of a share of occurrence of cores in clusters from criteria of a cluster formation indicates a dualistic behavior of system of cores. At small distances between cores (cross-section ~ 40 % of diameter and ~30 % of coaxial longitudinal length on the centers of cores) prevail entropy of short-range volume interaction (depletion interacting), and at big distances long-range configuration entropic interaction prevails.*

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

**BIBLIOGRAPHY**

1. Howard J. Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton [Текст] / J. Howard // Sinauer, Sunderland, MA, 2001, pp. 198–283.
2. Doi M. The Theory of Polymer Dynamics [Текст] / M. Doi, S.F. Edwards // Clarendon, Oxford, 1986.
3. Aranson I.S. Pattern formation of microtubules and motors: Inelastic interaction of polar rods [Текст] / I.S. Aranson, I.S. Tsimring // Physical Review E 71, 050901 (2005).
4. Ziebert F. Pattern formation driven by nematic ordering of assembling biopolymers [Текст] / F. Ziebert, W. Zimmermann // Physical Review E 70, 022902 (2004).
5. Galanis J. Depletion forces drive polymer-like self-assembly in vibrofluidized granular materials [Текст] / J. Galanis, R. Nossala, D. Harries // Soft Matter, 2010, 6, 1026–1034.
6. Daniels L.J. Dynamics of gas-fluidized granular rods [Текст] / L.J. Daniels, Y. Park, T.C. Lubensky, D.J. Durian // Physical Review E. 79, 041301 (2009).
7. Aranson I.S. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles [Текст] / I.S. Aranson, D. Volfson, S. Lev // Physical Review E 75, 051301 (2007).
8. Bates M.A. Phase behavior of two-dimensional hard rod fluids [Текст] / M.A. Bates, D. Frenkel // J. of Chemical Physics 2000, V.112, N.22, p.10034-10041.
9. Watanabe G. Orientational correlations in two-dimensional liquid crystals studied by molecular dynamics simulation [Текст] / G. Watanabe, J.I. Saito, N. Kato, Y. Tabe // J. Chem. Phys. 134, 054513 (2011).
10. Landau, L.D. О теории фазовых переходов. II [Текст] / L.D. Landau // Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoj fiziki. – 1937, – Т. 7., – №3, – с.627

11. Stanley, H. E. Phase Transitions and Critical Phenomena [Tekst] / H. E. Stanley // Oxford University Press: New York, – 1971
12. Varga S. Nematic-nematic phase separation in binary mixtures of thick and thin hard rods: Results from Onsager-like theories [Tekst] / S. Varga, K. Purdy, A. Galindo, S. Fraden, G. Jackson // Physical Review E 72, 051704 (2005).
13. Varga S. Demixed and ordered phases in hard-rod mixtures [Tekst] / S. Varga, A. Grabor, E. Velasco, L. Mederos, F.J. Vesely // Molecular Physics Vol. 106, No. 15, 2008, 1939–1947.
14. 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.
15. Shadrin I.F. Zhjostkie sterzhni na dvumernoj poverhnosti. Klastery [Tekst] / I.F. Shadrin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2012, №3 (293), S.3-9.
16. Shadrin I.F. Zhjostkie sterzhni na dvumernoj poverhnosti. Klastery II [Tekst] / I.F. Shadrin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii, 2012g, №4 (294), S.14-20.
17. A.L. Jefros "Fizika i geometrija besporjadka" Bibliotekha "Kvant" v.19

**Shadrin Ivan Fyodorovich**

FGBOU VPO "State University - UNPK", Orel

edging. the physical. - a mat. sciences, associate professor of "Physicist"

302020. Orel, 29 Naugorskoye Highway,

E-mail: Ivshadr@mail.ru

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.436

В.А. ЛАШКО, А.Н. БЕРДНИК

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ ПОРШНЕВЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*В статье рассматриваются особенности физического моделирования процессов в системах воздухообеспечения поршневых комбинированных двигателей с одно- и двухступенчатым наддувом на «холодных моделях». На основе анализа размерностей и  $\Pi$  - теоремы определены критерии подобия физического моделирования термогазодинамических процессов в агрегатах наддува. Проанализирована система критериев газодинамического и теплового подобия с точки зрения необходимого минимума критериев для обеспечения подобия процессов в агрегатах наддува.*

**Ключевые слова:** физическое моделирование, система воздухообеспечения, комбинированный поршневой двигатель, агрегаты наддува, теория размерностей,  $\Pi$  - теорема, критерии подобия.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В теории турбомашин широко используется моделирование различных явлений, происходящих в агрегатах наддува. Моделирование, как известно, есть замена рассматриваемого реального процесса изучением аналогичного явления на модели. Результаты испытаний модели можно использовать для оценки протекания процессов в агрегатах наддува только в том случае, если параметры работы модели и агрегатов наддува подобны.

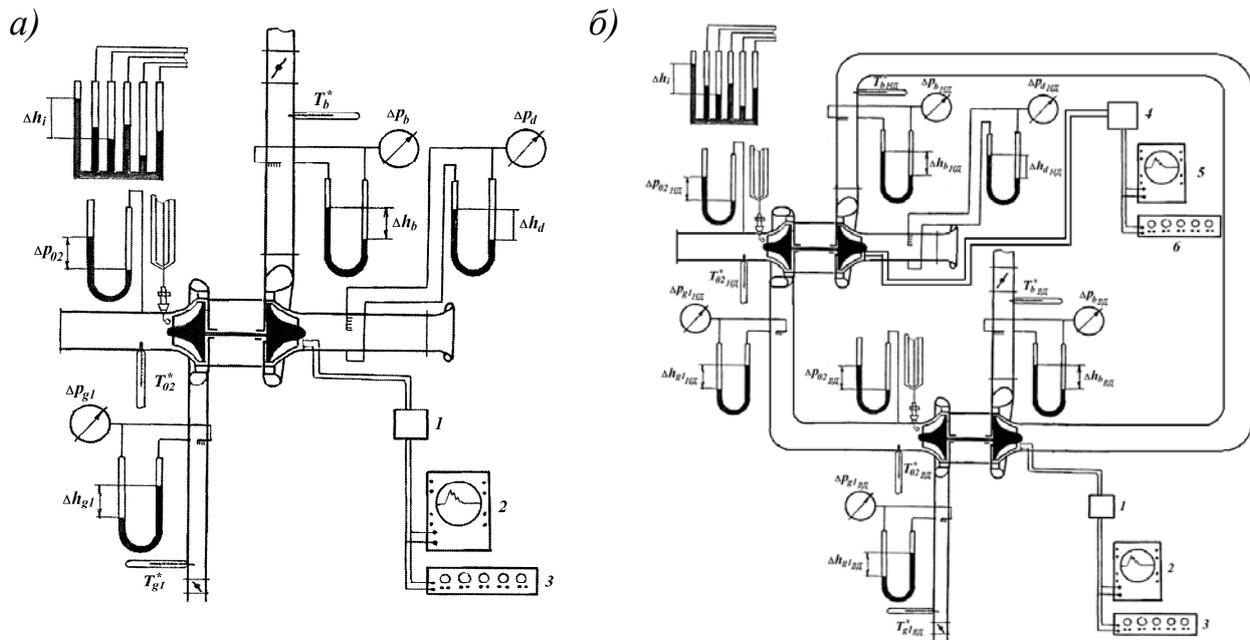
Отсутствие надёжных методов не позволяет определять характеристики турбин расчётным путём и оценивать влияние различных конструктивных факторов на их протекание. Необходимость проведения экспериментальных исследований в первую очередь обусловлена тем, что надёжная оценка достоверности разработанной математической модели может быть получена только путём сопоставления расчётных данных с результатами экспериментов. Это обстоятельство приводит к необходимости получать характеристики экспериментально на специальных стендах [1,2].

В качестве объекта исследования для получения экспериментальных характеристик турбин и компрессоров может быть использован стенд для продувки турбин и компрессоров типа ТКР-14 [3], расположенный в лаборатории кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» ТОГУ. Стенд включает в себя две воздуходувки ТВ-42, соединённых последовательно для получения необходимого напора перед турбиной, систему смазывания подшипников турбокомпрессора, трубопроводы с регулировочными задвижками, позволяющими устанавливать необходимый режим работы турбокомпрессора, и измерительные приборы для измерения давления, температуры и частоты вращения ротора турбокомпрессора. Схемы экспериментальных стендов для систем воздухообеспечения с одно- и двухступенчатым наддувом представлены на рисунке 1.

Экспериментальное исследование турбин проводится на воздухе [3,4].

Использование воздуха в качестве рабочего тела имеет следующие преимущества:

1. Небольшая температура рабочего тела позволяет использовать для проточных частей турбины значительно менее термостойкие материалы. Например, композиты на основе эпоксидных смол.
2. Можно использовать приёмники давления с меньшими отверстиями, так как при работе на воздухе уменьшается их засорение. Такие приёмники давления вносят меньшую погрешность измерения давления.
3. Возможность отказаться от системы охлаждения турбины.



**Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда**

*а) для системы воздухообеспечения с одноступенчатым наддувом:*

*1 – усилитель датчика; 2 – осциллограф; 3 – счётчик импульсов;*

*б) для системы воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом:*

*1 – усилитель датчика ТКВД; 2 – осциллограф ТКВД; 3 – счётчик импульсов ТКВД;*

*4 – усилитель датчика ТКНД; 5 – осциллограф ТКНД; 6 – счётчик импульсов ТКНД*

В качестве тормоза турбины используется штатный компрессор турбокомпрессора. При этом регулирование нагрузки производится изменением расхода воздуха через компрессор с помощью заслонки, установленной на его выходе.

Для оценки протекания процессов в агрегатах наддува основные условия подобия следующие [4]:

- геометрическое подобие элементов агрегатов наддува;
- подобие физических параметров в сходственных пространственно-временных точках агрегатов наддува;
- равенство критериев термогазодинамического подобия для сходственных пространственно-временных точек агрегатов наддува.

Предварительное исследование протекания процессов в агрегатах наддува на подобных поршневых комбинированных двигателях с целью получения ожидаемых результатов на новых двигателях наиболее желательно. Однако это большей частью невозможно осуществить, так как в производстве не оказывается ни двигателя, ни агрегатов наддува подобных по конструкции вновь создаваемым. Поэтому при отработке протекания процессов в агрегатах наддува широко используются «холодные модели». Особенность такого моделирования состоит в том, что на «холодной модели» воспроизводится картина протекания процессов «горячего» агрегата наддува. Следовательно, протекание процессов на «холодной модели» и на «горячем» агрегате наддува должны быть подобными. В связи с этим отдельные величины, входящие в критерии подобия, можно изменять таким образом, чтобы критерии оставались одинаковыми при соблюдении других условий подобия. Выполнение условий подобия для «холодной модели» и «горячего» агрегата наддува имеет свои специфические особенности.

Третье условие – равенство критериев термогазодинамического подобия для сходственных сечений модели и агрегата наддува реального двигателя в сходственные моменты времени выполнить также трудно. Обеспечение равенства критериев подобия в агрегате наддува реального двигателя и в модели усложняется тем, что имеются ограничения в выборе газов, имитирующих отработавшие газы, входящие в турбину.

Всё вышесказанное приводит к тому, что моделирование протекания процессов в агрегатах наддува является приближённым. Однако и при таком моделировании можно решать целый ряд практических задач: более обоснованно выбирать конструкцию и размеры агрегатов наддува, строить характеристики агрегатов наддува в зависимости от режимов работы комбинированного поршневого двигателя и т. д.

Таблицу основных параметров, определяющих явление, всегда можно написать, если задача сформулирована математически. Для этого нужно отметить все размерные и безразмерные величины, которые необходимо и достаточно задать для того, чтобы численные значения всех искомых величин определялись уравнениями задачи. Среди определяющих параметров должны обязательно быть величины с размерностями, через которые могут выразиться размерности всех зависимых параметров.

Система уравнений, описывающая протекание процессов в агрегатах наддува и на участках прямых труб систем выпуска и впуска в общей постановке, если записать её в проекциях на оси пространственных координат, будет выглядеть очень громоздко [3,4,5,6]. Приведём её в компактной операторной форме, удобной с точки зрения анализа протекающих процессов в агрегатах наддува:

- уравнение состояния

$$f(p, \rho, T) = 0; \quad (1)$$

- уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{w} = 0; \quad (2)$$

- уравнение движения

$$\rho \left( \frac{d\vec{w}}{dt} \right) = \operatorname{div} \bar{P}; \quad (3)$$

- уравнение энергии

$$\rho \frac{d \left( U + \frac{w_i^2}{2} \right)}{dt} = \operatorname{div} (\bar{P} \vec{w}) + \operatorname{div} \left( \mu \operatorname{grad} \left( \frac{i \lambda}{\mu c_p} \right) \right); \quad (4)$$

- уравнение теплообмена

$$\alpha = - \frac{\lambda}{T_w - T} \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_s, \quad (5)$$

где  $p, \rho, T$  – соответственно давление, плотность и температура газов;

$t$  – время;

$\vec{w}$  – вектор скорости;

$\bar{P}$  – тензор напряжений;

$U$  – полная внутренняя энергия газов;

$w$  – скорость потока;

$i = 1, 2, 3; (x, y, z)$ ;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости газов;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности газов;

$c_p$  – теплоёмкость газов при постоянном давлении;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;

$T_w$  – температура поверхности тела, омываемая газом;

$n$  – нормаль к поверхности тела; индекс «s» означает, что производная берётся на поверхности тела (процесс теплообмена рассматривается на границах тела).

Таким образом, уравнения (1) – (5) составляют замкнутую систему уравнений, описывающую протекание процессов в агрегатах наддува и на участках прямых труб систем выпуска и впуска.

После составления системы уравнений (1) – (5) математическая сторона задачи об определении качества протекания процессов в агрегатах наддува сводится к интегрированию уравнений. Однако интегрирование этих уравнений в общем виде в настоящее время невозможно. Поэтому прибегают к целому ряду допущений, которые упрощают решение задачи. Для улучшения совпадения результатов аналитического расчёта с данными практики широко используют опытные коэффициенты. Однако при использовании результатов экспериментального исследования необходимо прежде всего выяснить, при каких условиях эти результаты можно применять для оценки протекания других явлений этого же класса, что и исследованное. Ответ на этот вопрос даёт теория подобия.

Следует отметить, что уравнениям (1) – (5) отвечают не определённые, единственно возможные значения величин, а бесчисленное множество различных значений. Но в самих уравнениях нет никаких признаков, по которым можно было бы отличить именно ту совокупность значений, которая относится к течению газов в агрегатах наддува. Поэтому система уравнений должна быть дополнена условиями, которые могли бы послужить достаточными признаками для выбора значений, отвечающих конкретному случаю. Эти условия называются условиями однозначности [3,4,5,6].

Величины, содержащиеся в уравнениях и условиях однозначности, можно сгруппировать в комплексы. Число безразмерных комплексов будет меньше числа размерных величин.

Для практического использования теории подобия необходимо знать, как привести уравнения (1) – (5) к безразмерному виду. Это можно сделать с помощью метода масштабных преобразований [4,5,6].

Таким образом, система уравнений (1) – (5), переписанная через масштабные коэффициенты и преобразованная, определяет необходимые условия, при которых два газовых потока будут подобны. Из анализа этой системы получают основные критерии подобия: Рейнольдса  $Re$ , Эйлера  $Eu$ , Маха  $M$ , Фруда  $Fr$ , Струхалия  $Sh$ , Нуссельта  $Nu$ , Пекле  $Pe$ , Прандтля  $Pr$ , Фурье  $Fo$ , Грасгофа  $Gr$ , Стентона  $St$  и показатель адиабаты  $k$  [4,5,6]. Критерии  $Re$ ,  $Eu$ ,  $M$ ,  $Fr$ ,  $Sh$  и  $k$  называют критериями гидродинамического подобия. Они определяются из уравнений состояния, движения и неразрывности. А критерии  $Nu$ ,  $Pe$ ,  $Pr$ ,  $Fo$ ,  $Gr$  и  $St$  называют критериями теплового подобия [5,6]. Они определяются из уравнений энергии и теплообмена.

Для выполнения третьего условия необходимо обеспечить равенство критериев термогазодинамического подобия для сходственных сечений модели и агрегата наддува реального двигателя в сходственные моменты времени.

Обычно для течений в лопаточных машинах влияние гравитационного поля невелико, поэтому можно исключить критерий  $Fr$  [7].

Выбор величины безразмерных комплексов – критериев подобия – устанавливается на основании так называемой  $\pi$ -теоремы [7,8].

При решении задач механики достаточно установить четыре параметра с независимой размерностью: длина  $L$ , масса  $m$ , время  $t$  и температура  $T$ . Выбор тех или иных определяющих параметров обуславливается только практическими соображениями: простотой их экспериментального определения, удобствами расчётов и т. д.

Всякое физическое соотношение между размерными величинами можно сформулировать как соотношение между безразмерными величинами. В этом и заключается основная идея теории размерностей к исследованию механических задач [7].

Таким образом, на основании вышеизложенного можно составить таблицу основных определяющих параметров для охлаждаемой турбины (см. табл. 1).

На основании теории размерностей определим критерии подобия процессов в охлаждаемой турбине.

Из таблицы 1 видно, что число основных определяющих параметров для охлаждаемой турбины  $n = 15$ . Число основных единиц измерения  $r = 4$ : метр, килограмм, секунда и градус

Кельвина. Для подобия процессов в охлаждаемой турбине согласно  $\pi$  - теореме необходимо образовать  $n - r = 11$  безразмерных комплекса. Для этого надо составить систему из одиннадцати уравнений размерностей.

Некоторые из критериев подобия очевидны:

1.  $\pi_1 = c_{p_2} / c_{v_2} = c_{p_2} / (c_{p_2} - R_2) = k_2$  – показатель адиабаты для выпускных газов,

где  $c_{v_2}$  – теплоёмкость выпускных газов при постоянном объёме.

Таблица 1 – Обозначения и размерность параметров

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Размерность
1	Диаметр рабочего колеса	$D_{p.k_m}$	$L$ (м)
2	Частота вращения ротора	$n$	$t^{-1}$ (мин <sup>-1</sup> )
3	Время	$t$	$t$ (с)
4	Абсолютная скорость газов на входе	$c_1$	$L t^{-1}$ (м/с)
5	Полное давление газов на входе в турбину	$p_{g1}^*$	$L^{-1} m t^{-2}$ (кг/(м·с <sup>2</sup> ))
6	Температура заторможенного потока газов на входе в турбину	$T_{g1}^*$	$T$ (К)
7	Статическое давление газов за турбиной	$p_{g2}$	$L^{-1} m t^{-2}$ (кг/(м·с <sup>2</sup> ))
8	Газовая постоянная для выпускных газов	$R_2$	$L^2 t^{-2} T^{-1}$ (м <sup>2</sup> /(с <sup>2</sup> ·К))
9	Коэффициент динамической вязкости	$\mu_m$	$m L^{-1} t^{-1}$ (кг/(м·с))
10	Коэффициент теплоотдачи	$\alpha$	$m t^{-3} T^{-1}$ (кг/(с <sup>3</sup> ·К))
11	Коэффициент теплопроводности газов	$\lambda_2$	$L m t^{-3} T^{-1}$ ((кг·м)/(с <sup>3</sup> ·К))
12	Удельная теплоёмкость газов при постоянном давлении	$c_{p_2}$	$L^2 t^{-2} T^{-1}$ (м <sup>2</sup> /(с <sup>2</sup> ·К))
13	Коэффициент объёмного расширения	$\beta$	$T^{-1}$ (1/К)
14	Температура стенки корпуса турбины	$T_{cm}$	$T$ (К)
15	Ускорение свободного падения	$g$	$L t^{-2}$ (м/с <sup>2</sup> )

$$2. \pi_2 = u_m / c_{ad} = \frac{\pi D_{p.к.м} n}{60 \sqrt{\frac{2k_2}{(k_2 - 1)} R_2 T_{g1}^* \left[ 1 - \left( \frac{p_{g2}}{p_{g1}^*} \right)^{\frac{k_2 - 1}{k_2}} \right]}} = M \text{ – число Маха по окруж-}$$

ной скорости рабочего колеса турбины  $u_m$  при  $k_2 = \text{const}$ , где  $c_{ad}$  – условная адиабатная скорость газов, соответствующая полному теплоперепаду  $H_m$  в турбине.

Остальные девять критериев подобия могут быть найдены независимо друг от друга согласно общей формуле  $\pi$  - теоремы:

$$1. \frac{1}{\pi_3} = \frac{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}{\mu_m}. \text{ Очевидно, что } \delta = -1,0; \varepsilon = 1,0; \sigma = -1,0; \xi = 0. \text{ Тогда}$$

окончательно получим  $\frac{1}{\pi_3} = \frac{D_{p.к.м} c_1 \rho_{g1}}{\mu_m} = \frac{D_{p.к.м} c_1 p_{g1}^*}{R_2 T_{g1}^* \mu_m} = Re$ , где  $\rho_{g1}$  – плотность газов на входе в турбину.

$$2. \pi_4 = \frac{p_{g2}}{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}. \text{ Очевидно, что } \delta = -1,0; \varepsilon = 1,0; \sigma = -2,0; \xi = 0. \text{ Тогда}$$

окончательно получим  $\pi_4 = \frac{p_{g2}}{\rho_{g1} c_1^2} = \frac{p_{g2} R_2 T_{g1}^*}{p_{g1}^* c_1^2} = Eu$ .

$$3. \pi_5 = \frac{c_1}{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}. \text{ Очевидно, что } \delta = 1,0; \varepsilon = 0; \sigma = -1,0; \xi = 0. \text{ Тогда оконча-}$$

тельно получим  $\pi_5 = \frac{c_1 t}{D_{p.к.м}} = \frac{c_1 t}{D_{p.к.м}} = Sh$ . При расчёте турбины критерий Струхалия  $Sh$

учитывается в виде характеристического числа  $u_m / c_1$ , обеспечивающее подобие треугольников скоростей [2].

$$4. \pi_6 = \frac{\alpha}{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}. \text{ Очевидно, что } \delta = 0; \varepsilon = 1,0; \sigma = -3,0; \xi = -1,0. \text{ Тогда}$$

окончательно получим  $\pi_6 = \frac{\alpha D_{p.к.м}}{\lambda_2} = Nu$ .

$$5. \frac{1}{\pi_7} = \frac{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}{\lambda_2}. \text{ Очевидно, что } \delta = 1,0; \varepsilon = 1,0; \sigma = -3,0; \xi = -1,0. \text{ Тогда}$$

окончательно получим  $\frac{1}{\pi_7} = \frac{\mu_m c_{p_2}}{\lambda_2} = Pr$ .

$$6. \pi_8 = \frac{a}{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}, \text{ где } a \text{ – коэффициент температуропроводности; } a = \frac{\lambda_2}{c_{p_2} \rho_{g1}}.$$

Очевидно, что  $\delta = 2,0; \varepsilon = 0; \sigma = -1,0; \xi = 0$ . Тогда окончательно получим

$$\pi_8 = \frac{a t}{D_{p.к.м}^2} = \frac{\lambda_2 t}{c_{p_2} \rho_{g1} D_{p.к.м}^2} = \frac{\lambda_2 t R_2 T_{g1}}{c_{p_2} p_{g1}^* D_{p.к.м}^2} = Fo.$$

$$7. \frac{1}{\pi_9} = \frac{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}{a}. \text{ Очевидно, что } \delta = 2,0; \varepsilon = 0; \sigma = -1,0; \xi = 0. \text{ Тогда окончательн}$$

$$\text{ательно получим } \frac{1}{\pi_9} = \frac{c_1 D_{p.k_m}}{a} = \frac{c_1 D_{p.k_m} c_{p_2} \rho_{g1}}{\lambda_2} = \frac{c_1 D_{p.k_m} c_{p_2} p_{g1}^*}{\lambda_2 R_2 T_{g1}^*} = \text{Re Pr} = \text{Pe}.$$

$$8. \pi_{10} = \frac{\alpha}{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}. \text{ Очевидно, что } \delta = 0; \varepsilon = 1,0; \sigma = -3,0; \xi = -1,0. \text{ Тогда}$$

$$\text{окончательно получим } \pi_{10} = \frac{\alpha}{\rho_{g1} c_1 c_{p_2}} = \frac{\alpha R_2 T_{g1}^*}{p_{g1}^* c_1 c_{p_2}} = \frac{\text{Nu}}{\text{Pe}} = \text{St}.$$

$$9. \frac{1}{\pi_{11}} = \frac{L^\delta m^\varepsilon t^\sigma T^\xi}{\nu^2}, \text{ где } \nu - \text{ коэффициент кинематической вязкости. Очевидно,}$$

что  $\delta = 4,0; \varepsilon = 0; \sigma = 0; \xi = 2,0$ . Тогда окончательно получим

$$\frac{1}{\pi_{11}} = \frac{D_{p.k_m}^3 g}{\nu^2} = \frac{D_{p.k_m}^3 g \rho_{g1}}{\mu_m^2} = \frac{D_{p.k_m}^3 g p_{g1}^{*2}}{R_2^2 T_{g1}^{*2} \mu_m^2}. \text{ Если в выражение } \frac{1}{\pi_{11}} \text{ добавить безразмер-}$$

$$\text{ный комплекс } \beta \Delta T = \beta (T_{g1}^* - T_{cm}), \text{ то получим } \frac{1}{\pi_{11}} = \frac{D_{p.k_m}^3 g \beta (T_{g1}^* - T_{cm}) p_{g1}^{*2}}{R_2^2 T_{g1}^{*2} \mu_m^2} = \text{Gr}.$$

Таким образом, использование теории размерностей позволяет записать следующие зависимости для основных безразмерных параметров, характеризующих процессы в охлаждаемых турбинах:

$$\left. \begin{aligned} \eta_m &= f_1(\text{Re}; \text{Eu}; \text{M}; u_m/c_1; k_2; \text{Nu}; \text{Pe}; \text{Pr}; \text{Fo}; \text{St}; \text{Gr}) \\ \pi_m &= f_2(\text{Re}; \text{Eu}; \text{M}; u_m/c_1; k_2; \text{Nu}; \text{Pe}; \text{Pr}; \text{Fo}; \text{St}; \text{Gr}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\eta_m$  – эффективный КПД турбины;

$\pi_m$  – степень понижения давления в турбине.

Соотношения (6) дают представления характеристик охлаждаемых турбин в критериальной форме. По сравнению с зависимостями  $\eta_m$  и  $\pi_m$ , записанными для размерных определяющих параметров, которых было 15, число критериальных параметров сокращено на четыре. Такое представление характеристик является наиболее общим и учитывает влияние расчётных, конструктивных и эксплуатационных факторов на параметры любой турбины. Однако зависимости (6) достаточно громоздки, поэтому их необходимо упростить.

На основании второй теоремы подобия зависимость между переменными, характеризующими какой-либо процесс, может быть представлена в виде зависимости между числами подобия. Функциональная зависимость между числами подобия называется уравнением подобия. При конвективном теплообмене уравнение подобия в общем случае имеет следующий вид [5,6,7]:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}; \text{Pr}; \text{Gr}). \quad (7)$$

Критерий Pe можно не включать в зависимость (7) по причине того, что критерии Re и Pr в неё уже входят.

Критерий St является безразмерным коэффициентом теплоотдачи и определяется отношением  $\frac{\text{Nu}}{\text{Pe}} = \frac{\text{Nu}}{\text{RePr}}$ . А так как критерии Re и Pr уже входят в зависимость (7), то и критерий St можно не включать в эту зависимость.

В случае турбулентного режима теплообмена используются критерии подобия, включающие в себя производные по времени от граничных условий, например температуры стенки. При этом время (критерий  $Fo$ ) в зависимость (7) явно не входит. Данную ситуацию называют локально-временным подобием [5].

Для течений, когда подъёмная сила мала по сравнению с силами трения, вызываемых вынужденными конвективными течениями, критерий  $Gr$  можно исключить из зависимости (7) [7].

Таким образом, зависимость для числа Нуссельта для охлаждаемой турбины будет следующей:

$$Nu = f(Re; Pr). \quad (8)$$

Кроме критериев (8) в теории турбомашин используется безразмерная температура [5,6,7,9]

$$\theta = \frac{T_{g1}^* - T_{cm}}{T_{g1}^* - T_{охл}}, \quad (9)$$

где  $T_{охл}$  – температура охлаждающей среды.

Отвод тепла от газового потока уменьшает располагаемую работу расширения газов, т.е. работу расширения при отсутствии гидравлических потерь. Однако анализ экспериментальных данных показывает, что это уменьшение не превышает долей процента от адиабатного теплоперепада [9]. Также следует отметить, что, во-первых, обеспечить равенство критериев теплового подобия практически невозможно, в особенности при газодинамических исследованиях, когда система охлаждения лопаток турбины предназначена по существу лишь для подвода и отвода охлаждающей жидкости к корпусу турбины [10], во-вторых, закон изменения температуры должен быть таков, чтобы физические параметры газов в модели и в агрегате наддува реального двигателя оставались бы всё время подобными. Осуществить эти условия в полной мере для оценки протекания процессов в турбине на «холодной модели» не представляется возможным, так как исследования осуществляют при температуре воздуха, входящего в турбину, немного выше температуры окружающей среды.

Таким образом, критерии теплового подобия  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Fo$ ,  $Gr$  и  $St$  можно не включать в систему (6).

Число Прандтля существенно зависит от атомности газов [3,5,6,7]. Поскольку характеристики турбин рассматриваются для определённых газов, критерий  $Pr$  можно считать постоянным и не включать его в число критериев подобия в данном случае.

Из рассмотрения критерия  $Eu$  следует, что если газы в подобных агрегатах наддува по своему составу одинаковы, то выполняется условие  $k_2 = idem$ . Следовательно, если выполняется условие  $M = idem$ , то для процессов в подобных агрегатах наддува автоматически выполняется также требование и  $Eu = idem$  [4]. Однако обеспечение равенства критерия подобия  $k_2$  в турбине агрегата наддува реального двигателя и в модели усложняется тем, что моделирование процессов в турбине осуществляется на «холодной модели», которая лишь имитирует отработавшие газы, входящие в турбину. Поэтому не удастся обеспечить выполнение условия  $k_2 = idem$ . Следовательно, критерий подобия  $k_2$  из зависимостей (6) мы исключаем.

А так как условие  $k_2 = idem$  не выполняется, то и условие  $Eu = idem$  также не выполняется.

Экспериментальные исследования турбин [2,3,7] показывают, что их параметры зависят от числа  $Re$  немонотонно, т. е. начиная с некоторого числа Рейнольдса, наступает так называемая область автомодельности по числу  $Re$ , когда параметры турбины от него не зависят. Имея в виду область автомодельности, можно число  $Re$  не включать в зависимости (6).

Таким образом, имея в виду выполнение условий геометрического подобия, можно выписать наиболее сильно влияющие на характеристику охлаждаемой турбины факторы: число  $M$  и критерий  $u_m/c_1$ . С учётом сказанного характеристика турбины представляется в виде зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \eta_m &= f_1(M; u_m/c_1) \\ \pi_m &= f_2(M; u_m/c_1) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В соотношениях (10) можно рассмотреть другие безразмерные определяющие параметры, не изменяя их числа. Так, вместо числа  $M$  можно использовать приведённую скорость  $\lambda$  или газодинамическую функцию  $q(\lambda)$ , которая характеризует расход газов. При  $k_2 = \text{const}$  величины  $M$ ,  $\lambda$  и  $q(\lambda)$  однозначно связаны, что и определяет возможность их использования в рассматриваемом случае.

Если разделить числитель и знаменатель параметра  $u_m/c_1$  на критическую скорость  $a_{кр}$ , то получим ещё два критерия, которые можно использовать вместо параметра  $u_m/c_1$ :

$$\frac{u_m/a_{кр}}{c_1/a_{кр}} = \frac{\lambda_{u_m}}{\lambda_{c_1}}.$$

Так как параметр  $\lambda_{c_1}$  уже учтён при использовании критерия  $q(\lambda)$ , то зависимости (10) примут вид

$$\left. \begin{aligned} \eta_m &= f_1(q(\lambda_{c_1}); \lambda_{u_m}) \\ \pi_m &= f_2(q(\lambda_{c_1}); \lambda_{u_m}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

При построении характеристик турбины используются не параметры  $q(\lambda_{c_1})$  и  $\lambda_{u_m}$ , а величины им пропорциональные.

Уравнение расхода через сопловой аппарат турбины определяется как [2,7]

$$G_{ca} = \frac{S p_{g1}^* F_{ca} q(\lambda_{c_1})}{\sqrt{T_{g1}^*}}, \quad (12)$$

где  $S = \sqrt{k_2 \left( \frac{2}{k_2 + 1} \right)^{\frac{k_2 + 1}{k_2 - 1}} \frac{1}{R_2}}$ ;  $F_{ca}$  – минимальное сечение соплового аппарата турбины;

$F_{ca} = t_c b_{ca} \sin \alpha_1$ ;  $t_c$  – шаг лопаток на выходе из соплового аппарата турбины;  $b_{ca}$  – высота сопловых лопаток турбины;  $\alpha_1$  – угол потока газов на выходе из соплового аппарата турбины.

Если учитывать подобие треугольников скоростей и считать, что величина  $S$ , зависящая от  $k_2$  и  $R_2$ , есть величина постоянная, то комплекс  $G_{ca} \frac{\sqrt{T_{g1}^*}}{p_{g1}^*} = S F_{ca} q(\lambda_{c_1}) \sin \alpha_1$  однозначно зависит от  $q(\lambda_{c_1})$ . Поэтому часто используется вместо критерия  $q(\lambda_{c_1})$  величина

ему пропорциональная  $G_{ca_{np}} = G_{ca} \frac{\sqrt{T_{g1}^*}}{p_{g1}^*}$ , называемая приведённым расходом газов через сопловой аппарат турбины. Опуская индекс «ca» получается общепринятая зависимость

приведённого расхода газов через входное сечение турбины  $G_{np} = \frac{G \sqrt{T_{g1}^*}}{p_{g1}^*}$ , где  $G$  – действительный расход газов в турбине [2,7].

Величина критерия  $\lambda_{u_m}$  может быть записана так:

$$\lambda_{u_m} = \frac{u_{mcp}}{a_{кр}} = \frac{\pi (D_{p.к_m})_{cp} n}{60 \sqrt{\frac{2k_2}{k_2+1} R_2 T_{g1}^*}}, \quad (13)$$

где  $(D_{p.к_m})_{cp} = \sqrt{\frac{(D_{p.к_m2})^2 + (D_{p.к_m вт})^2}{2}}$ ;  $D_{p.к_m2}$  – диаметр рабочего колеса турбины на выходе;  $D_{p.к_m вт}$  – диаметр втулки рабочего колеса турбины.

При неизменных  $k_2$ ,  $R_2$  и  $(D_{p.к_m})_{cp}$  критерий  $\lambda_{u_m}$  однозначно связан с величиной  $\frac{n}{\sqrt{T_{g1}^*}}$ . Поэтому часто используется вместо критерия  $\lambda_{u_m}$  величина ему пропорциональная

$n_{np} = \frac{n}{\sqrt{T_{g1}^*}}$ , называемая приведённой частотой вращения турбины [2,3,7].

Таким образом, с учётом сказанного характеристика турбины представляется в виде зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \eta_m &= f_1 \left( \frac{G \sqrt{T_{g1}^*}}{P_{g1}^*}; \frac{n}{\sqrt{T_{g1}^*}} \right) \\ \pi_m &= f_2 \left( \frac{G \sqrt{T_{g1}^*}}{P_{g1}^*}; \frac{n}{\sqrt{T_{g1}^*}} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Следует отметить, что если в качестве критериев используются величины уравнения (14), то такие характеристики соответствуют определённой турбине, в то время как характеристики турбины в виде (11) соответствуют всем геометрически подобным турбинам.

В двухступенчатой системе воздухообеспечения поршневого двигателя критерии подобия (11), определяющие режим работы турбин, связаны между собой дополнительным условием. Это условие газодинамической связи, заключающееся в равенстве расходов газов через турбину высокого давления (ВД) и турбину низкого давления (НД).

Используя соотношение (12), составим уравнение неразрывности течения газов между минимальными сечениями соплового аппарата турбины ВД и соплового аппарата турбины НД:

$$G = \frac{\sigma_{caВД} S_{ВД} P_{g1ВД}^* F_{caВД} (q(\lambda_{c1}))_{ВД}}{\sqrt{T_{g1ВД}^*}} = \frac{\sigma_{caНД} S_{НД} P_{g1НД}^* F_{caНД} (q(\lambda_{c1}))_{НД}}{\sqrt{T_{g1НД}^*}},$$

где  $\sigma_{caВД}$ ,  $\sigma_{caНД}$  – коэффициенты полного давления, учитывающие потери при течении газов от входа до минимальных сечений сопловых аппаратов соответственно турбины ВД и турбины НД.

Учитывая, что  $S_{ВД} = S_{НД} = \text{const}$ ,  $\frac{T_{g1НД}^*}{T_{g1ВД}^*} = \left( \frac{P_{g1НД}^*}{P_{g1ВД}^*} \right)^{\frac{k_2-1}{k_2}} = \frac{1}{\pi_{mВД}^{\frac{k_2-1}{k_2}}}$  [11], где

$\pi_{mВД}$  – степень понижения давления в турбине ВД, а также считая, что  $\sigma_{caВД} = \sigma_{caНД}$ , получим

$$\pi_{m_{ВД}}^{\frac{k_2+1}{2k_2}} = \frac{F_{ca_{НД}}(q(\lambda_{c_1}))_{НД}}{F_{ca_{ВД}}(q(\lambda_{c_1}))_{ВД}}$$

или

$$\pi_{m_{ВД}} = \left[ \frac{F_{ca_{НД}}(q(\lambda_{c_1}))_{НД}}{F_{ca_{ВД}}(q(\lambda_{c_1}))_{ВД}} \right]^{\frac{2k_2}{k_2+1}} = \left[ \bar{F}_{ca} \frac{(q(\lambda_{c_1}))_{НД}}{(q(\lambda_{c_1}))_{ВД}} \right]^{\frac{2k_2}{k_2+1}}, \quad (15)$$

где  $\bar{F}_{ca} = \frac{F_{ca_{НД}}}{F_{ca_{ВД}}}$ .

Соотношение (15) показывает, что если известен режим работы турбины ВД ( $\lambda_{c_1}$  и  $\pi_{m_{ВД}}$ ), то однозначно определится параметр  $(q(\lambda_{c_1}))_{НД}$  турбины НД.

Тогда суммарная степень понижения давления в турбинах системы воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом определяется как

$$\begin{aligned} \pi_{m_{\Sigma}} = \pi_{m_{ВД}} \pi_{m_{НД}} &= \left[ \frac{F_{ca_{НД}}(q(\lambda_{c_1}))_{НД}}{F_{ca_{ВД}}(q(\lambda_{c_1}))_{ВД}} \right]^{\frac{2k_2}{k_2+1}} \left[ \frac{F_{mp}(q(\lambda_c))_{mp}}{F_{ca_{НД}}(q(\lambda_{c_1}))_{НД}} \right]^{\frac{2k_2}{k_2+1}} = \\ &= \left[ \frac{F_{mp}(q(\lambda_c))_{mp}}{F_{ca_{ВД}}(q(\lambda_{c_1}))_{ВД}} \right]^{\frac{2k_2}{k_2+1}}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\pi_{m_{НД}}$  – степень понижения давления в турбине НД;

$F_{mp}$  – площадь сечения выпускного тракта за турбиной НД;

$\lambda_c$  – приведённая скорость газов в узком сечении выпускного тракта за турбиной НД.

Из соотношения (16) видно, что при одинаковых секундных расходах газов через обе турбины приведённые расходы газов через турбины ВД и НД не равны.

В соответствии с соотношением (13) можно записать уравнения приведённых скоростей для турбин ВД и НД:

$$\begin{aligned} \lambda_{u_{m_{ВД}}} &= \frac{\pi(D_{p.k_m_{ВД}})_{cp} n_{ВД}}{60 \sqrt{\frac{2k_2}{k_2+1}} R_2 T_{g^1_{ВД}}^*}; \\ \lambda_{u_{m_{НД}}} &= \frac{\pi(D_{p.k_m_{НД}})_{cp} n_{НД}}{60 \sqrt{\frac{2k_2}{k_2+1}} R_2 T_{g^1_{НД}}^*}. \end{aligned}$$

Поскольку  $T_{g^1_{НД}}^* = T_{g^1_{ВД}}^* \left( \frac{p_{g^1_{НД}}^*}{p_{g^1_{ВД}}^*} \right)^{\frac{k_2-1}{k_2}} = \frac{T_{g^1_{ВД}}^*}{\pi_{m_{ВД}}^{\frac{k_2-1}{k_2}}}$ , получим

$$\lambda_{u_m \text{ НД}} = \lambda_{u_m \text{ ВД}} \frac{\left( D_{p.k_m \text{ НД}} \right)_{cp} n_{\text{НД}}}{\left( D_{p.k_m \text{ ВД}} \right)_{cp} n_{\text{ВД}}} \pi_{m \text{ ВД}}^{\frac{k_2-1}{2k_2}}. \quad (17)$$

Уравнение (17) показывает, что режим работы турбины НД будет определён, во-первых, если известен режим работы турбины ВД, во-вторых, когда  $\lambda_{c_1 \text{ НД}}$  и  $\lambda_{c_1 \text{ ВД}}$  связаны однозначно уравнением (15).

Если считать  $\bar{F}_{ca} = \text{const}$  и  $\frac{\left( D_{p.k_m \text{ НД}} \right)_{cp} n_{\text{НД}}}{\left( D_{p.k_m \text{ ВД}} \right)_{cp} n_{\text{ВД}}} = \text{const}$ , то суммарную характеристику

турбин ВД и НД системы воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом можно представить в следующем виде (см. рис. 2):

$$\pi_{m\Sigma} = f\left(\pi_{m \text{ ВД}}, (q(\lambda_{c_1}))_{\text{ВД}}, \lambda_{u_m \text{ ВД}}, (q(\lambda_{c_1}))_{\text{НД}}, \lambda_{u_m \text{ НД}}\right). \quad (18)$$

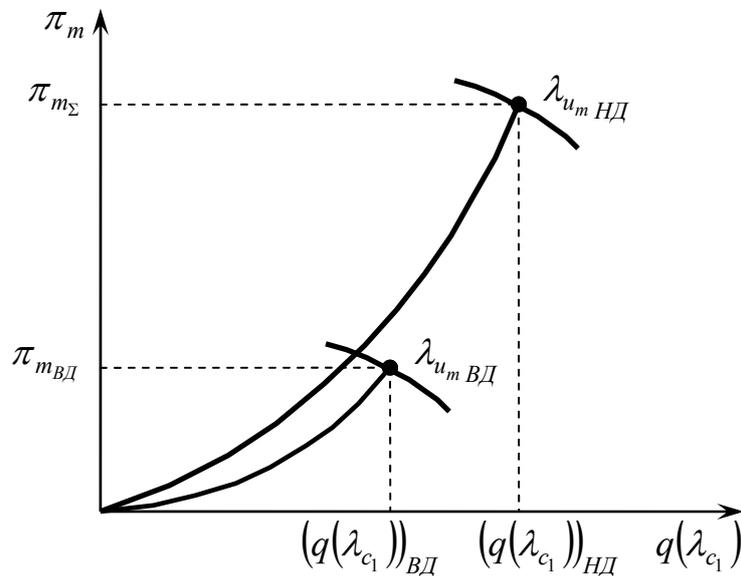


Рисунок 2 – Суммарная характеристика турбин ВД и НД системы воздухообеспечения с двухступенчатым наддувом

Однако следует отметить, что характеристика (18) справедлива только для определённых турбин ВД и НД, у которых известны геометрические размеры и частоты вращения. Если проводить оптимизацию характеристики (18), то необходимо учитывать такие параметры,

как  $\bar{F}_{ca}$  и  $\frac{\left( D_{p.k_m \text{ НД}} \right)_{cp} n_{\text{НД}}}{\left( D_{p.k_m \text{ ВД}} \right)_{cp} n_{\text{ВД}}}$ .

### ВЫВОД

Несмотря на высокий уровень развития современной газодинамической теории, далеко не все задачи в области двигателестроения и турбостроения могут быть решены теоретически с достаточной для практики точностью. Это объясняется, во-первых, конструктивной сложностью элементов проточных частей агрегатов наддува, во-вторых, нестационарностью термогазодинамического потока. Из вышесказанного следует, что многие задачи при проектировании систем воздухообеспечения поршневых комбинированных двигателей приходится решать экспериментально и это подтверждается многочисленными исследованиями по рас-

крытию механизма течения термогазодинамического потока в конструктивно сложных узлах агрегатов наддува.

Также следует отметить, что исследования на динамических моделях характеризуют важный этап проектирования проточных частей систем воздухообеспечения поршневых комбинированных двигателей, обладают определённой самостоятельностью и в то же время в целом воздействуют на продвижение процессов проектирования к общему оптимальному решению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков, Б.П. Турбокомпрессоры для наддува дизелей: Справочное пособие / Б. П. Байков, В. Г. Бордуков, П. В. Иванов. Л.: Машиностроение, 1975. 200 с.
2. Межеричкий, А.Д. Турбокомпрессоры систем наддува судовых дизелей / А. Д. Межеричкий. Л.: Судостроение, 1986. 248 с.
3. Лашко, В.А. Использование фундаментальной теории управления в практике проектирования проточных частей комбинированных двигателей внутреннего сгорания / В. А. Лашко. Владивосток: Дальнаука, 2009. 449 с.
4. Круглов, М.Г. Термодинамика и газодинамика двухтактных двигателей внутреннего сгорания / М. Г. Круглов. М.: Машгиз, 1963. 272 с.
5. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / под ред. В. С. Авдеевского, В. К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
6. Исаченко, В.П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. М.: Энергия, 1975. 488 с.
7. Холщевников К.В. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин / К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин. М.: Машиностроение, 1986. 432 с.
8. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. М.: Наука, 1977. 440 с.
9. Нечаев, Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1 / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Фёдоров. М.: Машиностроение, 1977. 312 с.
10. Венедиктов, В.Д. Газодинамика охлаждаемых турбин / В. Д. Венедиктов. М.: Машиностроение, 1990. 240 с.
11. Иванченко, Н.Н. Высокий наддув дизелей / Н. Н. Иванченко, С. С. Красовский, С. С. Соколов. Л.: Машиностроение, 1983. 198 с.

#### Лашко Василий Александрович

ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»

Доктор технических наук, профессор

Тел: (4212) 37-52-17

E-mail: kafdvs@rambler.ru

#### Бердник Алексей Николаевич

ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет»

Кандидат технических наук, доцент

Тел: (4212) 37-52-17

E-mail: alex.bdk75@yandex.ru

---

V.A. LASHKO, A.N. BERDNIK

### PHYSICAL MODELLING OF PROCESSES IN SYSTEMS AIRSUPPLY OF THE PISTON COMBINED ENGINES

*The article deals with the physical features of process modeling in the systems air-piston engines with a combined one-and two-stage supercharging the «cold models». On the basis of dimensional analysis and  $\pi$  - theorems establish the criteria for similarity of the physical simulation of processes in aggregates termogazodinamicheskikh boost. The system of gas dynamic and thermal criteria of similarity in terms of the required minimum criteria for similarity of processes in aggregates boost.*

**Keywords:** *physical modeling, air supply system, combined piston engine, naturally aspirated units, the theory of dimensions,  $\pi$  - theorem, similarity criteria.*

BIBLIOGRAPHY

1. Bajkov, B.P. Turbokompressory dlja nadduva dizelej: Spravochnoe posobie / B. P. Bajkov, V. G. Bor-dukov, P. V. Ivanov. L.: Mashinostroenie, 1975. 200 s.
2. Mezherickij, A.D. Turbokompressory sistem nadduva sudovyh dizelej / A. D. Mezherickij. L.: Su-dostroenie, 1986. 248 s.
3. Lashko, V.A. Ispol'zovanie fundamental'noj teorii upravlenija v praktike proektirovanija pro-tochnyh chastej kombinirovannyh dvigatelej vnutrennego sgoranija / V. A. Lashko. Vladivostok : Dal'nauka, 2009. 449 s.
4. Kruglov, M.G. Termodinamika i gazodinamika dvouhaktnyh dvigatelej vnutrennego sgoranija / M. G. Kruglov. M.: Mashgiz, 1963. 272 s.
5. Osnovy teploperedachi v aviacionnoj i raketno-kosmicheskoj tehnikе / pod red. V. S. Avduevskogo, V. K. Koshkina. M. : Mashinostroenie, 1992. 528 s.
6. Isachenko, V.P. Teploperedacha / V. P. Isachenko, V. A. Osipova, A. S. Sukomel. M. : Jenergija, 1975. 488 s.
7. Holshhevnikov K.V. Teorija i raschjot aviacionnyh lopatochnyh mashin / K. V. Holshhevnikov, O. N. Emin, V. T. Mitrohin. M. : Mashinostroenie, 1986. 432 s.
8. Cedov, L.I. Metody podobija i razmernosti v mehanike / L. I. Sedov. M. : Nauka, 1977. 440 s.
9. Nechaev, Ju.N. Teorija aviacionnyh gazoturbinnyh dvigatelej. Ch. 1 / Ju. N. Nechaev, R. M. Fjodorov. M. : Mashinostroenie, 1977. 312 s.
10. Venediktov, V.D. Gazodinamika ohlazhdaemyh turbin / V. D. Venediktov. M. : Mashinostroenie, 1990. 240 s.
11. Ivanchenko, N.N. Vysokij nadduv dizelej / N. N. Ivanchenko, S. S. Krasovskij, S. S. Sokolov. L. : Mashinostroenie, 1983. 198 s.

**Lashko Vasily Alexandrovich**

Pacific National University, Khabarovsk

Doctor of technical sciences, professor of department «DVS»

Tel: (4212) 37-52-17

E-mail: kafdvs@rambler.ru

**Berdnik Alexey Nikolaevich**

Pacific National University, Khabarovsk

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

Tel: (4212) 37-52-17

E-mail: alex.bdk75@yandex.ru

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 629.4.014.1

А.П. БУЙНОСОВ, И.М. ПЫШНЫЙ, В.А. ТИХОНОВ

## МОДЕЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ИЗНОСА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*В статье на основе базовых положений теории надежности, технического контроля, статистико-математических методов исследования предложена модель износа в эксплуатации сложной технической системы для оценки износа (старения) всех ее конструктивных элементов, определения закономерностей снижения эффективности всех неконструктивных элементов и интегрирования полученных данных для вычисления ресурса системы.*

*Ключевые слова:* эксплуатация, сложные технические системы, износ, модель.

Сложная техническая система характеризуется, прежде всего, многоэлементностью, тяжелыми условиями эксплуатации, большим циклом рабочих нагрузок, при этом качественное состояние системы постоянно меняется во времени. Чтобы судить о выработке ресурса системы, надо исследовать износ (старение) всех ее конструктивных элементов, знать закономерности снижения эффективности всех неконструктивных элементов (регулировка, окраска, защитные покрытия) и уметь интегрировать эти данные для получения обобщенного показателя износа.

Существует несколько методов оценки износа сложного оборудования, среди которых наибольшее распространение получили [1]:

- стоимостный метод оценки износа по техническому состоянию системы в целом;
- стоимостный метод оценки износа по техническому состоянию важнейших конструктивных элементов.

В обоих случаях износ сложного оборудования или системы оценивается величиной остаточной стоимости. Не останавливаясь на детальном анализе указанных методов, можно отметить, что наиболее сложным этапом в реализации такой оценки является определение остаточной стоимости в какой-то текущий момент времени. Наиболее объективной мерой текущего износа сложной технической системы является такая величина, которая включает в себя показатель выработки ресурса долговечности по прогнозирующему параметру каждого элемента системы в рассматриваемый период времени и относительную стоимость элементов [2].

Если основные элементы системы выразить в долях от полной ее стоимости, то временную зависимость общего износа сложной системы можно оценить математической зависимостью:

$$P(t) = W_1 \cdot P_1(t) + W_2 \cdot P_2(t) + \dots + W_n \cdot P_n(t) = \sum_{i=1}^n W_i \cdot P_i(t), \quad (1)$$

где  $P(t)$  – относительный износ системы в случайный момент времени  $t$ ;  $W_i = a_i / a$  – доля  $i$ -го элемента в общей стоимости системы;  $a_i$  и  $a$  – соответственно, стоимость  $i$ -го элемента и технической системы в целом;  $P_i(t)$  – показатель выработки ресурса прогнозирующего параметра  $i$ -го элемента технической системы в момент времени  $t$ .

Относительная стоимость элементов (доля  $i$ -го элемента в общей стоимости системы)  $W_i$  за период длительной эксплуатации системы может меняться за счет некоторого изменения цен на материалы и изделия. Однако возможные относительные вариации этого показателя для конкретно выбранного момента времени, как свидетельствует практика, весьма незначительны, поэтому в дальнейшем можно считать, что  $W_i = \text{Const}$  и не зависит от времени в рассматриваемом достаточно продолжительном интервале эксплуатации [3].

Отсюда следует, что износ, как отдельных элементов, так и системы в целом определяется закономерностями выработки технического ресурса.

У различных элементов системы наблюдаются различные начальные уровни ресурса и различные скорости его выработки. Поэтому сложная техническая система имеет в своем составе узлы и элементы различной долговечности. Одни элементы работают весь срок службы, установленный для данной системы, другие требуют периодической замены или ремонта.

Техническое обслуживание и ремонтно-профилактические операции обусловлены наличием в структуре исходной годности сложной технической системы, недолговременно действующей части, относящейся, как к конструктивным, так и неконструктивным элементам. В процессе ремонта часть годности системы возобновляется.

Общую структуру годности системы, а также изменение составляющих годности во времени схематически изображено в виде графика (рис. 1), на котором по оси ординат откладываются годности конструктивных и неконструктивных элементов [4].

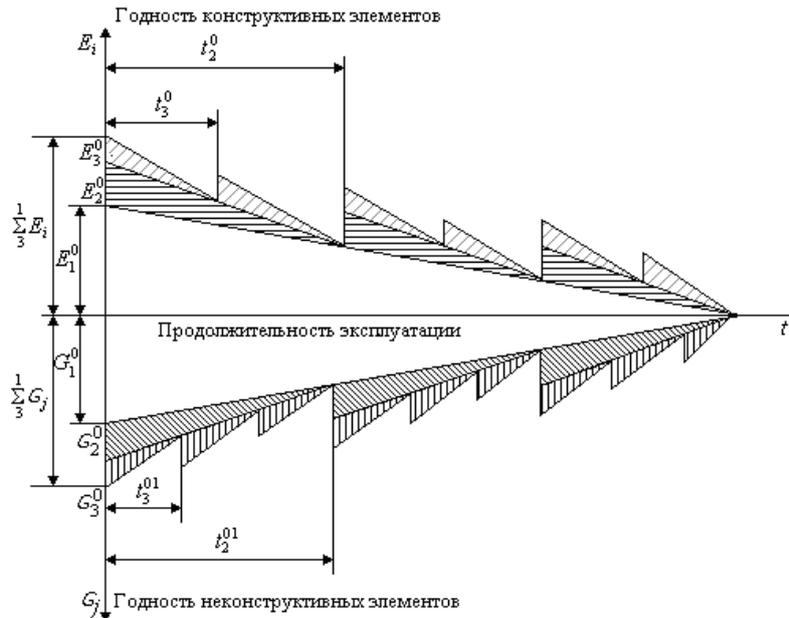


Рисунок 1 – Схема структурных составляющих годности системы и их изменения в процессе эксплуатации

$E_1$  и  $G_1$  – часть годности системы, соответствующая долговременно действующим конструктивным и неконструктивным элементам;  $E_2^0$  и  $G_2^0$  – часть годности системы, соответствующая недолговременно действующим элементам, восстанавливаемым через период эксплуатации  $t_2^0$  и  $t_2^{01}$ ;  $E_3^0$  и  $G_3^0$  – часть годности системы, соответствующая недолговременно действующим элементам, восстанавливаемым через период  $t_3^0$  и  $t_3^{01}$ .

При построении графика в целях упрощения был принят ряд допущений:

- 1) принят линейный закон изменения годности элементов в пределах их сроков службы;
- 2) годность нескольких элементов представлена в виде годности одного укрупненного элемента;
- 3) при ремонте недолговременно действующие элементы приобретают дополнительную годность, равную потерянной исходной годности.

Анализ состояния структурных составляющих годности позволяет дать объективную оценку, насколько каждый элемент выполняет свои функции с учетом всех потенциальных возможностей отказа. Такой подход относится к статистической модели типа «параметр–поле допуска». В каком бы режиме не находились системы на их элементы влияют внешние воздействия, включающие различные разрушающие факторы, случайно меняющиеся во времени. Поэтому при исследовании вопроса эксплуатационного износа сложной системы необходимо, прежде всего, обосновать пути определения долговечности отдельных элементов, для чего следует разработать физико-математическую модель отказа элементов. Для каждого периода функционирования физический процесс износа может быть представлен структурной схемой (рис. 2).

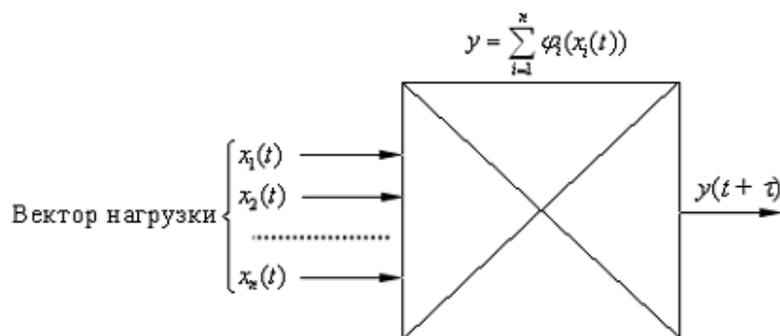


Рисунок 2 – Физическая модель эксплуатируемого элемента

На вход физического элемента подается случайный вектор нагрузки  $\left\{ \sum_{i=1}^n X_i(t) \right\}$  переменный во времени включающий различные внешние воздействия, такие как вибрационные, электрические нагрузки, нагрев, запыление, увлажнение и т. п. На выходе физического элемента формируется процесс  $y(t)$  (единичный или векторный), представляющий собой прогнозирующий параметр. Каждый тракт модели характеризуется своей преобразовательной функцией  $\varphi_i(X_i; t)$ , определяющей влияние нагрузочного процесса  $X_i(t)$  на выходной случайный процесс  $y(t)$  [5].

Нагрузочные случайные процессы  $\left\{ \sum_{i=1}^n X_i(t) \right\}$  относятся к категории стационарных случайных, обладающих свойствами эргодичности, поэтому их можно оценить статистическими параметрами вектора нагрузки при определенных условиях эксплуатации. Для этого необходимо иметь хотя бы одну реализацию режима нагружения на достаточно длительном интервале времени эксплуатации. Реализация случайного процесса изменения прогнозирующего параметра остается внутри некоторой области, элемент находится в работоспособном состоянии, при пересечении границы рабочей области происходит его отказ. Время до первого пересечения траекторией случайного процесса изменения прогнозирующего параметра границ рабочей области является случайной величиной, распределение которой характеризует надежность элемента [6].

Если принять, что элемент будет находиться в исправном состоянии, когда его прогнозирующий параметр выше границы поля допуска  $w$ , то для фиксированного момента времени  $t_i$  вероятность исправности элемента  $G_{wi}$  будет определяться выражением:

$$G_{wi} = \int_w^{\infty} f_i [y(t_i)] dy, \tag{2}$$

где  $f_i[y(t_i)]$  – плотность вероятности значений прогнозирующего параметра в момент времени  $t_i$ .

Случайные процессы, характеризующие изменение прогнозирующих параметров элементов в условиях эксплуатации, являются суммой двух случайных процессов [7]:

- из-за колебаний внешних условий имеют место кратковременные обратимые изменения параметров. Обычно такие изменения аппроксимируются стационарными случайными функциями времени;

- долговременные необратимые изменения параметров элементов происходят под действием нагрузок и внешних воздействий, вызывающих в элементах физические или химические превращения, т. е. старение или износ. Каждый тип элемента имеет свою траекторию износа. Однотипные элементы дают близкие по форме зависимости износа, но с различными параметрами. Подобного рода временные зависимости относятся к классу нестационарных случайных процессов.

Учитывая двойственный характер, случайный процесс изменчивости прогнозирующего параметра элемента  $Y(t)$ , без учета ошибок измерений, будет выражаться зависимостью:

$$Y(t) = \{H(t)\} + \{\beta(t)\}, \tag{3}$$

где  $\{H(t)\}$  – функция, описывающая нестационарный случайный процесс необратимых изменений прогнозирующего параметра;  $\{\beta(t)\}$  – функция, описывающая стационарный случайный процесс обратимых изменений прогнозирующего параметра.

В большинстве случаев необратимые временные изменения прогнозирующего параметра происходят нелинейно. Нелинейность проявляется тем сильнее, чем чаще возникают экстремальные условия в процессе эксплуатации элемента. Поэтому физические модели старения можно отнести к разряду аддитивных линейных только в ограниченном диапазоне приложенного на вход воздействия или на ограниченном временном интервале. Тем не менее, при исследовании необратимых изменений прогнозирующего параметра целесообразно изыскивать пути линеаризации процесса [8].

Для большинства физических элементов интенсивность процесса износа определяется законами реактивной кинетики [9].

В этом случае относительная скорость изменения свойств по  $i$ -ой нагрузке будет:

$$\frac{dH}{dt} = K_i H(t)_i, \quad (4)$$

а сам процесс изменения параметра может быть представлен зависимостью:

$$H(t)_i = A \cdot e^{K_i t}, \quad (5)$$

где  $A$  – начальное значение параметра;  $K_i$  – относительная скорость изменения параметра от воздействия  $i$ -ой нагрузки.

Параметры  $A$  и  $K_i$  являются случайными величинами. В полулогарифмической системе координат случайный процесс  $H(t)$  будет носить линейчатый характер. Аналогично определяются относительные скорости изменения параметра от других воздействий.

Таким образом, общая относительная скорость изменения параметра представляет собой функцию многих случайных аргументов:

$$K = \varphi(X_1; X_2; \dots; X_n). \quad (6)$$

Математическое ожидание общей относительной скорости находится как сумма частных относительных скоростей изменения параметра  $K_i$  при условии, что на элемент воздействует внешний нагрузочный фактор  $X_i$ , равный его математическому ожиданию:

$$M(K_\Sigma) = \sum_{i=1}^n K_i(X_i). \quad (7)$$

Дисперсия общей относительной скорости определяется:

$$D(K_\Sigma) = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial X_1} \right)^2 \cdot \sigma_{X_1}^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial X_2} \right)^2 \cdot \sigma_{X_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial X_n} \right)^2 \cdot \sigma_{X_n}^2, \quad (8)$$

где  $\sigma_{X_j}^2$  – дисперсия  $j$ -ой независимой случайной величины (при  $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Учитывая возможность линеаризации процесса необратимых изменений прогнозирующего параметра, целесообразно нестационарный случайный процесс  $\{H(t)\}$  представить как временную детерминированную функцию математического ожидания прогнозирующего параметра, на которую накладывается стационарный случайный процесс, определяющий случайный разброс значений относительно детерминированной функциональной зависимости.

Отсюда:

$$\{H(t)\} = M[H(t)] + \{h(t)\}, \quad (9)$$

где  $M[H(t)]$  – временная детерминированная функция математического ожидания линеаризованного случайного процесса  $[H(t)]$ ;  $\{h(t)\}$  – случайный стационарный процесс с независимым от времени нулевым средним значением.

Таким образом, принимая во внимание выражения (3) и (9), можем записать:

$$Y(t) = M[H(t)] + \{h(t)\} + \{\beta(t)\}. \quad (10)$$

Временная детерминированная функция  $M[H'(t)]$  может быть установлена методами регрессионного анализа, по результатам специально поставленного эксперимента или путем случайных выборок в период эксплуатации.

Как следует из формулы (10), при решении рассматриваемой задачи оценки функции износа элементов возникает необходимость определить законы распределения не одной случайной величины, а суммы нескольких независимых случайных величин, то есть найти композицию законов распределения [10].

Из теории вероятностей известно, что плотность распределения вероятностей суммы случайных величин определяется выражением (11):

$$P(z) = \int_0^L P_1(x) \cdot P_2(u-x) dx, \quad (11)$$

где  $z = (x + y)$ ;  $u$  – промежуточный аргумент.

Установив статистические распределения вероятностей появления отказов элементов по снижению прогнозирующего параметра до граничных значений, можно рассчитать надежность всей технической системы и прогнозировать остаточный ресурс.

Таким образом, разработанная модель эксплуатационного износа (старения) связывает физико-химические временные процессы, протекающие в элементах сложных технических системах под влиянием эксплуатационных нагрузочных факторов, с надежностными параметрами отдельных элементов и системы в целом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванов, А.И. Основы теории старения машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 398 с.
2. Буйносов, А.П. Повышение ресурса бандажей колесных пар электровозов в результате изменения технологии обточка // Автоматизация и современные технологии. – 1992. – № 2. – С. 23-25.
3. Буйносов, А.П. Измерение параметров колесных пар локомотивов. Автоматизированная система. Монография / В.С. Наговицын, А.П. Буйносов, В.Л. Балдин. – Саарбрюккен, Germany (Германия): Изд-во «LAP LAMBERT Academic Publishing», 2011. – 244 с.
4. Буйносов, А.П. Повышение надежности бандажей // Железнодорожный транспорт. – 1996. – № 12. – С. 23-24.
5. Буйносов, А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2009. – 224 с.
6. Буйносов, А.П. Оценка качества термической обработки (твердости и структуры) металла неразрушающим методом магнитного контроля / А.П. Буйносов, В.С. Наговицын, М.Н. Трофимов // Вестник Академии транспорта Российской Федерации. Уральское межрегиональное отделение. – Курган. – 1998. – С. 132-133.
7. Буйносов, А.П. Повышение долговечности колесных пар за счет упрочнения гребней бандажей локомотивов / В.Л. Балдин, А.П. Буйносов, В.А. Тихонов // Вестник транспорта Поволжья. – Самара, 2011. – № 5(29). – С. 57-60.
8. Буйносов, А.П. Использование гребнесмазывателей системы «Тракмастер» для уменьшения износа гребней колесных пар локомотивов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2006. – № 11. – С. 44-46.
9. Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. – М.: Мир, 1970. – 368 с.
10. Буйносов, А.П. Влияние разности диаметров бандажей на износ колесных пар тягового подвижного состава // Вестник УрГУПС. – 2010. – № 1(5). – С. 49-55.

#### **Буйносов Александр Петрович**

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга»  
620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66  
Тел. 8(343) 221-24-70, 345-59-32  
E-mail: byinosov@mail.ru

#### **Пышный Игорь Михайлович**

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург  
Аспирант, ассистент кафедры «Электрическая тяга»  
620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66  
Тел. 8(343) 221-24-70  
E-mail: igorkz45@mail.ru

**Тихонов Виктор Артурович**

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург  
Аспирант, ассистент кафедры «Электрическая тяга»  
620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66  
Тел. 8(343) 221-24-70  
E-mail: va.tikhonov@yandex.ru

A.P. BUJNOSOV, I.M. PYSHNYI, V.A. TIKHONOV

**MODEL OF OPERATIONAL DETERIORATION  
OF DIFFICULT TECHNICAL SYSTEM**

*In article on the basis of base positions of the theory of reliability, technical control, statistiko-mathematical methods of research the deterioration model in operation of difficult technical system for an estimation of deterioration (aging) of all its constructive elements, definitions of laws of decrease in efficiency of all not constructive elements and integration of the received data for calculation of a resource of system is offered.*

**Keywords:** operation, difficult technical systems, deterioration, model.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Selivanov, A.I. Bas of the theory of aging of cars. – M: Mechanical engineering, 1971. – 398 p.
2. Bujnosov, A.P. Increase of a resource of bandages of wheel pairs electric locomotives as a result of change of technology of turning // Automation and modern technologies. – 1992. – № 2. – P. 23-25.
3. Bujnosov, A.P. Measurement of parameters of wheel pairs locomotives. The automated system. The monography / V.S. Nagovitsyn, A.P. Bujnosov, V.L. Baldin. – Saarbruecken (Germany): Publishing house «LAP LAMBERT Academic Publishing», 2011. – 244 p.
4. Bujnosov, A.P. Increase of reliability of bandages // the Railway transportation. – 1996. – № 12. – P. 23-24.
5. Bujnosov, A.P. Principal cause of intensive deterioration of bandages of wheel pairs a rolling stock and methods of their elimination. – Ekaterinburg: Publishing house UrGuPs, 2009. – 224 p.
6. Bujnosov, A.P. Estimation of quality of thermal processing (hardness and structure) metal a nondestructive method of magnetic control / A.P. Bujnosov, V.S. Nagovitsyn, M.N. Trofimov // the Bulletin of Academy of transport of the Russian Federation. The Ural inter-regional branch. – a barrow. – 1998. – P. 132-133.
7. Bujnosov, A.P. Increase of durability of wheel pairs at the expense of hardening of crests of bandages of locomotives / V.L. Baldin, A.P. Bujnosov, V.A. Tikhonov // the Bulletin of a transtime of the Volga region. – Samara, 2011. – № 5 (29). – P. 57-60.
8. Bujnosov, A.P. Use гребнесмазывателей systems «Truckmaster» for reduction of deterioration of crests of wheel pairs locomotives // Transport: a science, technics, management. – 2006. – № 11. – P. 44-46.
9. Astorm, R. Teorija verojatnostej. The mathematical statistics. Statistical quality assurance. – M: the World, 1970. – 368 p.
10. Bujnosov, A.P. Influence of a difference of diameters of bandages on deterioration of wheel pairs tjagovogo a rolling stock // Vestnik UrGUPS. – 2010. – № 1 (5)

**Bujnosov Alexander Petrovich**

Ural state university of railroad transport, Yekaterinburg  
Cand. Sci. Tech., the senior lecture of chair «Electric traction»  
620034, Yekaterinburg, Kolmogorova st., 66  
Tel. 8(343) 221-24-70, 345-59-32  
E-mail: byinosov@mail.ru

**Pyshnyi Igor Mihajlovich**

Ural state university of railroad transport, Yekaterinburg  
PhD student, assistant of chair «Electric traction»  
620034, Yekaterinburg, Kolmogorova st., 66  
Tel. 8(343) 221-24-70  
E-mail: igorkz45@mail.ru

**Tikhonov Viktor Arturovich**

Ural state university of railroad transport, Yekaterinburg  
PhD student, assistant of chair «Electric traction»  
620034, Yekaterinburg, Kolmogorova st., 66  
Tel. 8(343) 221-24-70  
E-mail: va.tikhonov@yandex.ru

## О ПРОЕКТИРОВАНИИ ДИАГОНАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ГТД

*Исследовано влияние распределения средних радиусов ( $r_2/r_1$ ) по ступеням трехступенчатой турбины низкого давления ГТД на ее КПД при различных значениях параметра нагруженности турбины  $Y$ . Уточнена методика расчета КПД турбины путем учета воздействия Кориолисовых сил на параметры ступеней. Показано, что с уменьшением параметра  $Y$  и нагрузки первой ступени преимущество диагональных турбин над осевыми по КПД возрастает.*

**Ключевые слова:** турбина низкого давления, ГТД, параметр нагрузки, эффективность, средний радиус.

Современные многоступенчатые турбины низкого давления (ТНД) газотурбинных двигателей с большой степенью двухконтурности обычно компонуются таким образом, что их проточная часть имеет средний радиус, существенно увеличивающийся с ростом номера ступени, то есть являются диагональными турбинами. Согласно статистическим данным (рис. 1) отношение средних радиусов по венцам ТНД современных двигателей  $r_{(j+1)}/r_j$  находится в пределах от 0,97 до 1,1. Поэтому при проектировании таких турбин необходимо иметь представление о степени влияния диагональности на КПД турбины.

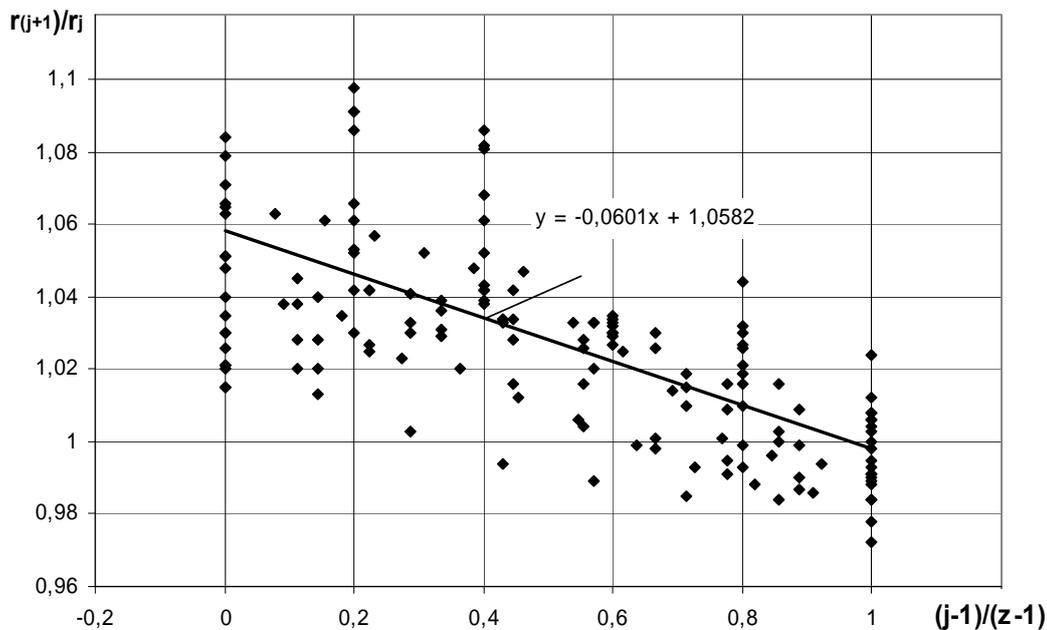


Рисунок 1 – Распределение средних радиусов СА и РК по венцам ТНД современных ГТД

Основные свойства и качества проточной части турбины в значительной мере формируются на этапе ее одномерного расчета и проектирования. Однако теория и методы газодинамического проектирования (1D и 2D модели), используемые на начальной стадии разработки проекта турбины при формировании ее проточной части, не учитывают особенности преобразования энергии в диагональной ступени, обусловленные инерционными силами, порождаемыми кориолисовым ускорением [1].

Рассмотрим термогазодинамическую модель расширения газа в диагональной турбине. Особенность процесса расширения газа в такой турбинной ступени состоит в совершении рабочим колесом (РК) работы, направленной на преодоление кориолисовых сил  $L_C$  (определена из уравнения Эйлера для удельной работы ступени турбины):

$$L_C = u_2^2 - u_1^2,$$

где  $u$  – окружная скорость РК, индекс 1 указывает на выход из соплового аппарата (СА), индекс 2 – выход из РК. Работа  $L_C$  подводится к газу при движении потока в межлопаточных

каналах РК и затем вновь преобразуется (в определенной мере) в эффективную работу ступени на валу. Половина работы против кориолисовых сил переходит в приращение располагаемого перепада энтальпий в рабочем колесе:

$$\Delta i_{w_c}^* = i_{w_2}^* - i_{w_1}^* = \frac{1}{2}(u_2^2 - u_1^2).$$

Вторая половина работы  $L_c$  остается в газе в виде кинетической энергии вращательно-го движения газа вместе с рабочим колесом, то есть газ получает приращение кинетической энергии, равное

$$\Delta E_u = \frac{1}{2}(u_2^2 - u_1^2).$$

Ввиду неизоэнтропичности процесса расширения приращение располагаемой энергии в рабочем колесе не будет в точности равно приращению  $\Delta i_{w_c}^*$ . На основании указанных особенностей получены выражения для лопаточного КПД турбинной ступени:

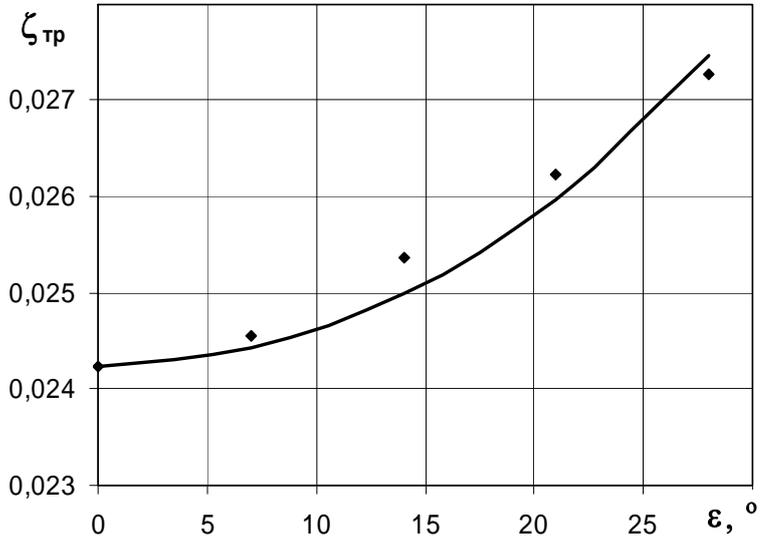


Рисунок 2 – Сравнение потерь трения в диагональной турбинной решетке, определенных по формуле (1) и численным моделированием

$$\eta_{л} = \psi^2 \left[ \varphi^2 (1 - \rho) + \rho \xi_{ст} \right] + \frac{u_1}{c_{ад}} \left[ \left( 2\varphi \sqrt{1 - \rho} \cos(\alpha_1) - \frac{u_1}{c_{ад}} \right) - \frac{u_1}{c_{ад}} \left( \frac{r_2^2}{r_1^2} - 1 \right) \right] (1 - \psi^2)$$

и мощностного КПД ступени:

$$\eta_u = 2 \frac{u_1}{c_{ад}} \left[ \varphi \sqrt{1 - \rho} \cos(\alpha_1) - \frac{u_1}{c_{ад}} \frac{r_2^2}{r_1^2} + \psi \cos(\beta_2) \frac{r_2}{r_1} \right] \times \sqrt{\varphi^2 (1 - \rho) + \frac{u_1^2}{c_{ад}^2} \frac{r_2^2}{r_1^2} - 2\varphi \sqrt{1 - \rho} \frac{u_1}{c_{ад}} \cos(\alpha_1) + \rho \xi_{ст}},$$

где  $u_1/c_{ад}$  – газодинамическая нагруженность ступени,  $\varphi, \psi$  – коэффициенты потерь скорости в СА и РК,  $\xi_{ст}$  – коэффициент возврата тепла в ступени,  $\alpha_1$  – угол между фронтом лопаточных венцов и вектором абсолютной скорости на выходе из СА,  $r_2/r_1$  – отношение средних радиусов на выходе и входе РК ступени,  $\beta_2$  – угол между вектором относительной скорости на выходе из РК и плоскостью вращения РК.

Как известно мощностной КПД по параметрам торможения ступени [2]:

$$\eta_u^* = \eta_u \frac{\frac{k-1}{\pi_{ст}^k} (1 - \eta_{л}) + \eta_{л}}{\frac{k-1}{\pi_{ст}^k} (1 - \eta_u) + \eta_u}.$$

В связи с увеличением длины пути движения газа в межлопаточном канале диагональной ступени потери трения оказываются выше, чем в осевой, что предлагается учесть поправкой:

$$\Delta \zeta_{\varepsilon} = \zeta_{тр} \left( \frac{1}{\cos(\varepsilon)} - 1 \right), \tag{1}$$

где  $\varepsilon$  – угол наклона средней линии проточной части венца ступени турбины.

Достоверность выражения (1) подтверждена результатами численного моделирования вязкого турбулентного течения в межлопаточном канале (рис. 2). Моделирование проведено методом решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с замыканием системы уравнений моделью турбулентности SST на программном комплексе вычислительной газовой динамики CFX 11.0.

Учитывая особенности термодинамики процесса расширения газа в диагональной турбине было проведено расчетное (1D) исследование влияния диагональности на КПД трехступенчатой турбины. Рассматривалось три варианта распределения средних радиусов (рис. 3):  $D_{cp} = const$ , равномерное распределение ( $r_{11}/r_0 = 1,03$ ,  $(r_2/r_1)_I = 1,0295$ ,  $r_{111}/r_{21} = 1,0286$ ,  $(r_2/r_1)_{II} = 1,0278$ ,  $r_{1111}/r_{211} = 1,027$ ,  $(r_2/r_1)_{III} = 1,0263$ ) и среднестатистическое распределение ( $r_{11}/r_0 = 1,058$ ,  $(r_2/r_1)_I = 1,046$ ,  $r_{111}/r_{21} = 1,034$ ,  $(r_2/r_1)_{II} = 1,022$ ,  $r_{1111}/r_{211} = 1,01$ ,  $(r_2/r_1)_{III} = 1$ ). Равномерное и среднестатистическое распределения имеют одно и то же отношение выходного и входного радиусов в турбине  $r_{2111}/r_0 = 1,182$ . Все варианты рассматриваемых турбин имеют равные относительные диаметральные размеры на входе. Нужно отметить, что с увеличением радиальности увеличивается параметр нагруженности турбины:

$$Y = \sqrt{\sum u_{1j}^2} / c_{адт}.$$

Были проведены расчетные исследования сопоставимых вариантов турбин. Так если у

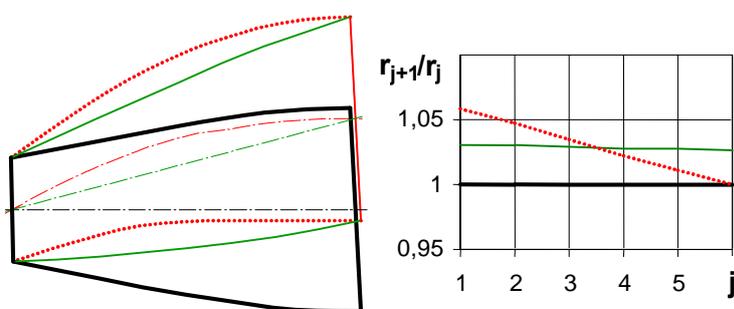


Рисунок 3 – Формы исследуемых проточных частей

осевой турбины  $Y = 0,5$ , то у турбины с равномерным распределением  $Y = 0,546$ ; а у турбины со среднестатистическим распределением  $Y = 0,565$ . Аналогично если  $Y = 0,4$  у осевой турбины, то соответственно  $Y = 0,437$  для равномерного распределения радиусов и  $Y = 0,452$  для среднестатистического. На рисунке 4 видно, что наибольшее преимущество по

КПД имеет турбина со среднестатистическим распределением радиусов, особенно в области

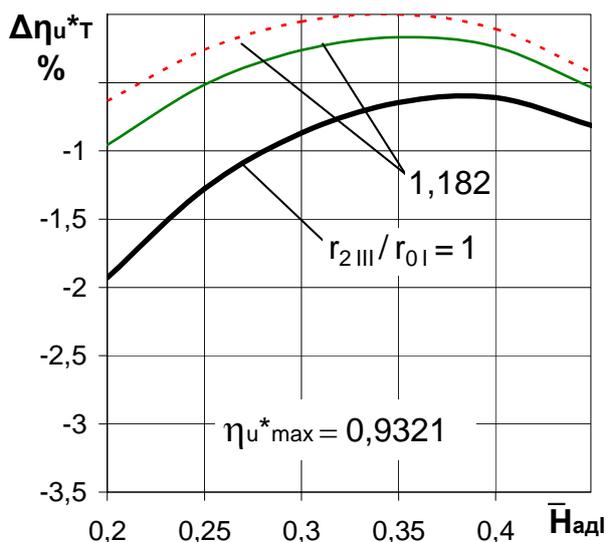


Рисунок 4 – Влияние диагональности на КПД трехступенчатой турбины ( $Y_{o,m} = 0,4$ )

небольших относительных нагрузок первой ступени  $\bar{N}_{адI} = L_{адI}/L_{адт}$ . Хотя согласно расчетам КПД первой ступени снижается с увеличением диагональности ступени, но на последующих ступенях, в особенности на третьей, КПД  $\eta_{ст}^*$  резко возрастает вследствие роста  $u/c_{ад}$  и нагрузок ступеней.

При высоких нагрузках первой ступени преимущество по КПД у диагональной турбины уменьшается. Это связано со снижением КПД второй ступени, которое обусловлено снижением нагрузки  $\bar{N}_{адII}$  и вследствие этого увеличением отношения  $u/c_{адII}$  выше его оптимальных значений.

Согласно расчетам при низких  $Y$  КПД диагональных турбин оказывается существенно выше, чем осевых при любом

распределении нагрузок, то есть при низких  $Y$  диагональность оказывает более существенное влияние на КПД.

При среднестатистическом распределении наибольшие отношения  $r_2/r_1$  выполняются на первых ступенях турбины, а последняя ступень – осевая. Вследствие этого значения  $u/c_{ад}$  ступеней получаются выше, чем при равномерном распределении отношения  $r_2/r_1$ , и соответственно КПД такой турбины выше.

Расчетные исследования показали, что степень влияния диагональности на КПД  $\eta_T^*$  зависит от величины  $Y$  и распределения нагрузок по ступеням: при низких  $Y$  ( $Y < 0,4$ ) целесообразно использовать диагональные турбины при любом распределении нагрузок по ступеням. Наибольший КПД имеет турбина с повышенной диагональностью на первых ступенях; с увеличением  $Y$  и нагрузки первой ступени преимущество по КПД у диагональной турбины уменьшается.

Исследование влияния распределения средних радиусов  $(r_2/r_1)_{ст}$  при усовершенствовании методики расчета КПД в диагональной турбине позволило получить количественную оценку влияния диагональности на КПД турбины, что необходимо на начальной стадии проектирования ТНД на предприятиях по проектированию авиационных двигателей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абианц, В.Х. Теория авиационных газовых турбин / В.Х. Абианц. – М.: Машиностроение, 1979. – 246 с.
2. Богомолов, Е.Н. Основы теории и выбор параметров авиационных газовых турбин / Е.Н. Богомолов. – Ярославль, 1986. – 88 с.

### Кашеева Полина Витальевна

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева  
кандидат технических наук, старший преподаватель РГАТУ  
E-mail: alex.kasheev@rambler.ru

P.V. KASCHEYEVA

## ABOUT DESIGN OF DIAGONAL GAS TURBINES OF TURBOFANS

*This article describes influence of distribution of average radius ( $r_2/r_1$ ) of the stages of three stage low pressure turbine of turbofan at its efficiency at various loading parameter  $Y$ . It is refined method of calculating the efficiency of the turbine by taking into account the effect of the Koriolis forces on parameters of stages. It is shown that reduction of  $Y$  and load the first stage increases advantage of the diagonal turbine over the axial turbine.*

**Keywords:** low pressure turbine, turbofan, loading parameter, efficiency, average radius.

## BIBLIOGRAPHY

1. Abianc, V.H. Teorija aviacionnyh gazovyh turbin / V.H. Abianc. – М.: Mashinostroenie, 1979. – 246 s.
2. Bogomolov, E.N. Osnovy teorii i vybor parametrov aviacionnyh gazovyh turbin / E.N. Bogomolov. – Jaroslavl', 1986. – 88 s.

### Kascheyev Paulina Vitalyevn

Rybinsk state aviation technical university of a name of P.A.Solovyev  
Candidate of Technical Sciences, senior teacher of RGATU  
E-mail: alex.kasheev@rambler.ru

# МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 62-182:621.882:621.9.048.6

А.П. БАБИЧЕВ, Д. ЭССОЛА, Н.С. КОВАЛЬ

## РАЗБОРКА РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВИБРОВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ В ХОДЕ РЕМОНТА И УТИЛИЗАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Рассмотрены вопросы, связанные с разборкой резьбовых соединений с использованием низкочастотных колебаний (15–50 Гц), сообщаемых виброволновым методом, посредством сплошного стального стержня, способствующих многократному снижению крутящего момента разборки. Приведены результаты сравнительных испытаний, учитывающие обработку одноименных соединений выдержанных на влажном воздухе с различными интервалами времени, а так же результаты, характеризующие взаимосвязь используемой схемы виброволнового воздействия на элементы соединения, продолжительности воздействия на объект и эффективность разборки.*

**Ключевые слова:** разборка, разъемные резьбовые соединения, ремонт, утилизация, виброволновое воздействие, жизненный цикл изделия.

Жизненный цикл изделия (ЖЦИ) охватывает все стадии прохождения его с начала появления идеи о его создании. Его понятие включает в себя все стадии жизни изделия – от изучения рынка перед проектированием, производством, эксплуатацией и до утилизации после использования (рис. 1).



**Рисунок 1 – Стадийная структура жизненного цикла изделия**

Эксплуатация изделий предусматривает его использование, хранение и транспортирование при периодическом применении, обслуживании и ремонт, а так же вторичного использования по новому применению, частично или полностью после утилизации. С учётом различного функционального назначения рациональная эксплуатация изделия обеспечивается выполнением установленного конструктором технического обслуживания и ремонта при необходимости. Последний характеризуется сложным структурным производственным процессом, и состоит из следу-

ющих основных действий: многостадийные моечно-очистные операций, многоэтапная разборка, дефектация, восстановление, сборка машины, а также вспомогательные операции: контроль качества, складирование, транспортирование. Вторичное использование изделия осуществляется в случае смены потребителя или при использовании по новому применению так называемой первичной формы утилизация изделия. Опыт показывает, что более половины машин проходят хотя бы один из выявленных путей в течение их жизненного цикла. В процессе ремонта машин после их дефектации, а так же в результате разборки изделия, не подвергающихся ремонту и восстановлению, детали подразделяются на три группы: годные, требующие ремонта и негодные, представляющие собой вторичную форму утилизация изделия. Данный вид утилизации приемлем для всех видов изделий, их составных частей, сборочных единиц, а так же деталей. В зависимости от применяемой на предприятии формы ремонта и утилизации, разобранные изделия или их элементы, могут быть применены после их восстановления в данном, или в подходящем изделии, а так же в качестве материального ресурса (например, запчастей или комплектующих для других изделий). Необходимость ограничить загрязнение окружающей среды, экономия природных и материальных ресурсов,

энергии, сокращение времени и средств для производства новой продукции различного назначения ведётся как в России, так и во многих развитых странах. Эта тенденция более эффективна в регулируемой производственной среде с информационной поддержкой (частной или государственной). Утилизировать можно деталь, сборочную единицу, а так же любые машины в целом.

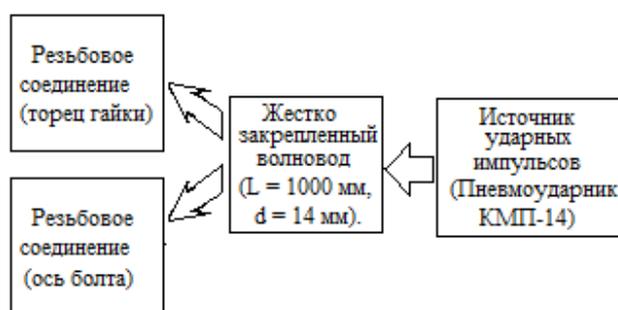
Производственный процесс утилизации, так же как и ремонт содержит многостадийную очистку и мойку и чередуется разборкой различного рода соединений (рис. 2). Среди всех разъёмных соединений, широко применяются резьбовые.



*Рисунок 2 – Обобщенная схема утилизации изделия*

Воздействие окружающей среды и температурные колебания существенно влияют на исходное состояние соединения, а также существенно изменяют усилия необходимые для его разъединения, образуя местные связи между деталями участвующими в соединении, и затрудняют процесс разборки составных частей изделия. Известны примеры применения вибрационного воздействия при разборке машин различного назначения при ремонте и утилизации. Виброволновое воздействия является одним из способов и имеет уникальный характер ослабления момента затяжки, образующихся связей резьбовых разъёмных соединений, оказывается одним из эффективных путей решения поставленной задачи [1, 2].

Для подтверждения выше изложенного, проведены экспериментальные исследования по схеме, представленной на рисунке 3.



*Рисунок 3 – Нагружение резьбового соединения с применением волновода*

Полученные результаты (рис. 4 а, б) показывают, что по мере возрастания диаметра крепежного элемента резьбового соединения и длительности воздействия на него окружающей среды, происходит возрастание крутящего момента, требуемого для разборки. Обработка соединения при помощи волновода обеспечивает снижение крутящего момента затяжки до определенного значения, при котором продолжительность процесса разборки оптимальна. Дальнейшая обработка не сопровождается существенным изменением  $M_{кр}$ . Установлено, что сообщение виброволнового воздействия перпендикулярно оси гайки создает наилучшие условия для разборки резьбового соединения (рис. 4, а).

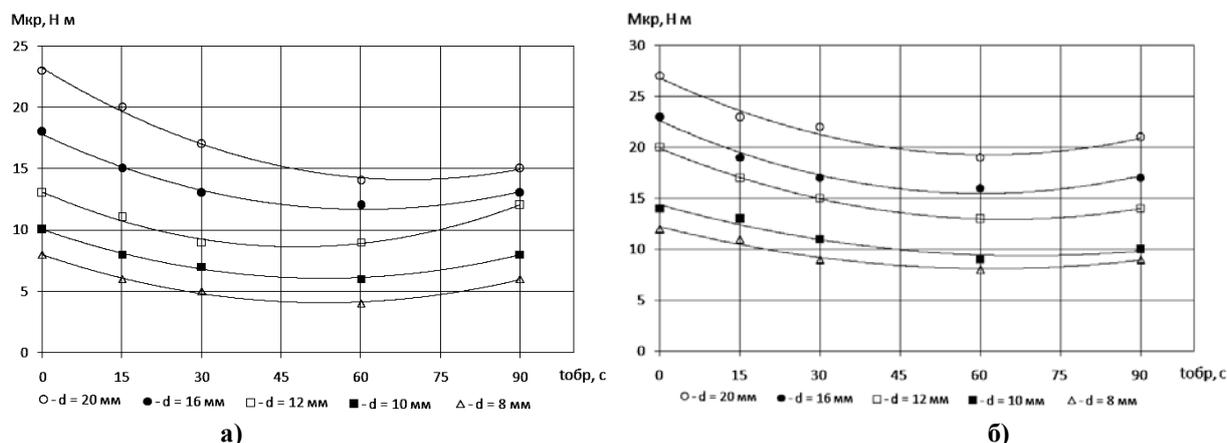


Рисунок 4 – Зависимость крутящего момента при разборке резьбового соединения от продолжительности процесса при передаче виброволнового воздействия через волновод  
а) перпендикулярно оси болта; б) параллельно оси болта

На рисунке 5 приведены результаты исследования влияния продолжительности виброволнового воздействия на резьбовые соединения, выдержанные на воздухе с постоянной влажностью, на изменение крутящего момента при разборке. Установлено, что увеличение диаметральных размеров от 8 до 16 мм резьбовой пары приводит к повышению требуемого момента для разборки. Соединения, подверженные воздействию влажного воздуха в течение месяца (рис. 5, кривые 1) требовали для разборки приложения большого крутящего момента, по сравнению с деталями недельной выдержки (рис. 5, кривые 2). Это объясняется, тем, что изделия более подвержены коррозии по контактирующим поверхностям.

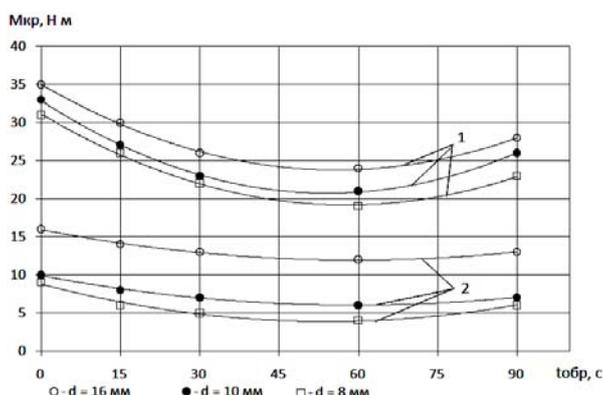
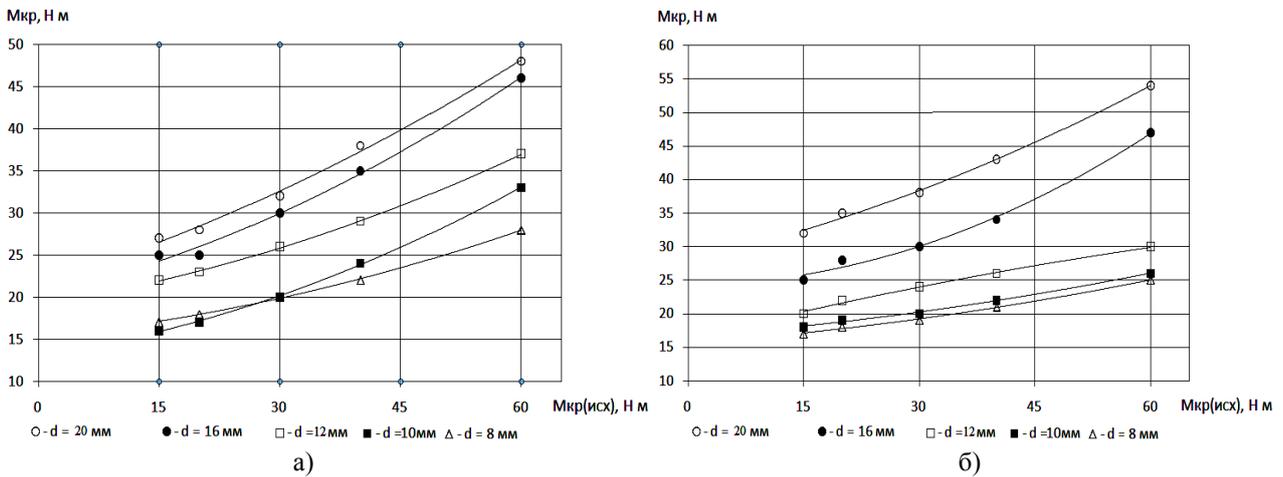


Рисунок 5 – Зависимость крутящего момента при разборке резьбового соединения от продолжительности вибрационного воздействия при выдержке пары болт-гайка на влажном воздухе в течении  
1 – месяц; 2 – одна неделя

Виброволновая обработка образцов, выдержанных в условиях влажного воздуха при разных интервалах времени, обеспечивает постепенное снижение крутящего момента при увеличении продолжительности процесса от 15 до 60 секунд (рисунок 6, а, б). Стоит отметить, что крутящий момент, требуемый для разборки резьбового соединения, существенно зависит от момента затяжки.



**Рисунок 6 – Зависимость величины крутящего момента при разьеме резьбового соединения от затяжки, диаметров соединяемых элементов и схемы нагружения ( $t_{обр} = 60$  с)**  
 а) вибрационное воздействие по грани гайки; б) вибрационное воздействие по оси болта

Таким образом, можно сделать вывод о том, что виброволновое воздействие достаточно интенсивно разрушает образовавшиеся связи в процессе эксплуатации деталей участвующих в соединениях, до определенного значения. Это позволяет заметно снизить трудоемкость, а так же сократить, время выполнения отдельных разборочных операций в процессе ремонта или утилизации изделий машиностроения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпунин, М.Г. Жизненный цикл и эффективность машин. / М.Г. Карпунин, Я.Г. Любинецкий, Б.И. Майданчик. – М.: Машиностроение, 1989. – 312 с.
2. Тельнов, Н.Ф. Ремонт машин / Н.Ф. Тельнов. – М.: Агропромиздат, 1992. – 560 с.

**Бабичев Анатолий Прокофьевич**

Донской Государственный Технический Университет, г. Ростов-на-Дону  
 Доктор технических наук, профессор каф. «Технология машиностроения»  
 г. Ростов-на-Дону, ул. Лермонтовская 90 кв 117  
 тел: 88632738513  
 E-mail: vibrotech@mail.ru

**Эссоло Дьёдонне**

Донской Государственный Технический Университет, г. Ростов-на-Дону  
 аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
 тел: +7 9612800882 / +237 79754156 / +237 99994755.  
 E-mail: essola\_die@yahoo.com

**Коваль Николай Сергеевич**

Донской Государственный Технический Университет, г. Ростов-на-Дону  
 Инженер-исследователь НИИ «Вибротехнология»  
 г. Ростов-на-Дону, ул. Королева 16/2 кв.58  
 тел: 89045027898  
 E-mail: Koval-nc@mail.ru

A.P. BABICHEV, D. ESSOLA, N.S. KOVAL

## DISASSEMBLY OF THREADED CONNECTIONS USING VIBROWAVE METHOD IN THE PROCESS OF REPAIRING AND UTILIZATION OF MACHINE-BUILDING INDUSTRIES PRODUCTS

*The problems related are about the disassembly of detachable threaded connections using low-frequency oscillations (15–50 Hz), that are communicate by vibo-wave method through compact steel rod to facilitate multiple reduction of disassembling torque. The comparative analysis of similar treaded connections that have been maintain in moist air at various intervals of time as well as the results characterizing the relationship of used vibro-wave impact scheme on the elements of the compound, the duration of vibro-wave impact exposure on the object and the efficiency of disassembly are given in the work.*

**Keywords:** *disassembly, detachable threaded connections, repair, utilization (recycling), vibro-wave impact, product life cycle.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Karpunin, M.G. Zhiznennyj cikl i jeffektivnost' mashin. / M.G. Karpunin, Ja.G. Ljubineckij, B.I. Majdanchik. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 312 s.
2. Tel'nov, N.F. Remont mashin / N.F. Tel'nov. – M.: Agropromizdat, 1992. – 560 s.

### **Babichev Anatoly Prokofyevich**

Don State Technical University, Rostov-on-Don

Doctor of Engineering, professor каф. "Technology of mechanical engineering"

Rostov-on-Don, Lermontovskaya St. of 90 kV 117

тел:88632738513

E-mail: vibrotech@mail.ru

### **Essola Dieudonné**

Don State Technical University, Rostov-on-Don

graduate student of Technology of Mechanical Engineering chair

ph. +7 9612800882 / +237 79754156/+237 99994755.

E-mail: essola\_die@yahoo.com

### **Koval Nikolay Sergeyeovich**

Don State Technical University, Rostov-on-Don

Research engineer of scientific research institute "Vibrotekhnology"

Rostov-on-Don, Koroleva St. of 16/2 quarter 58

ph. 89045027898

E-mail: Koval-nc@mail.ru

Р. В. ЖИГАЛОВ, В. Г. ГУСЕВ

## ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ ИНСТРУМЕНТА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПЛОСКОГО ТОРЦОВОГО ШЛИФОВАНИЯ

*Исследовано влияние статической неуравновешенности инструмента на производительность плоского торцового шлифования. Предложены решения, обеспечивающие повышение производительности процесса.*

**Ключевые слова:** плоское торцовое шлифование, производительность, многофакторный эксперимент, уравнение регрессии.

В настоящее время остается неизученным вопрос влияния дисбалансов кругов на производительность дискретного плоского торцового шлифования, несмотря на то, что главный вектор дисбалансов  $D_{\dot{\omega}}$  инструмента является одним из доминирующих факторов, определяющих практически все выходные параметры процесса. Это приводит к недоиспользованию потенциальных возможностей высокопроизводительного шлифовального оборудования.

Экспериментальные исследования проводили в два этапа: на первом из них выполняли однофакторный эксперимент, заключающийся в определении степени влияния  $D_{\dot{\omega}}$  и режимов обработки на производительность технологической операции, на втором – планируемые многофакторные эксперименты.

Производственные наблюдения, проведенные авторами за процессами плоского торцового шлифования большого количества деталей тракторов в условиях Владимирского моторо-тракторного завода, показали, что отходы шлифования (шлам), образующиеся при торцовом шлифовании оседают и прочно сцепляются с корпусом и режущими сегментами инструмента. Под действием инерционных центробежных сил отходы уплотняются и распределяются неравномерно относительно оси вращения торцового шлифовального круга, создавая значительные эксплуатационные дисбалансы [1].

В качестве режущего инструмента при реализации экспериментальных исследований использовали торцовый шлифовальный круг с наружным диаметром 450 мм. Количество абразивных режущих сегментов трапецеидального поперечного сечения, входящих в один комплект, устанавливаемый одновременно на плоские поверхности планшайбы, составляет 10 штук. Тип сегментов - 5С 100×80×150 мм, ТУ 2 – 036 – 01 – 091. Характеристика абразивного материала: 25А40НСТ12БА.

Эксперименты проводили на плоскошлифовальном станке модели 3Е756 с круглым столом и вертикально расположенной шлифовальной бабкой. Обработывали с двух сторон плоскости листа переднего, выполненного из стали Ст.3. Длина, ширина и толщина заготовки соответственно равны: 380 мм, 370 мм и 8 мм. Общий припуск на обработку с обеих сторон равен 2 мм.

На всех стадиях эксперимента фиксировали основное время на выполнение шлифовальной операции и измеряли износ абразивных сегментов, а также определяли съем металла за определенное время шлифования. В результате измерений и последующих расчетов расхода абразивного материала, съема металла определяли коэффициент шлифования, являющийся одним из основных показателей, по которому оценивают эффективность шлифовальной операции.

Обработку заготовок проводили на следующих режимах резания: частота вращения инструмента – 980 мин<sup>-1</sup>, частота вращения рабочего стола с установленными заготовками – 12 мин<sup>-1</sup>, вертикальная подача шлифовальной бабки с инструментом – (0,08 – 0,16) мм/мин.

В ходе экспериментов контролировали величину главного вектора дисбалансов  $D_{\dot{\omega}}$ , для этого использовали дисковое балансировочное приспособление, с помощью которого

корректировали массу торцового шлифовального круга, проработавшего в течение заданного промежутка времени и снятого со шпинделя станка для определения  $D_{\tilde{n}\tilde{o}}$ .

Главный вектор дисбалансов  $D_{\tilde{n}\tilde{o}}$  определяли на основании результатов корректировки массы инструмента с использованием смеси эпоксидной смолы и отвердителя, устанавливаемого на периферию абразивных сегментов в противофазу вектору  $D_{\tilde{n}\tilde{o}}$ . После окончания корректировки массы инструмента смесь смолы и отвердителя снимали с круга и взвешивали на аналитических весах.

Умножением известного радиуса крепления грузиков на взвешенную массу, находили модуль главного вектора дисбалансов торцового шлифовального инструмента. Точность, с которой определяли значения главного вектора дисбалансов, составляла 337,5 г·мм. Относительно высокая точность, с которой измеряли  $D_{\tilde{n}\tilde{o}}$ , объясняется тем, что корректировку массы инструмента проводили на дисковом приспособлении, у которого трение скольжения в опорах заменено трением качения.

Объем снятого материала заготовки за определенное время шлифования определяли на основании результатов измерения толщины заготовок листа переднего до и после обработки. Разность толщин листа до и после обработки представляет собой снятый припуск. Умножением припуска на площадь обработанной поверхности листа переднего находили объем снятого металла.

Аналогично определяли расход абразивного материала сегментов, потребного для снятия указанного выше объема металла. Отличие в определении расхода абразива и объема снятого металла заключалось в том, что длину каждого сегмента до и после шлифования измеряли относительно нескольких точек режущего торца, после чего находили среднее значение толщины изношенного слоя одного абразивного сегмента.

Описанную процедуру повторяли для всех десяти абразивных сегментов, затем расход абразива для всего круга находили суммированием объемного износа всех сегментов. Точность измерения применяемого инструмента марки Maschita РК составила 20 мкм.

Делением объема металла, снятого за одну минуту шлифования листа переднего, на расход абразивного материала сегментов за это же время получали коэффициент шлифования.

При проведении экспериментов применяли шлифовальный круг с отношением высоты к наружному диаметру, равным 0,3. В этом случае главный момент дисбалансов оказывает незначительное влияние на параметры качества и производительность шлифовальной операции [2], поэтому в процессе исследований влиянием главного момента дисбалансов пренебрегали.

Проведенные однофакторные эксперименты показали, что с течением времени обработки эксплуатационные дисбалансы инструмента увеличиваются, возрастает износ абразивных сегментов и основное время шлифовальной операции (рис. 1 а, б).

В соответствии с планом  $N = 2^3 = 8$  реализовали многофакторный эксперимент, при этом в качестве независимых факторов, влияющих на параметры оптимизации, выбрали: главный вектор дисбалансов инструмента  $D_{\tilde{n}\tilde{o}}$ , круговую подачу стола  $S_{\tilde{e}\tilde{o}}$  с установленными заготовками и вертикальную подачу  $S_{\tilde{a}}$  шпиндельной бабки с кругом. В качестве параметров оптимизации выбраны: производительность процесса обработки  $Q$  (шт/ч), минутный съем металла  $Q_i$  (мм<sup>3</sup>/мин) и расход абразива  $Q_{\tilde{a}}$  (мм<sup>3</sup>/мин).

После статистической обработки результатов многофакторного эксперимента были получены следующие уравнения регрессии в кодовом обозначении факторов и параметров:

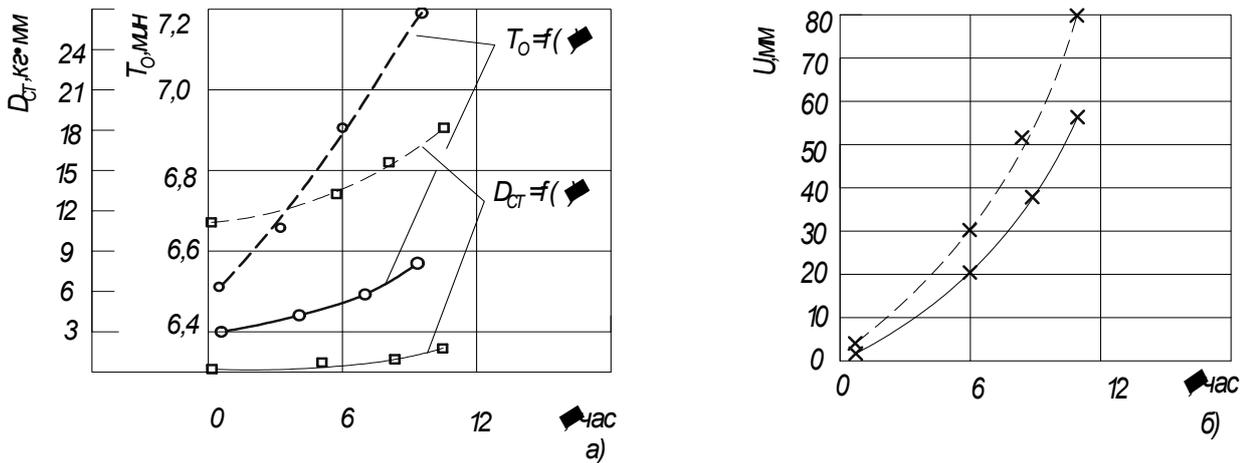


Рисунок 1 – Влияние времени шлифования  $\tau$  на изменение главного вектора дисбалансов  $D_{ст}$ , основного времени  $T_o$

а) и износа абразивных сегментов б): - - без использования электромагнитного устройства; - с использованием устройства

$$y_1 = 10,4 - 1,4 x_1 + 0,6 x_2 + 0,4 x_3 \quad \text{— для производительности процесса шлифования;} \quad (1)$$

$$y_2 = 7976,4 - 1065,7 x_1 + 484,4 x_2 + 290,6 x_3 \quad \text{— для минутного съема металла;} \quad (2)$$

$$y_3 = 29451 + 170,7 x_1 + 1511 x_2 \quad \text{— для минутного расхода абразива,} \quad (3)$$

где  $x_1$  – соответствует главному вектору дисбалансов,  $x_2$  – вертикальной подаче,  $x_3$  – круговой подаче стола соответственно.

Получена экспериментальная модель производительности шлифовальной операции в функции  $D_{н\dot{o}}$  и режимов обработки:

$$Q_{\phi, \nu} = \frac{8,353 \cdot 10^3 - 70,1 D_{ст} + 9,688 \cdot 10^3 S_B + 80,7 S_{сп}}{F_3 Z \gamma}, \quad (4)$$

где  $F$  - площадь обрабатываемой заготовки,  $Z$  - величина снимаемого припуска,  $\gamma$  - плотность обрабатываемого материала.

Из уравнений (1) – (3) следует, что наибольшее влияние на производительность процесса шлифования, минутный съем металла и минутный расход абразива оказывает главный вектор дисбалансов торцового шлифовального круга. При увеличении  $D_{н\dot{o}}(x_1)$  производительность и скорость съема металла уменьшается, а расход абразивного материала сегментов увеличивается. В меньшей степени по сравнению с главным вектором дисбалансов влияют на указанные параметры процесса плоского торцового шлифования вертикальная подача инструмента и круговая подача стола с заготовками. При увеличении вертикальной подачи  $S_{\dot{a}}$  производительность, скорость съема металла и расход абразивного материала возрастают.

На минутный расход абразивного материала влияют лишь главный вектор дисбалансов и вертикальная подача инструмента, в то время как круговая подача не оказывает на него ощутимого влияния, о чем свидетельствует отсутствие в уравнении (3) фактора  $x_3$ . При увеличении вертикальной  $S_{\dot{a}}$  и круговой  $S_{\dot{e}o}$  подачи производительность и скорость съема металла возрастают. Также возрастает расход абразивного материала при увеличении вертикальной подачи инструмента, что объясняется более тяжелыми условиями работы абразивных режущих зерен сегментов.

Дисбалансы инструмента вызывают интенсивный износ режущих абразивных зерен, поскольку в процессе колебаний, источником которых является главный вектор дисбалансов  $D_{н\dot{o}}$ , зерна проходят больший путь в материале заготовки и подвергаются воздействию не

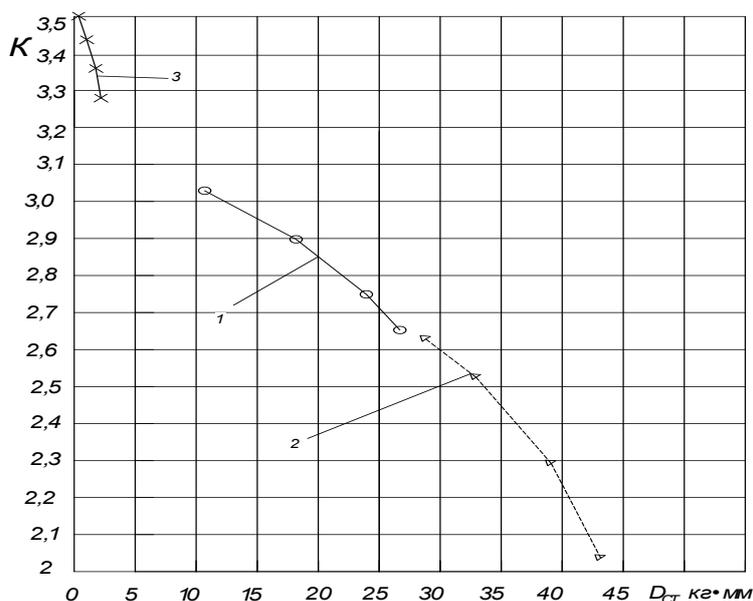
только силы резания, неуравновешенных центробежных сил, но и инерционных сил, обусловленных действием виброускорений колебательного процесса.

При более интенсивном износе, уменьшается ширина и высота режущей части каждого абразивного зерна, а неуравновешенный шлифовальный круг, чтобы осуществлять непрерывный процесс резания, вхолостую проходит путь, равный величине износа зерен, что приводит также к уменьшению минутного съема металла, а, следовательно, к снижению производительности технологической операции. Результаты исследований показали, что для повышения эффективности процессов плоского торцового шлифования необходимо, в первую очередь, уменьшать главный вектор дисбалансов инструмента.

Для уменьшения технологических дисбалансов дискретных торцовых шлифовальных кругов, обусловленных закреплением в инструменте абразивных сегментов, отличающихся по массе, разработана методика и компьютерная программа подбора абразивных сегментов в один комплект, обеспечивающие минимальный разброс масс сегментов и значение главного вектора дисбалансов инструмента.

С целью снижения величины эксплуатационных дисбалансов, обусловленных износом абразивных сегментов и сцеплением отходов шлифования с инструментом, разработано электромагнитное устройство [3], притягивающее отходы шлифования электромагнитным полем к своей наружной цилиндрической поверхности и, тем самым, предотвращающее сцепление шлама с планшайбой и абразивными сегментами быстро вращающегося торцового шлифовального инструмента.

При использовании электромагнитного устройства коэффициент шлифования значительно повышается по сравнению с процессом шлифования без устройства (рис. 2), что объясняется меньшими дисбалансами инструмента, возникающими в процессе его эксплуатации.



**Рисунок 2 - Изменение коэффициента шлифования**  
 1. для базового процесса; 2. при искусственно внесенном дисбалансе;  
 3. при использовании электромагнитного устройства

Предложенные технические и технологические решения позволят повысить производительность процесса плоского торцового шлифования, увеличить ресурс работы инструмента без существенных капитальных затрат на модернизацию применяемого в производстве шлифовального оборудования.

Применение упомянутой выше компьютерной программы позволило повысить производительность процесса плоского торцового шлифования листа переднего в условиях Владимирского моторо-тракторного завода на 20%, а использование электромагнитного устройства, уменьшающего эксплуатационные дисбалансы инструмента, – на 40 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жигалов, Р.В. Механизм формирования эксплуатационных дисбалансов торцовых шлифовальных кругов / Р.В. Жигалов, В.Г. Гусев, Н.Н. Мирошкина // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология». – Курск: Изд-во Курск ГТУ, 2011. – с. 134 – 136.
2. Горбунов, Б.И. Уравновешивающие устройства шлифовальных станков./ Б.И. Горбунов, В.Г. Гусев // М.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
3. Жигалов, Р.В. Пат. № 2417149 Российская Федерация, МПК В24В, 55/00. Электромагнитное устройство для предотвращения эксплуатационных дисбалансов торцовых шлифовальных кругов / Жигалов Р.В., Гусев В.Г., Швагирев П.С.: заявл. 26. 08. 09 ; опубл. 27. 04. 11. Бюл. № 12.

### **Жигалов Роман Валерьевич**

ОГБОУ СПО «Касимовский нефтегазовый колледж»

Кандидат технических наук, зав. учебно-производственными мастерскими

Тел.: (49131) 2-27-29

E-mail: roman.jigalow@yandex.ru

### **Гусев Владимир Григорьевич**

ФГОУ ВПО «Владимирский государственный университет»

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Тел.: (4922) 479-924.

E-mail: prof\_gusev@mail.ru

---

R.V. ZHIGALOV, V.G. GUSEV

## **INFLUENCE OF THE TOOL STATIC UNBALANCE ON A FLAT FACE GRINDING PRODUCTIVITY**

*Influence of the tool static unbalance on a flat face grinding productivity is investigated. The decisions providing increase of process productivity are offered.*

**Keywords:** flat face grinding, productivity, multifactorial experiment, the regress equation.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Zhigalov, R.V. Mechanizm of an operational disbalance formation of a face grinding tools / R.V. Zhigalov, V.G. Gusev, N.N. Miroshkina // the proceedings collection of the international scientifically-practical conference «Modern materials, technic and technology». - Kursk: Publishing house Kursk GTU, 2011. – P. 134 – 136.
2. Gorbunov, B.I. Balancing devices of a grinding machine tools / B.I. Gorbunov, V.G. Gusev // M: Mechanical engineering, 1976. – 168 P.
3. Zhigalov, R.V. Pat. № 2417149 Russian Federation, MPK B24B, 55/00. The electromagnetic device for prevention of an operational disbalance of face grinding wheels / Zhigalov R.V, Gusev V.G, Shvagirev P.S: decl. 26. 08. 09; pub. 27. 04. 11. Bul. № 12.

### **Roman Valeryevich Zhigalov**

Oil and gas College Casimov

Can. Sc. Tech., Manager of the Workshop

Phone: (49131) 2-27-29.

E-mail: roman.jigalow@yandex.ru

### **Vladimir Grigorievich Gusev**

FSEI HVT «State university Vladimir»

Dr. Sc. Tech., Prof. of the department «Machine building technology»

Phone: (4922) 479-924

E-mail: prof\_gusev@mail.ru

УДК 621.99

А.В. КИРИЧЕК, У. ХАСЬЯНОВ, А.Ю. АЛБАГАЧИЕВ, Д.У. ХАСЬЯНОВА

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Ti-Ni

*В работе приведен анализ явлений происходящих в очаге деформации материалов с ЭПФ при обработке резанием. Рассмотрены условия, способствующие к повышению режимов обработки сплавов на основе Ti-Ni.*

**Ключевые слова:** эффект памяти формы, резание, обрабатываемость металла, сверление, фрезерование.

Известно, что основными причинами низкой обрабатываемости сплавов на никелевой основе являются большие силы резания и высокие температуры. Силы резания (рис.1) обуславливают большое количество тепла, выделяющееся на единицу срезаемого объема металла. Низкая теплопроводность таких сплавов приводит к локализации высоких температур в зоне резания.

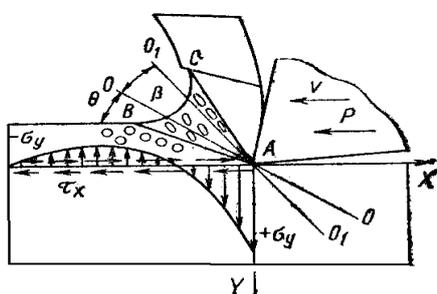


Рисунок 1 – Процесс резание металла

Обработка титана и его сплавов затруднена склонностью материала к налипанию и задиранию, а также тем, что практически все металлы и огнеупоры растворяются в титане. Стружка представляет собой сплав титана и твердого материала режущего инструмента.

Опытным путем было установлено, что наиболее высокими режущими свойствами при лезвийной обработке обладают твердые сплавы группы ВК, а именно: ВКЗМ, ВК4, ВК60М, ВК8, ВК100 и ВК150М. Из перечисленных марок при обработке TiNi наибольшей стойкостью обладают сплавы ВК6М, ВК8М и ВК150М.

Рассматриваемые сплавы с ЭПФ, основными компонентами которых являются титан и никель, представляют особый класс интерметаллидов.

По своим физическим характеристикам интерметаллиды не имеют свойств компонентов. Свойства сплава никелида титана, который содержит 50ат% Ni и 50ат% Ti, значительно отличаются от своих составных частей. Поэтому прямой аналогии по обрабатываемости резанием рассматриваемого материала с известными группами сплавов на основе никеля и титана провести нельзя. Твердость таких сплавов незначительна и находится в пределах 210 ÷ 360 Нв, однако обрабатываемость сплавов TiNi резанием вызывает значительные трудности.

При резании сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) пластическая деформация способствует к образованию мартенсита напряжений. Причем температура в очаге деформации должна быть ниже температуры Md (максимальной температуры, при которой мартенситные превращения можно стимулировать механическим воздействием). Закономерности и механизмы деформации при двойниковании отличаются кооперативностью движения атомов. В локальных областях сохраняется их соседство при значительной (до 20%) деформации решетки. При деформировании кристаллит скачкообразно делится плоскостью двойникования на две части. Одна часть кристаллической решетки становится зеркальным отображением другой. [1] Деформировано-напряженные области материала (рис. 2), где плоскости двойников смещаются друг относительно друга, не только значительно увеличивают фактическую площадь поверхности, но и мгновенно способствуют к образованию активной поверхности, контактируемой с режущим инструментом. Деформация аустенитной фазы материала способствует к образованию мартенсита напряжений, который сопровождается фазовыми превращениями.

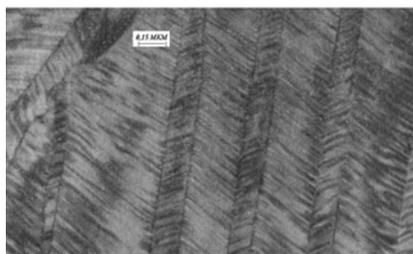


Рисунок 2 – Электронная микрофотография процесса двойникования

При деформировании кристаллит скачкообразно делится плоскостью двойникования на две части. Одна часть кристаллической решетки становится зеркальным отображением другой. [1] Деформировано-напряженные области материала (рис. 2), где плоскости двойников смещаются друг относительно друга, не только значительно увеличивают фактическую площадь поверхности, но и мгновенно способствуют к образованию активной поверхности, контактируемой с режущим инструментом. Деформация аустенитной фазы материала способствует к образованию мартенсита напряжений, который сопровождается фазовыми превращениями.

Деформация термического мартенсита характеризуется постепенным изменением параметров решетки с образованием моноклинного мартенсита, сопровождается повышенной упругостью при снижении внешней нагрузки и возникает при сочетании упругого двойникования и термоупругого мартенситного превращения (МП). Термоупругое МП – это одновременно фазовый и геометрически-обратимый деформационный процесс. Такие процессы реализуются при изменении температуры в интервалах фазовых превращений (Mn – Ак) для локальных областей обрабатываемого материала и под действием механических напряжений при температурах ниже Md [2].

Практически было установлено, что для всех сплавов с температурой мартенситного превращения Mn выше комнатной, а также значительно ниже, температура Md находится в области примерно 200 °С.

Аустенитная фаза с ОЦК решеткой превращается в мартенситную с ГЦК решеткой. Данное превращение приводит к экзо- и эндотермическим эффектам. На рисунке 3 представлена диаграмма нагружения и разгрузки образца из TiNi при 200°С на воздухе и в воде.

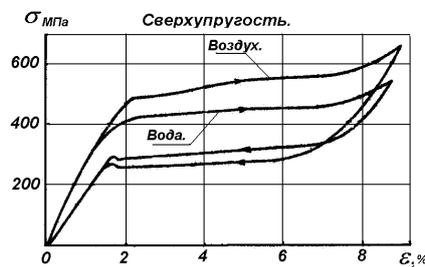


Рисунок 3 – Диаграмма нагружения и разгрузки образца из TiNi при 200°С на воздухе и в воде

Максимальный температурный эффект наблюдается на межфазной границе, где достигаются предельные значения температуры. Для сплава TiNi они достигают примерно 40 °С.

Из вышесказанного видно, что пластическая деформация проявляется в условиях неоднородности механического напряжения, температуры и химического потенциала, т.е. характеризуется весьма сложной механической, термической и физико-химической средой. Анализ условий пластического деформирования и явлений, сопровождающих процессы резания, позволяют установить оптимальные режимы механической обработки материала и спрогнозировать некоторые технологические приемы, обеспечивающие эти режимы.

Большие силы резания и высокие контактные температуры, возникающие при обработке сплавов на основе TiNi, являются основными причинами низкой стойкости режущего инструмента.

Процесс резания сплавов на основе TiNi сопровождается образованием теплоты. Распределение теплового баланса представлено на рисунке 4.

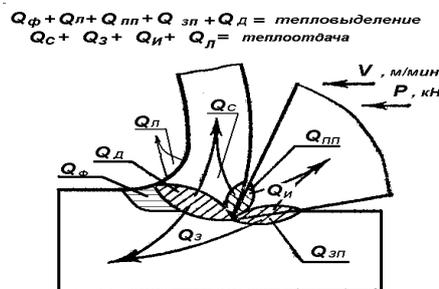


Рисунок 4 – Схема распределение теплового баланса

Источниками образования тепла являются следующие факторы:

- Qд – теплота, образуемая в результате пластического деформирования материала в прирезцовой зоне;

- $Q_f$  – теплота, выделяемая в процессе фазовых превращений при деформировании материала в процессе резания;
- $Q_{пп}$  - теплота трения по переднее поверхности режущего инструмента;
- $Q_{зп}$  - теплота трения по задней поверхности режущего инструмента.

Теплый баланс в очаге деформации при резании, можно выразить следующим соотношением:

$$Q_d + Q_f + Q_{пп} + Q_{зп} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \text{ [Дж]}$$

где  $Q_1$ - количество отвода теплоты, уходящее со стружкой;

$Q_2$ - количество отвода теплоты, уходящее в заготовку;

$Q_3$ - количество отвода теплоты, уходящее в резец;

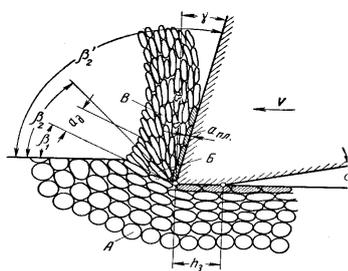
$Q_4$ - количество отвода теплоты, уходящее путем излучения.

$Q_d$ - основное количество выделения теплоты, происходящее в результате упругопластического деформирования сплава.

Известно, что при резании конструкционных материалов на основе Ti или Ni, приложение напряжений порядка 30 МПа способствует к повышению температуры на  $10 \div 12^\circ\text{C}$ . При резании TiNi в аустенитном состоянии, значительная нагрузка способствует к образованию мартенсита напряжений (B19), которое сопровождается дополнительным эндотермическим нагревом. Мгновенный “выход” материала из зоны напряженного состояния способствует к обратному термоупругому мартенситному переходу МП, а также переходу материала в аустенитное состояние (B2), при этом проявляется сверхупругость. Чем больше величина упругой деформации, тем больше сила трения. Для снижения сил трения у режущего инструмента имеются задние углы, величина которых определяется степенью упругой составляющей материала. [3]

Из представленных явлений, показанных на рисунке 5 видно, что при мгновенном выходе резца из зоны резания происходит закономерное смещение мономолекулярных слоев металла по плоскостям скольжения в результате деформации. Такие плоскости называются плоскостями сдвига и расположены под углом  $\beta_2$  к направлению резания.

Величина угла ( $\beta_2 - \beta_1$ ) находится в пределах от 0 до  $30^\circ$ . С увеличением пластичности металла величина угла ( $\beta_2 - \beta_1$ ) возрастает; при обработке хрупких металлов величина угла ( $\beta_2 - \beta_1$ ) близка к нулю. Относительное скольжение тончайших поверхностей в процессе резания вносит значительный вклад в источники образования количества тепла. В связи с тем, что под действием сил резания, деформируемые частицы металла претерпевают термоупругие МП, при этом образуется мартенсит напряжений. Под воздействием напряжений преобразование аустенитной фазы в мартенситную сопровождается экзотермическими явлениями, которые приводят к дополнительному выделению тепла ( $Q_f$ ), что способствует интенсивному разогреву материала в очаге деформации.

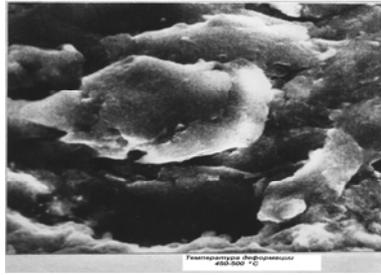


**Рисунок 5 – Процесс резания материала на основе Ti или Ni**

Сложность и отсутствие общего решения о закономерностях процессов пластической деформации до разрушения требуют создания различных методов решения. Одним из таких методов является анализ разрушений образцов при температурах, обеспечивающих условия нахождения материала в исследуемом фазовом состоянии.

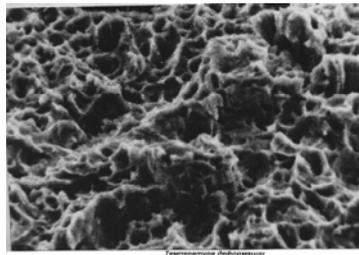
Исследования физических свойств осуществлялось на ряде композиций материалов, а характер разрушений представлен на примере для сплава  $48\text{at}\% \text{Ti} + 2\text{at}\% \text{Fe} + \text{Ni}$ , имеющего температуру фазовых превращений  $M_n = -90$ ,  $M_k = -60$ ;  $A_n = -40$ ,  $A_k = 20^\circ\text{C}$ .

При температуре деформации в интервале  $400 \div 500^\circ\text{C}$  (выше температуры  $M_d$ ) материал заведомо находится в аустенитном состоянии (B2) (рис. 6). Происходит вязкое разрушение с изломом «чашечного» вида, которое отличается значительной пластической деформацией (до 30%), характерной для разрушения скольжением.



*Рисунок 6 – Микрофотография процесса разрушений для сплава 48at%Ti + 2at%Fe+Ni*

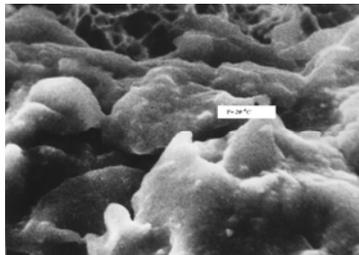
В интервале температур  $150 \div 250^{\circ}\text{C}$  (ниже температуры  $M_d$ ) наблюдается глубокий, бесформенно-сотовый характер изломов (рис. 7), сопровождающийся высоким уровнем напряжений разрушения и значительной пластичностью аустенитной фазы (B2).



*Рисунок 7 – Микрофотография характера изломов в металле*

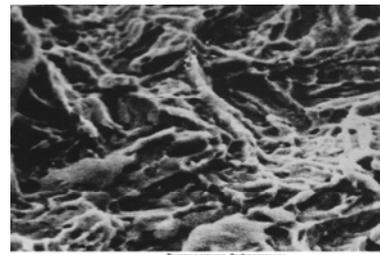
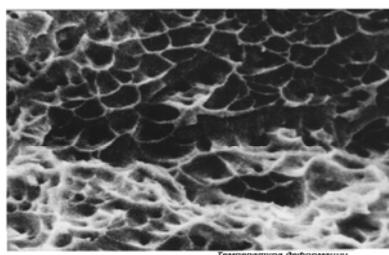
Такое разрушение является преимущественным механизмом пластического течения металлов с плотноупакованной (ГЦК и ГПУ с ромбическим или тетрагональным искажением) B19 и B19' структурой.

При комнатной температуре (ниже температуры  $M_d$ ) механизм разрушений происходит в интервале максимальной пластической составляющей и представлен на рисунке 8.



*Рисунок 8 – Микрофотография механизма разрушения металла*

На рисунках 9а и 9б представлены фраттографии изломов, созданные при температурах ниже температуры  $M_k$ , что соответствует мартенситной структуре (B19 и B19').



а

б

*Рисунок 9 - Фраттографии изломов, созданные при температурах ниже температуры  $M_k$   
а – при температуре деформации  $-30 \div -50^{\circ}\text{C}$ ;  
б – при температуре деформации  $-80 \div -100^{\circ}\text{C}$*

На основании результатов проведенных исследований по разрушению образцов, следует отметить, что механическую обработку данных материалов необходимо производить при условии создания перед очагом деформации условий перехода аустенитной фазы (В2) в мартенсит напряжений (В19), недопуская переход в аустенитную фазу за счет нагрева. [5]

В связи с тем, что процесс деформирования осуществляется двойникованием, способствующим к выходу глубинных поверхностно-активных слоев материала в сочетании с перестройкой кристаллической решетки, в зоне контакта обрабатываемого инструмента с материалом происходят диффузионные процессы схватывания.

Для предотвращения условий интенсивных процессов схватывания, обработка должна производиться остролезвийным инструментом в узком интервале скоростей резания  $V = 20 \div 40$  м/мин, при этом подача  $S$  не должна превышать  $0,04 \div 0,1$  мм/об. Изменение режимов обработки в одну или в другую сторону, приводит к интенсивному износу инструмента.

Никелид титана в своем составе кроме Ti и Ni может содержать такие легирующие элементы как Fe, Co, Cu, O<sub>2</sub> и др. В сплавах при атомном содержании Ni больше или меньше 50%, фазовые превращения происходят по различным схемам и температурным интервалам, а механические свойства отличаются по своим характеристикам. Оптимальные режимы обработки для конкретного материала являются еще более жесткими, т.к. зависят не только от соотношения компонентов, но и состояния термомеханической обработки материала.

С целью повышения режимов резания, необходимо распространение горячей зоны перед очагом деформации, которая ограничена низкой теплопроводностью материала и явлениями фазовых превращений.

Действенным методом по существенному снижению влияния указанных процессов является перевод материала обрабатываемой заготовки в фазовое состояние, превышающее температуру  $M_d$ . Для этого производится предварительный подогрев заготовки до температуры  $250$  °С, а обработку следует осуществлять твердосплавными инструментами группы ВК (ВК8 и ВК150М), обладающими высокой теплопроводностью. [6]

При этом температура в очаге деформации с подогревом, замеренная методом естественной термопары, показала снижение температуры до  $650 \div 730$  °С. Температура в очаге деформации без подогрева составляет  $950 \div 1000$  °С.

Режимы резания могут варьироваться в широких пределах и ограничены теплостойкостью инструмента.

В процессе обработки на величину изнашивания инструмента влияют высокие температуры и контактные давления, а также абразивные, адгезионные и термические факторы, происходящие в материале инструмента. За критерий износа принимается износ инструмента по главной задней поверхности ( $h$ ), которая не превышает  $0,8$  мм для резцов с пластинами из твердого сплава. [3,7] Используя зависимость стойкости резца от элементов режима резания для труднообрабатываемых материалов скорость резания может быть представлена в следующем виде:

$$V = C/T^m \cdot S^y \cdot t^x,$$

где  $T$  - стойкость инструмента,

$V$  - скорость резания;

$m=1/m_1$  – показатель степени влияния стойкости на скорость;

$Y= m_2/m_1$  - показатель степени влияния подачи на скорость;

$X= m_3/m_1$  - показатель степени влияния глубины на скорость.

Экспериментально было установлено, что стойкость лезвийных инструментов при одних и тех же режимах обработки существенно зависит от жесткости станка. При обработке на станке 1К62, где применяются резцы с большим сечением державки, их стойкость в  $1,5$  раза выше.

Значения коэффициентов  $C, m, x, y$  представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов C, m, x, y

Материал	Режимы резания t(мм)			Коэффициенты				Износ инструмента (h3)
	V(м\мин)	S(мм\об)	t(мм)	C	m	y	x	
ТН1-К	20-40	0,04-0,2	0,5-3	41	0,46	0,43	0,26	0,4

На стойкость режущего инструмента большое влияние оказывают скорость резания, величина подачи, геометрия и материал инструмента, а также условия, при которых осуществляется обработка. Основное влияние на процесс резания и температуру в очаге деформации оказывает передний угол ( $\gamma^\circ$ ), т.к. с увеличением угла инструмент легче врезается в материал, снижаются силы резания и уменьшается деформация в срезаемом слое. При обработке сплавов на основе TiNi, режущие инструменты с передними углами от  $+6^\circ$  до  $+20^\circ$  работают в наиболее неблагоприятных условиях. В таких условиях силы резания возрастают более чем на 65%, а температуры в зоне резания увеличиваются на 30%.

При лезвийной обработке необходимо применение режущего инструмента с максимально возможными размерами державок, с хорошей теплопроводностью и жесткостью.

Оптимальные геометрические параметры инструментов, обеспечивающие их достаточную стойкость, представлены в таблице 2.

Низкая обрабатываемость сплавов на основе TiNi требует высококачественного изготовления режущего инструмента. Особое внимание должно быть обращено на заточку режущей части. Заточку твердосплавных пластин рекомендуется осуществлять электроабразивной обработкой алмазным инструментом. Передняя и задняя поверхности резцов должны быть тщательно изготовлены с шероховатостью  $Ra = 0,16 \div 0,32$  мкм по ГОСТ 2785-93. [6,8,9,10]

Таблица 2 - Оптимальные геометрические параметры инструментов, обеспечивающие их достаточную стойкость

Обрабатываемый материал	Геометрические параметры режущей части резцов.						
	Передний угол ( $\gamma^\circ$ )	Задний угол ( $\alpha^\circ$ )	Главный угол в плане ( $\phi^\circ$ )	Вспомогательный угол в плане ( $\phi^\circ$ )	Угол наклона режущей кромки ( $\lambda^\circ$ )	Угол фаски ( $\gamma^\circ$ )	Радиус при Вершине (R мм)
ТН1-К	0-6	8-12	45	15	0	5	0,5

Режимы резания являются определяющими факторами при обработке материала. При черновом точении сплавов ТН1-К удовлетворительные результаты достигаются при следующих режимах:

- скорость резания  $V = 20 \div 25$  м\мин,
- подача  $S = 0,05 \div 0,15$  мм\об,
- глубина резания  $t = > 2$  мм.

Для полустогового и чистового точения режимы резания не должны превышать следующие значения:

- скорость резания  $V = 30 \div 40$  м\мин,
- подача  $S = 0,05 \div 0,07$  мм\об,
- глубина резания  $t = 0,5 \div 1,5$  мм.

В зависимости от диаметра при растачивании отверстий поправочный коэффициент обрабатываемости KV должен находиться в пределах от 0,5 до 0,7.

**Сверление.** Наиболее трудоемкой операцией, при механической обработке, является сверление глухих отверстий. Сверление подчиняется тем же закономерностям, что и точение, сопровождается аналогичными фазовыми и упругопластическими явлениями, происходящими в материале. Процесс протекает в стесненных условиях, что не только затрудняет отвод стружки, но и аккумулирует тепло в очаге деформации, образуя ее в процессе резания.

При сверлении происходит значительное трение стружки о поверхности канавок сверла и самого сверла об обработанную поверхность. Явление сверхупругости, которое может уменьшать диаметр отверстия в просверленной зоне от 0,5 до 1,5%, способствует к зажиму сверла по поверхностям направляющих ленточек и как следствие к его разрушению. Для сверл с напаянными пластинами из твердого сплава, державку из стали Р9 или Р18 необходимо выполнять с занижением диаметра на  $0,3 \div 0,4$  мм по отношению к пластинам.

Вдоль режущей кромки сверла возникает резкий перепад скоростей (от  $V_{max}$  до 0 м/мин), так что в отдельных точках лезвия сверла срезаемый слой деформируется и срезается с переменной скоростью. В связи с переменной скоростью, углы резания изменяются в широких пределах. Передний угол  $\gamma^\circ$  изменяется от  $18 \div 30^\circ$  у периферии сверла и до  $0^\circ$  - у перемычки. Задний угол  $\alpha^\circ$  на лезвии сверла также имеет переменное значение и составляет от  $6 \div 8^\circ$  у периферии и возрастает по сечению лезвия до  $25 \div 30^\circ$ . Зоны лезвия сверла, имеющие углы в пределах  $6 \div 20^\circ$ , находятся в наиболее неблагоприятных для резания условиях. Все эти факторы приводят к тяжелым, по сравнению с точением, процессам деформирования срезаемого слоя, интенсивному тепловыделению, затруднению процесса выведения стружки и значительному перегреву тела сверла. Режимы резания и производительность обработки при сверлении значительно ниже, чем при точении.

Рекомендуемые геометрические параметры сверл и режимы обработки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Рекомендуемые геометрические параметры сверл и режимы обработки

Обрабатываемый материал	Диаметр сверла (мм)	Геометрические параметры			Режимы обработки	
		$2\varphi^\circ$	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$V$ м\мин	$S$ мм\об
ТН1-К	5 -15	125-130	0	12-14	4 -9	0,03-0,08

Отклонение скорости сверления от номинальной величины на  $1 \div 1,5$  м\мин, а превышение подачи на  $0,01$  мм\об. снижают стойкость инструмента примерно на 50%.

При сверлении отверстий глубиной  $L$ , где  $L > 2d$  ( $d$  – диаметр отверстия), необходимо периодически выводить сверло через каждые  $3 \div 5$  мм просверленной глубины для удаления стружки.

Обработка данных материалов, для повышения стойкости инструмента, необходимо производить только остролезвийными сверлами заточенными с двойным углом в плане. Передняя и задняя поверхности сверл должны быть заточены в приспособлении алмазными кругами. Шероховатость поверхности должна соответствовать  $Ra = 0,32 \div 0,63$  мкм.

Обработка затупленным или не доведенным до необходимых параметров режущих поверхностей сверлом, приводит к лавинообразному износу.

Значительное повышение эксплуатационных характеристик спиральных сверл, оснащенных твердосплавными пластинами, достигается скруглением режущей кромки. Сущность заточки состоит в том, что главные режущие кромки скруглены на уголках и на всей длине (от перемычки до вспомогательных направляющих лезвий) имеют постоянные задние углы величиной до  $15^\circ$ , образуемые ленточкой, что существенно (почти в 2 раза) повышает стойкость инструмента.

Экспериментально установлено, что нагрев заготовок до температур выше  $Md$  (с целью исключения фазовых превращений в процессе обработки) позволяет существенно снизить силовые параметры резания и осуществлять сверление заготовок за один прием при соотношении  $L/d > 8$ . При этом чистота обработанной поверхности соответствует шероховатости  $Ra = 1,25$  мкм.

Применение вибросверления специальными сверлами с внутренним подводом смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) позволяет существенно повысить производительность обработки при сверлении. Сущность сверления с вибрациями на станках типа ВС-5 состоит в том, что кроме обычных движений вращения и подачи, сверлу сообщаются дополнительные осевые гармонические колебания низкой частоты. При сверлении с вибрациями стружка дробится на отдельные элементы. Интенсивная и равномерная подача СОЖ в зону резания через внутренние каналы сверла под давлением  $6 \div 6,5$  МПа не только снижает температуру в зоне обработки, но и способствует транспортировке отдельных элементов стружки из зоны резания, окисление этих элементов и снижение коэффициента трения инструмента с материалом заготовки. Теплоотвод осуществляется за счет удаления элементов стружки и возгонки СОЖ. Применение вибросверления позволяет обеспечить протекание процесса с формированием характерной мелкоугольчатой стружки. Точность размеров отверстий соответствует 5-7 классу, шероховатость поверхности соответствует  $Ra = 1,25$  мкм.

Геометрические параметры режущей части специального вибросверла, оснащенного твердым сплавом марки ВК8 (рис. 10) должны находиться в следующих пределах:

- угол при вершине  $2\phi = 140^\circ$ ,
- задний угол  $\alpha = 17 \div 18^\circ$ ,
- обратный конус по пластине твердого сплава на длине 10мм должен быть не менее 0,4мм,
- диаметр державки относительно режущей части должен быть занижен не менее 0,2мм.

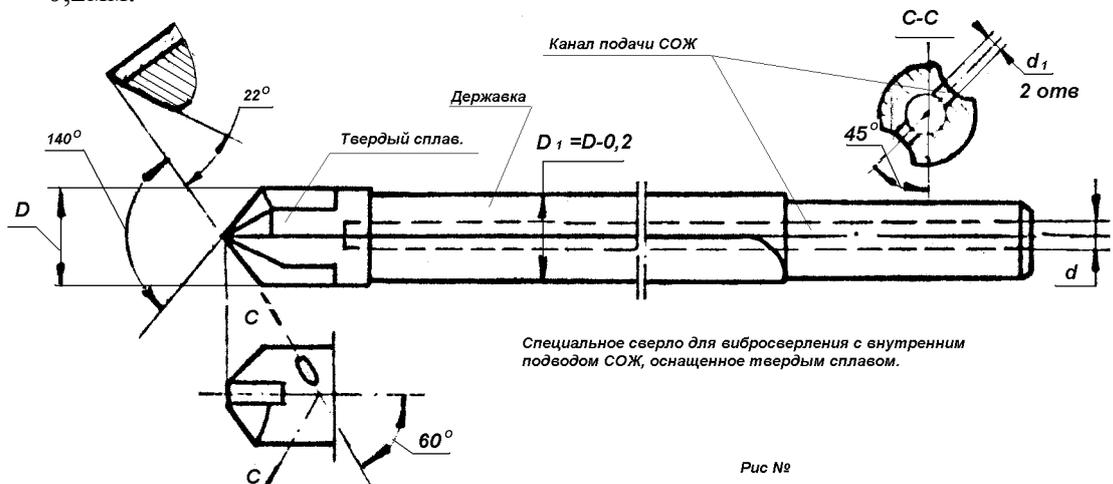


Рисунок 10 – Специальное сверло для вибросверления с внутренним подводом СОЖ

Процесс вибросверления, обеспечивающий достаточную стойкость режущего инструмента, осуществляется при следующих режимах:

- скорость резания  $V = 15 \div 25$  м/мин,
- подача  $S = 0,025$  мм/об,
- амплитуда колебаний  $A = 0,007 - 0,08$  мм,
- частота колебаний  $f = 55$  Гц.

В качестве СОЖ наилучшие результаты достигаются при применении масла МР-1, которое подается в зону резания под давлением  $6 \div 6,5$  МПа.

**Фрезерование.** Процесс фрезерования имеет много общего с токарной обработкой как по геометрическим параметрам режущей части, так и режимам резания. Однако фрезерование имеет следующие отличия:

- толщина слоя, срезаемого каждым зубом фрезы, переменна и изменяется от некоторого минимума до максимума;
- на длине дуги резания одновременно находятся несколько лезвий;
- режущее лезвие работает с перерывами;
- корпус фрезы обладает значительной массой, находится в нестисненных условиях, что способствует хорошему теплоотводу от режущих лезвий.

Скорость резания при фрезеровании TiNi подчиняется тем же закономерностям, что и при токарной обработке. При торцевом фрезеровании, оптимальная величина подачи находится в пределах  $0,11 \div 0,13$  мм/зуб. Для материала, не проявляющего эффекта мартенситной неупругости в процессе обработки, скорость резания составляет  $60 \div 70$  м/мин, а при проявлении эффекта мартенситной неупругости не превышает  $35 \div 40$  м/мин. Отклонение режимов резания в большую или меньшую сторону на 10% приводит к сокращению стойкости инструмента почти в 2 раза.

Подогрев заготовок до температур выше  $M_d$  способствует к снижению силовых параметров резания на 40% и, как следствие, к повышению стойкости инструмента.

**Абразивная обработка.** Шлифование металлов особенно важно для полуфабрикатов из труднообрабатываемых материалов, получаемых высокотемпературным деформированием (прессованием, горячей прокаткой) с применением поверхностных покрытий типа стеклообмазок. Титан очень активный химический элемент, его активность многократно возрастает при высоких температурах. На поверхности горячекатаных или прессованных полуфабрикатов, в процессе их переработки без покрытий, формируется окисленная зона, глубиной от 0,05 до 0,3 мм. Поверхность в основном состоит из рутила  $TiO_2$  с примесью  $Ti_3O_2$  - типа корунда, которая имеет высокую твердость и действует на режущий материал как абразив. Для сплавов на основе TiNi лезвийная обработка горячекатаных или прессованных полуфабрикатов вызывает большие трудности. Обработка дефектных поверхностей таких полуфабрикатов шлифованием является эффективным методом, обеспечивающим высокую производительность и позволяет существенно сократить расход лезвийных режущих материалов.

Глубинное шлифование (рис.11) за один - два прохода позволяет снять припуск вместе с дефектным слоем на всю необходимую глубину. Для обработки применяются шлифовальные круги из карбида кремния зеленого (КЗ) или черного (КЧ) следующих характеристик: 63С25ПМ112К и 54С25ПМ112К. На шлифовальном круге имеется конический участок длиной  $8 \div 12$  мм. В ходе шлифования конический участок удаляет основную часть срезаемого слоя, а цилиндрический участок зачищает обработанную поверхность.

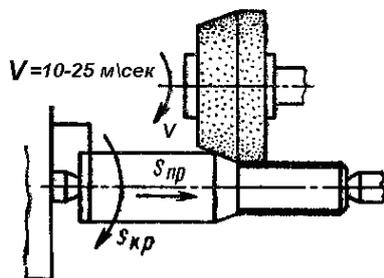


Рисунок 11 – Глубинное шлифование

Коэффициент шлифовки (отношение объема удаленного металла к объему изнашивания материала шлифовального круга) для сплавов TiNi не проявляющих эффект магнитной неупругости при скорости резания  $10 \div 25$  м/с, при скорости подачи 0,05 мм/об меняется незначительно, а для сплавов, проявляющих эффект магнитной неупругости коэффициент шлифовки в 2 раза ниже. Подогрев таких заготовок, до температур выше  $M_d$ , восстанавливает коэффициент шлифовки.

Таким образом, рассмотрены конструкции некоторых инструментов и материалы, установлены режимы механических операций: сверления, фрезерования, шлифования, и приведены данные по качеству механической обработки труднообрабатываемого материала - никелида титана.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бернштейн, М.Л. Структура деформированных металлов / М.Л. Бернштейн. – М.: «Металлургия». – 1977. – с.25.
2. Хачин, В.Н. Мартенситная неупругость сплавов / В.Н. Хачин //Известия вузов. Физика №5. – Томск 198. – С. 88-103.
3. Дальский, А.М. Механическая обработка материалов / А.М. Дальский, В.С. Гаврилюк, Л.Н. Бухаркин. – М. Машиностроение. – 1981. – 263с.
4. Ковнеристый, Ю.К. Влияние деформации на модуль упругости, ЭЗФ, ОЭЗФ и интервалы фазовых превращений TiNi / Ю.К. Ковнеристый, С.Г. Федотов, Л.А. Матлахова / Всесоюзная научная конференция «Сверхупругость, эффект памяти формы и их применение в новой технике» - Томск: ТГУ, 1985. – С.138-139.
5. Лотков, А.И. Никелид титана, кристаллическая структура и фазовые превращения / А.И. Лотков, В.Н. Гришков // Известия вузов. Физика №5. Томск. – 1985. – С. 68-87.
6. Шифрин А.Ш.и др. Обработка резанием коррозионноустойчивых, жаропрочных, титановых сталей и сплавов. Машиностроение. М., 1964.
7. Федотов, С.Г. Особые свойства сплавов, претерпевающих фазовые превращения мартенситного типа / С.Г. Федотов // Всесоюзная научная конференция «Сверхупругость, эффект памяти формы и их применение в новой технике» – Томск: ТГУ, 1985. – С.29-30.
8. Гуревич, Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов / Я.Л. Гуревич и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 236 с.
9. Вульф, А.М. Резание металлов / А.М. Вульф. – Л.: Машиностроение, 1973. – 303 с.
10. Хасьянов, У. Исследование технологических возможностей никелида титана / У. Хасьянов. – НТО 2070-19-76, НИИСУ М. 1976.
11. Гамынин, Б.Н. Исследование режимов резания сплавов типа НИТИНОЛ / Б.Н. Гамынин, Б.К. Круглов. – НТО 2745-11-78. - М., НИИСУ, 1978.
12. Подураев, В.Н. Обработка резанием с вибрациями / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1970.
13. Технологические рекомендации ТР-310 Вибросверление глубоких отверстий в труднообрабатываемых материалах. НИАТ, 1977.
14. Зорев, Н.Н. Исследование процессов резания в США / Н.Н. Зорев. – НИИМАШ, М. 1976.

**Киричек Андрей Викторович**

Госунiversитет - УНПК, г. Орел  
Директор ТИ Госунiversитета - УНПК, доктор технических наук, профессор  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
тел. 55-55-24

**Хасьянов Усман**

ИМАШ РАН, г. Москва  
Старший научный сотрудник ИМАШ РАН, кандидат технических наук  
тел. 55-55-24

**Албагачиев Али Юсупович**

ИМАШ РАН, г. Москва  
Заведующий лабораторией, главный научный сотрудник ИМАШ РАН, доктор технических наук  
тел. 55-55-24

**Хасьянова Динара Усмановна**

ИМАШ РАН, г. Москва  
Научный сотрудник ИМАШ РАН  
тел. 55-55-24

---

A.V. KIRICHEK, U. KHASYANOV, A.U. ALBAGACHIEV, D.U. KHASYANOVA

## **MECHANICAL PROCESSING OF ALLOYS BASED ON TI-NI**

*The article is an analysis of the existent processes in deformation zone of materials with SME during cutting. The conditions are conducive increase of processing modes of alloys based on Ti-Ni.*

**Keywords:** *shape memory effect, the cutting, workability of the metal, the boring, the milling.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Bernshtejn, M.L. Struktura deformirovannyh metallov / M.L. Bernshtejn. – M.: «Metallurgija». – 1977. – s.25.
2. Hachin, V.N. Martensitnaja neuprugost' splavov / V.N. Hachin //Izvestija vuzov. Fizika №5. – Tomsk 198. – C. 88-103.
3. Dal'skij, A.M. Mehanicheskaja obrabotka materialov / A.M. Dal'skij, V.S. Gavriljuk, L.N. Buhar-kin. – M. Mashinostroenie. – 1981. – 263s.
4. Kovneristyj, Ju.K. Vlijanie deformacii na modul' uprugosti, JeZF, OJeZF i intervaly fazovyh prevrashhenij TiNi / Ju.K. Kovneristyj, S.G. Fedotov, L.A. Matlahova / Vsesojuznaja nauchnaja konferencija «Sverhuprugost', jeffekt pamjati formy i ih primenenie v novej tehnike» - Tomsk: TGU, 1985. – S.138-139.
5. Lotkov, A.I. Nikelid titana, kristallicheskaja struktura i fazovye prevrashhenija / A.I. Lotkov, V.N. Grishkov // Izvestija vuzov. Fizika №5. Tomsk. – 1985. – S. 68-87.
6. Shifrin A.Sh.i dr. Obrabotka rezaniem korrozionnyostojkih, zharoprochnyh, titanovyh stalej i splavov. Mashinostoenie. M., 1964.
7. Fedotov, S.G. Osobyje svojstva splavov, preterpevajushhih fazovye prevrashhenija martensitnogo tipa / S.G. Fedotov // Vsesojuznaja nauchnaja konferencija «Sverhuprugost', jeffekt pamjati formy i ih primenenie v novej tehnike» – Tomsk: TGU, 1985. – S.29-30.
8. Gurevich, Ja.L. Rezhimy rezanija trudnoobrabatyvaemyh materialov / Ja.L. Gurevich i dr. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 236 s.
9. Vul'f, A.M. Rezanie metallov / A.M. Vul'f. – L.: Mashinostroenie, 1973. – 303 s.
10. Has'janov, U. Issledovanie tehnologicheskikh vozmozhnostej nikelida titana / U. Has'janov. – NTO 2070-19-76, NIISU M. 1976.
11. Gamynin, B.N. Issledovanie rezhimov rezanija splavov tipa NITINOL / B.N. Gamynin, B.K. Krug-lov. – NTO 2745-11-78. - M., NIISU, 1978.
12. Poduraev, V.N. Obrabotka rezaniem s vibracijami / V.N. Poduraev. – M.: Mashinostroenie, 1970.
13. Tehnologicheskie rekomendacii TR-310 Vibrosverlenie glubokih otverstij v trudnoobrabatyva-emyh materialah. NIAT, 1977.
14. Zorev, N.N. Issledovanie processov rezanija v SShA / N.N. Zorev. – NIIMASH, M. 1976.

### **Kirichek Andrey Viktorovich**

State University - bpic, str. Eagle

Director of TI state University - bpic, doctor of technical Sciences, Professor

Mr.. Orel, Naugorskoe shosse, 29

tel. 55-55-24

### **Khasyanov Usman**

Meri of RAS, Moscow. Moscow

The senior scientific employee of Meri of RAS, candidate of technical Sciences

tel. 55-55-24

### **Albagachiev Ali Yusupovich**

Meri of RAS, Moscow. Moscow

Head of laboratory, chief scientific officer of Meri of RAS, doctor of technical Sciences

tel. 55-55-24

### **Khasyanova Dinara Usmanovna**

Meri of RAS, Moscow. Moscow

Researcher of the Meri of RAS

tel. 55-55-24

А.А. КОШИН, А.А. ДЬЯКОНОВ

## АНАЛИЗ МЕХАНИКИ МИКРОРЕЗАНИЯ И ДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРОВ

*Приведены результаты исследования механики микрорезания и дисперсной структуры металлополимеров. Установлены основные отличия в физике резания металлополимеров от традиционных сталей и сплавов – при увеличении дисперсности металлополимеров практически отсутствует пластическое резание; при попадании зерна в твердое включение металлополимера возможно налипание на зерно частиц включения, в результате чего будет резать включение.*

*На основе микроскопического исследования дисперсной структуры металлополимеров приведены Результаты расчета метрических характеристик включений.*

**Ключевые слова:** металлополимер, структура, механика резания, качественные характеристики

В современном машиностроении все большее применение находят полимерно-композитные материалы, в частности, металлополимеры. Основное применение металлополимеров пока – ремонт поверхностей деталей машин и конструкций. Металлополимеры выступают в качестве ремонтного покрытия изношенной поверхности. Ремонтируемые детали могут быть различными: валы, посадочные шейки вала под подшипники, посадочные места под подшипники в корпусах, крышки, корпуса редукторов и т. д. [1]. Анализ ремонтных металлополимерных технологий, проведенный по специализированным ремонтным организациям Уральского региона и Москвы, показал, что в 75% случаев в качестве финишной обработки металлополимерного покрытия применяется шлифование [2].

Вопросы шлифования покрытий из металлополимеров пока изучены мало. Рекомендации по режимам обработки этих покрытий вообще отсутствуют. Для разработки таких рекомендаций необходимо выявить основные закономерности процессов шлифования металлополимеров – влияние характеристики круга и режимных параметров на показатели микропрофиля обработанной поверхности, формирование точности обработки, обеспечение бездефектности обработки и т. д. Основу всех указанных процессов составляет механика снятия припуска, т. е. резания металлополимера.

Металлополимеры относятся к классу дисперсных материалов – в полимерной матрице случайным образом (с равномерным распределением) размещены частицы наполнителя из металла или его карбидов. Поэтому можно предполагать, что механика стружкообразования при резании этих материалов будет отличаться от случая обработки металлов.

Поскольку исследований стружкообразования при резании металлополимеров в литературе обнаружить не удалось, на начальном этапе поставлена задача качественного анализа механики резания этих новых материалов.

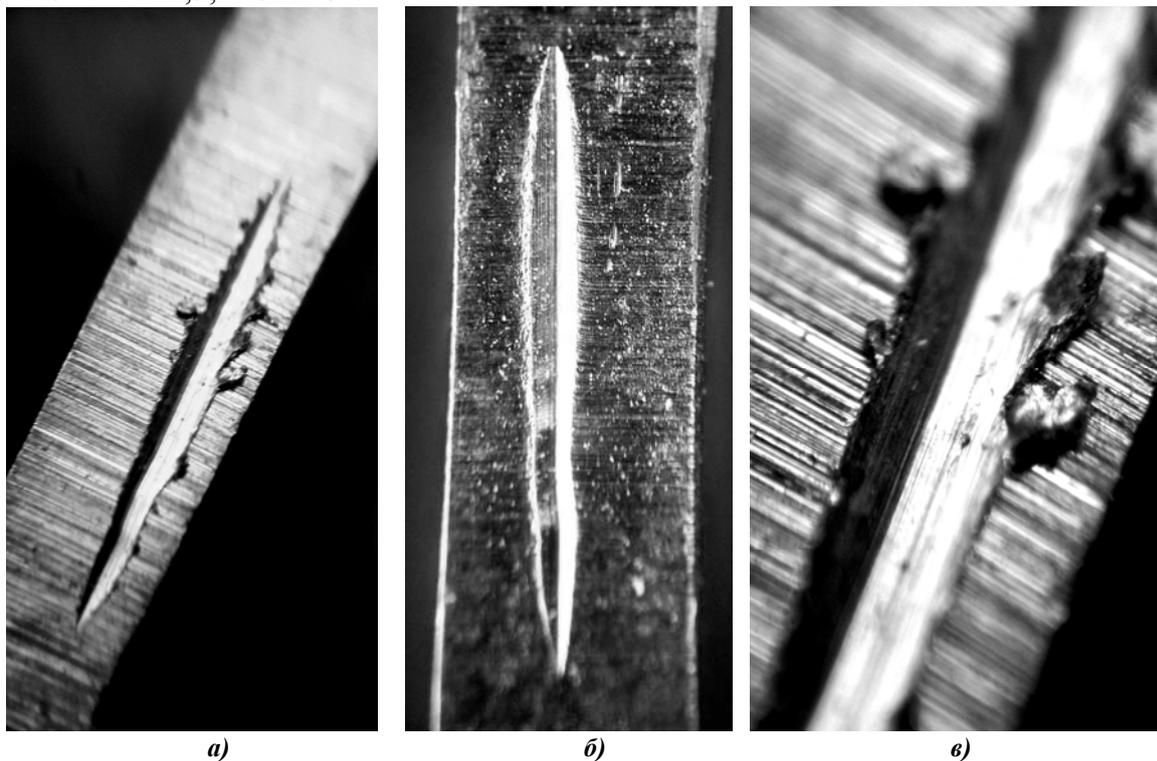
Современная трактовка процессов шлифования с позиций теории резания – это множественное стохастическое микрорезание абразивными зёрнами [3]. Поэтому для исследования особенностей механики резания металлополимеров применительно к условиям шлифования проведен эксперимент по микрорезанию металлополимеров единичным абразивным зерном при скорости резания 35 м/с.

Качественную оценку особенностей механики микрорезания металлополимеров проводили путем сравнения рисок микрорезания металлов и покрытий из ремонтных металлополимеров. Для испытаний были выбраны марки металлополимеров – «Лео-Сталь» и «Chester Super Metal BR», и эталонный металл – сталь 45 (HRC 42...45).

Эксперименты проводились на специальном стенде микрорезания. В качестве режущего материала применялись зерна формокорунда. Установлены следующие режимы реза-

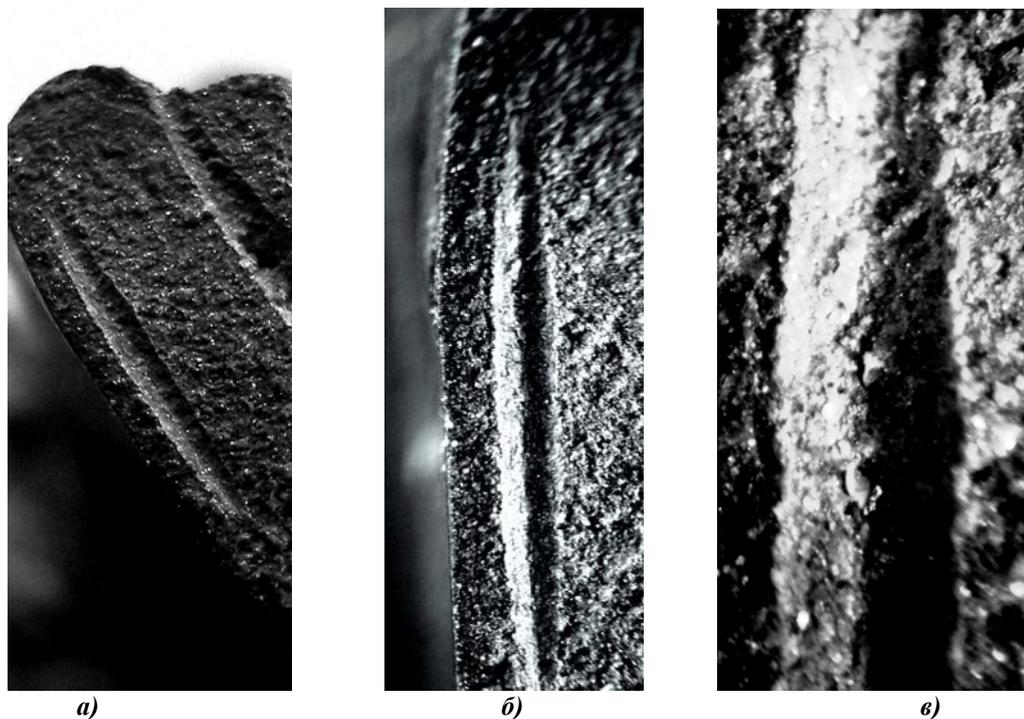
ния: скорость шлифовального круга  $V_k=35$  м/с, температура образца  $T=20^\circ$ , глубина резания  $t=5$  мкм.

На рисунке 1 приведены фотографии эталонных рисок (микрорезов) – на стали 45 при увеличениях  $\times 12,5$ ;  $\times 25$  и  $\times 82$ .

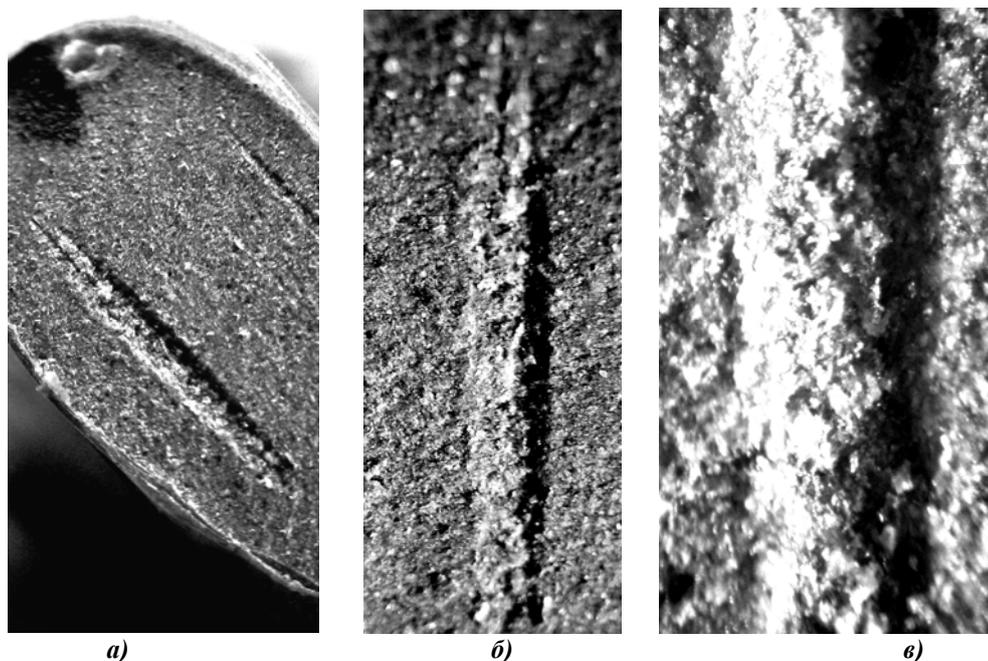


**Рисунок 1 – Фотографии рисок на стали 45**  
а) при увеличении  $\times 12,5$ ; б) при увеличении  $\times 25$ ; в) при увеличении  $\times 82$

На рисунках 2 и 3 приведены фотоснимки рисок на металлополимерах «Лео-Сталь» и «Chester-molecular Super Metal BR» при тех же увеличениях  $\times 12,5$ ;  $\times 25$  и  $\times 82$ .



**Рисунок 2 – Фотографии рисок на металлополимере «CHESTER Super Metal BR»:**  
а) при увеличении  $\times 12,5$ ; б) при увеличении  $\times 25$ ; в) при увеличении  $\times 82$



**Рисунок 3 – Фотографии рисок на металлополимере «Лео-Сталь»:**  
 а) при увеличении  $\times 12,5$ ; б) при увеличении  $\times 25$ ; в) при увеличении  $\times 82$

Процесс резания металлов по существу является процессом пластической деформации срезаемого слоя. Можно наблюдать характерные особенности резания металла: пластические деформации металла по краям риски – навалы; четкая форма риски (см. рис. 1).

Размеры частиц металлического наполнителя у металлополимера «Chester Super Metal BR» составляют порядка 5 мкм. Относительно размеров зоны деформации этот материал можно считать малодисперсным. Как видно, при малой дисперсности у металлополимеров также можно наблюдать небольшие навалы полимера по краям риски (см. рис. 2).

При увеличении дисперсности металлополимеров практически отсутствует пластическое резание (см. рис. 3). Металлополимер «Лео-Сталь» имеет размеры металлических включений порядка 200 мкм, т. е. его дисперсность существенна относительно размеров зоны резания. При попадании зерна в твердое включение металлополимера возможно налипание на зерно частиц включения, в результате чего будет резать включение.

Изучение структуры поверхности композитов проведено на электронном микроскопе IM7200 MEIJI TECHNO. Дальнейшая обработка цифровых снимков проведена в программе Thixomet PRO, которая является анализатором изображения и предназначена для решения задач количественной металлографии сталей и сплавов, а так же других материалов.

Одной из неразрешимых задач в рамках традиционной количественной металлографии задач является проблема пограничных объектов, которые расположены на краю поля зрения. Поскольку часть площади таких объектов расположена вне видимого в окуляры или захваченного камерой поля зрения, то оценить метрические характеристики таких объектов невозможно. Исключение из анализа пограничных объектов приводит к значительным проблемам воспроизводимости результатов измерений от поля к полю. Другой такого же рода проблемой является невозможность в рамках традиционной металлографии наблюдать в микроскоп обширную площадь поля зрения, но с высоким разрешением. В Thixomet PRO обе эти задачи разрешены созданием алгоритма склеивания смежных полей зрения. С помощью этого алгоритма формируется панорама размером в несколько десятков или сотен полей зрения и разрешением в несколько десятков мегапикселей, при этом удельная площадь пограничных объектов сокращается в сотни раз.

Для расчета метрических характеристик частиц наполнителя использован программный модуль «Титановые сплавы». Модуль разработан для оценки двухфазных титановых сплавов, но позволяет анализировать и другие двухфазные сплавы. На рисунке 4 представлено окно программы Thixomet PRO.

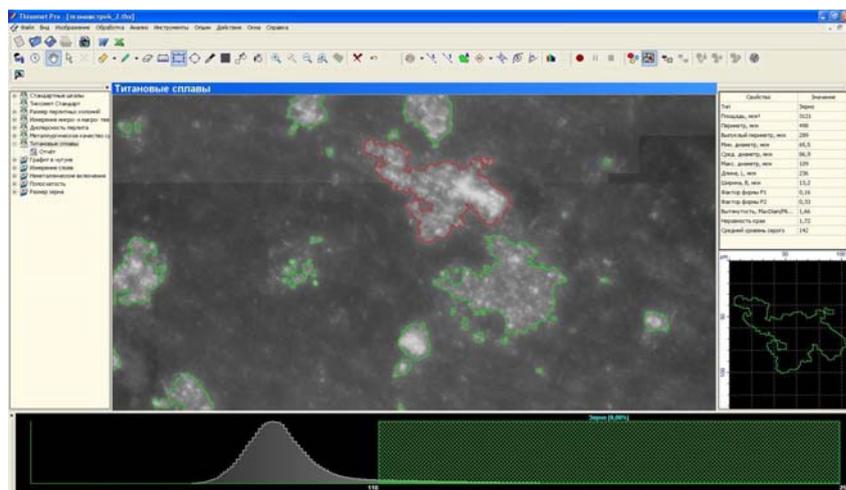


Рисунок 4 – Окно программы Thixomet PRO для оценки двухфазных сплавов

Для распознавания различных объектов структуры, отличающихся по яркости или цвету, используются диапазоны дискриминации. Работа с диапазоном организована в окне цветовых гистограмм.

Наиболее простой и эффективный способ поиска диапазона дискриминации, характерного для данного типа объектов структуры (неметаллический включений, оксидов, второй фазы и т. д.), реализован в автоматическом режиме. Программа Thixomet PRO находит границы указанного объекта, а так же всех других, цвет которых попадает в найденный диапазон. При неточном результате идентификации можно откорректировать его, меняя положение порога дискриминации.

В таблице 1 сведены цифровые изображения поверхностей исследованных металлополимеров, полученные на электронном микроскопе.

Результаты расчета метрических характеристик включений приведены в таблице 2. Для наглядности на рисунке 5 изображена диаграмма номеров зерен в пределах эффективно-го интервала с указанием значения моды. Чтобы исключить наиболее мелкие зерна, которые несущественно влияют на механическую обработку, установлен порог значимости 85%.

Таблица 1 – Цифровые снимки поверхности металлополимеров

Материал	Цифровое изображение	Материал	Цифровое изображение
Belzona 1321		Devcon Керамик L	
Diamant Кермаик FL		Leo-Кермаика	

Таблица 2 – Результаты расчета метрических характеристик включений

Показатели	Belzona 1321	Devcon Керамик L	Diamant Керамик FL	Leo-Керамик
Количество зерен	282	1149	24	2064
Количество зерен на 1 мм <sup>2</sup>	31869	4800	152012	8902
Средняя площадь зерна, мкм <sup>2</sup>	31	208	7	112
Минимальная площадь зерна, мкм <sup>2</sup>	2,01	1,05	2,02	2,11
Максимальная площадь зерна, мкм <sup>2</sup>	1790,38	9416,36	26,50	9060
Средний диаметр зерна, мкм	5,60	14,43	2,56	10,60
Номер зерна, G	12	9	14	10
Мода номера зерна G	9	7	12	6
Номер зерна G и его частота в пределах эффективного 85% интервала	6(20,2%) 7(10,3%) 8(4,6%) 9(23,2%) 10(6,7%) 11(10,4%) 12(10,5%) 13(5,0%) 14(4,3%) 15(3,6%)	4(15,4%) 5(18,4%) 6(19,2%) 7(19,9%) 8(12%) 9(7,3%) 10(3,6%)	12(33,4%) 13(11,1%) 14(27,6%) 15(19,8%) 16(8,2%)	3(11,4%) 5(14,1%) 6(21,5%) 7(19,1%) 8(13,8%) 9(8,7%) 10(4%)
Коэффициент заполнения объема материала частицами наполнителя, %	4,6	12,4	0,4	8,3

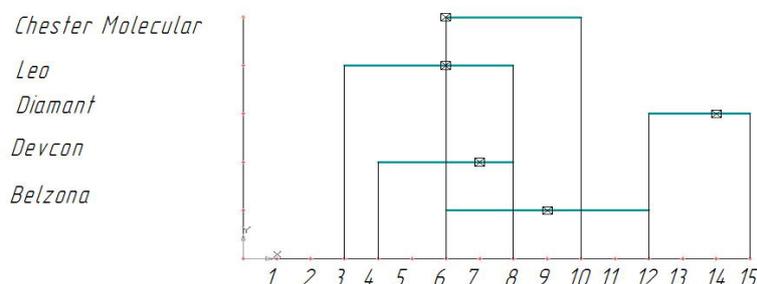


Рисунок 5 – Диаграмма распределения номеров зерен в пределах эффективного интервала с указанием моды

Математическое ожидание размера зерен приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Средние размеры частиц наполнителя в металлополимерах

№	Марка металлополимера	Средний размер частиц наполнителя
1	Belzona 1321	9
2	Devcon Керамик L	6
3	Diamant Керамик FL	13,5
4	Leo-Керамик	5,5

Таким образом, из анализа механики мирорезания и дисперсной структуры металлополимеров можно сделать вывод, что механизм микрорезания металлополимеров имеет иной характер, чем у металлов. Чем сильнее выражена дисперсность металлополимера, тем значимее различия в механизме микрорезания металлополимера и металла. Следовательно, классическая теория резания для металлополимеров не применима, требуется разработка новых моделей, учитывающих дисперсную структуру этих материалов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кошин, А.А. Применение полимерно-композитных материалов для ремонта механического и энергетического оборудования на предприятиях Южного Урала / А.А. Кошин, Г.И. Буторин // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 3–11.
2. Пашнев, В.А. Повышение эффективности шлифования трехслойных металл-композитных систем / В.А. Пашнев // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 21–26.
3. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования / С.Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

**Дьяконов Александр Анатольевич**

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

Докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76

Тел. (351) 248-34-14

E-mail: sigma-80@mail.ru

---

A.A. KOSHIN, A.A. DYAKONOV

**ANALYSIS OF MECHANICS OF MICROCUTTING  
AND DISPERSE STRUCTURE OF METALPOLYMERS**

*Results of research of mechanics of microcutting and disperse structure of metalpolymers are given. The main differences in physics of cutting of metalpolymers from traditional staly are established and alloys – at increase in dispersion of metalpolymers practically there is no plastic cutting; at grain hit in firm inclusion of metalpolymer possibly sticking to grain of particles of inclusion therefore will cut inclusion.*

*On the basis of microscopic research of disperse structure of metalpolymers Results of calculation of metric characteristics of inclusions are given.*

**Keywords:** metalpolymer, structure, mechanics of cutting, qualitative characteristics.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Koshin, A.A. Application of polymeric and composit materials for repair of the mechanical and power equipment at South Urala's enterprises / A.A. Koshin, G.I. Butorin // Progressive technologies in mechanical engineering. – Chelyabinsk: Publishing house SUSU, 2008. – p. 3–11.
2. Pashnev, V.A. Increase of efficiency of grinding three-layer metal-composit systems // Progressive technologies in mechanical engineering. – Chelyabinsk: Publishing house SUSU, 2008. – p. 21–26.
3. Korchak, S.N. The theory of a machinability staly and alloys at abrasive processing / S.N. Korchak// The bulletin SUSU. Mechanical engineering series. –2003. – №4. – P. 82–90.

**Dyakonov Alexandr Anatolyevich**

FESBEO HPE «South Ural State University» (national research university), Chelyabinsk

The doctoral candidate, Cand.Tech.Sci, the senior lecturer of the department «Mechanical engineering»

454080, Chelyabinsk, Lenin prospect, 76,

Phone: (351) 248-34-14

E-mail: sigma-80@mail.ru

## **ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 377: 621

Т.Г. ПРОНЮШКИНА, А.В. МОРОЗОВА

### **КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ КАК ИНТЕГРИРУЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ФОРМИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ КУЛЬТУРЫ ИНЖЕНЕРА**

*Рассмотрен процесс формирования организационной культуры инженера в структуре конкурентоспособности специалиста. Структурирующим началом, одной из универсальных основ организационной инженерной профессиональной культуры, является конкурентоспособность. Развитая система ценностей ориентации, освоение ключевых компетенций рассмотрены автором как основа развития и функционирования конкурентоспособной личности.*

**Ключевые слова:** организационная культура, конкурентоспособность, предпринимательский потенциал, графическая культура, модель подготовки конкурентоспособного специалиста.

Инвариантной функцией интеллектуально-мыслительной деятельности инженера является оперирование схематическими, графическими и знаковыми моделями объектов, которые позволяют в символической, абстрактной форме выражать соответствие графических изображений и их объектов. Современные информационные технологии предъявляют сегодня требования к визуально-мысленным навыкам. Поэтому, уровень подготовки инженера определяется тем, насколько развито и подвижно его пространственное мышление, насколько он готов мысленно преобразовать образно-знаковые модели.

Понимание истоков и смысла техники и технического творчества - это один из путей самоопределения инженера. Так как, техническое мышление выступает следствием научного и особого практического мышления, то в рассмотрении требований к личности инженера необходимо отметить развитие технического мышления. Это синтез логического и образного мышления.

В труде инженера, как правило, выделяют следующие личностные особенности: выносливость к экстремному напряжению и перенапряжению, долговременная выносливость, переключаемость внимания, устойчивость и концентрация внимания, способность быстро воспринимать суть дела, сообразительность, специальные знания по инженерному труду, организационные способности, знания специфики выполняемой деятельности, личная инициатива.

При внедрении новых технологий в области производства, в условия трудовой деятельности инженер должен обладать способностью к принятию решения, готовностью отстаивать свои планы, проекты, разработки, убедительно аргументировать свои мысли. Инженер, как правило, обязан владеть умениями ведения переговоров, умениями качественно выполнять работу, быть коммуникабельным, корректным, общаясь с коллегами, подчиненными и высшим руководством.

Однако, помимо проблем, связанных с профессиональными знаниями и индивидуальными характеристиками личности инженера, есть проблемы другого порядка: с развитием техники все больше требуется затрат энергетических ресурсов специалиста. Должным образом не осуществляется мотивирование инженера на высокий показатель производительности. Отсутствует система защиты прав работника на предприятиях и организациях, что приводит к снижению качества его работы. Известен и тот факт, что идет отток профессионалов из-за увеличения скорости и сложности производственных процессов, требуются новые знания и умения специалистов, а зачастую обучение на предприятиях полностью отсутствует. Поэтому, многие специалисты с инженерным образованием, остаются вне сферы деятельности, и как следствие усложняется подбор кадров на вакантное место инженера.

В этих условиях требуется анализ структурных компонентов, сущности, механизмов и динамики формирования организационной культуры будущего инженера в структуре его конкурентоспособности.

Термин организационная культура был заимствован из социологии. Т. Питерс, Р. Уотермен, Б. Кларк, М. Шульц, Э. Мартин, У. Оучи дают большое разнообразие трактовок организационной культуры. По их мнению, организационная культура – это отражение организационных ценностей и способов деятельности. Свой вклад в трактовку понятия организационной культуры внесли исследования зарубежных ученых С. Мицона, А. Кеннеди, Н. Леметра, Ф. Харриса, Р. Морана, Г. Хофштеде, Э. Шайна, В. Мильнера, М. Мескона, П. Вейла, Т. Дила, П. Штерна. Во многих трудах отечественных ученых дефиниция «организационная культура» стала анализироваться с рассмотрением профессиональной деятельности личности. Часть вопросов организационной культуры исследуются А. Н. Занковским, Т. Ю. Базаровым, В. Б. Межуевым, М. С. Каганом, Л. Н. Коганом, М. В. Удальцовым, Н. С. Злобиным, Б. Ф. Усмановым. Следует отметить, что понятие «организационная культура» сложно по структуре, широко и многоаспектно.

В процессе исследования феномена организационной культуры нами было выявлено: организационная культура - это интегральное качество личности, представляет собой совокупность ценностных ориентаций и ключевых компетенций, которые позволяют личности функционировать в социуме. Структурирующим началом организационной инженерной профессиональной культуры является конкурентоспособность. Развитие конкурентоспособности - это неодномоментный, линейный, изолированный процесс. Это, по нашему мнению, планомерная, преобразующая, системная, внутренне детерминированная деятельность личности. Самоопределение представляется ведущим компонентом становления организационной культуры студента университета. Основой развития и функционирования конкурентоспособной личности, мы считаем, развитую систему ее ценностных ориентаций, освоение ею ключевых компетенций.

В проведенном исследовании нами определены основные функции развития организационной культуры студента: образовательная, целедостижения, развивающая, прогностическая, а также рассмотрено их взаимодействие. Рефлексивная структура личности, направленность личности, устойчивость, перспективы личностного, а также профессионального роста становятся критериями развитости конкурентоспособности будущего инженера.

Результаты диагностики показали наличие двух позиций, которые характеризуют у студентов формирование качества конкурентоспособности: активно-созидательной (положительно-критической) и пассивно-созерцательной (субъектно-неадекватной). Базовым компонентом развития качеств конкурентоспособности у студентов выступает актуализация активно-созидательной позиции. Поэтому, необходимыми условиями, развивающими конкурентоспособность, мы считаем: системность, проблемность, креативность, прогнозирование, рефлексия и самоуправление.

Успешность профессиональной деятельности будущих инженеров во многом зависит от их предпринимательского потенциала. Он определяется субъективными факторами, где центральное место занимают личностные особенности индивида. Предпринимательский потенциал, как правило, имеет тесные связи с организаторским, интеллектуальным, управленческим, творческим, лидерским потенциалами.

Предпринимательский потенциал как системная, структурная организация, состоит из следующих взаимосвязанных между собой подструктур:

1. природно-обусловленных (активность, сила личности, гибкость, экстравертированность, устойчивость);
2. психических свойств (способности, высокий уровень психических функций, креативность, волевой потенциал);
3. личностно-характерологических (уверенность, целеустремленность, склонность к риску и пр.);
4. опыта (профессиональная компетентность, общий интеллектуальный потенциал, самоконтроль, умения и навыки);

5. направленности (стремление к независимости, мотивация достижений, направленность на конкуренцию и пр.).

Особая роль среди характеристик предпринимательского потенциала принадлежит специальным способностям, особым личностно-профессиональным качествам, направленности на предпринимательскую деятельность и конкурентоспособности личности.

В условиях информационного общества четко проявляются изменения в содержании инженерной деятельности. Развитие инженерного образования в нашей стране ведет к усилению общеобразовательного и развивающего компонентов, наметился акцент на формирование креативной графической деятельности. В связи с этим, системообразующей составляющей конкурентоспособности будущих инженеров мы считаем графическую культуру, которая является одной из основ организационной культуры инженеров. Графическая культура требует введения понятийного аппарата, раскрывающего грани и генезис графической культуры. Показателем уровня графической культуры выступает разносторонняя творческая активность личности в процессе ее профессиональной деятельности. Потенциал целенаправленной графической подготовки является истоком формирования графической культуры, который может быть представлен взаимосвязанными общеобразовательным, общекультурным, профессионально-направленным, развивающим, компонентами.

Нами разработана модель подготовки конкурентоспособного специалиста для промышленных предприятий, которая основана на теоретико-методологической платформе исторического опыта и современных психолого-педагогических подходов к инженерной подготовке: деятельностно-личностного, системного, интегративно-целостного. Реализация данной модели заключается в совершенствовании процесса обучения графическим дисциплинам в техническом вузе. Это многоуровневый поэтапный процесс, который обеспечивает рациональное и эффективное профессиональное становление будущего инженера. Системообразующим фактором данного процесса выступает формирование организационной культуры у выпускников в условиях мировоззренческой, методологической, профессиональной направленности и развития пространственного мышления. В основу реализации модели подготовки конкурентоспособного специалиста наряду с ведущими общепедагогическими и методологическими принципами положен праксиологический принцип.

В основе технологии подготовки конкурентоспособного специалиста лежит поэтапное формирование графической культуры, которое представляет собой многоуровневое, полифункциональное и полиструктурное единство, механизм взаимодействия компонентов. Среди компонентов в качестве основных выделены: содержательный, целевой, результативный, процессуально-управленческий. При этом каждый из компонентов имеет собственное функциональное своеобразие и содержательное наполнение.

Таким образом, формирование организационной культуры инженеров в процессе профессионального образования обеспечивается дидактическим комплексом, направленным на последовательную реализацию обновленного содержания обучения, уточненных целей, адекватным технологическим обеспечением и обоснованных принципов. Все это является процессуальной частью модели, включающей педагогический механизм реализации в образовательной практике и методический инструментарий, ориентированной на поэтапное формирование графической культуры в условиях технических вузов будущих инженеров, что позволит повысить их конкурентоспособность на рынке труда.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Киричек, А.В. Процедура оценивания уровня социально-профессиональной компетентности специалиста машиностроительного профиля в условиях рынка труда / А.В. Киричек, А.В. Морозова // *Фундаментальные проблемы техники и технологии: тезисы докл. Междунар. конф. (Орел, 5-8 июня 2012 г.)*. Орел, 2012. – С. 402-404.
2. Пронюшкина, Т.Г. Конкурентоспособность как детерминанта профессионального образования инженеров / Т.Г. Пронюшкина. – М.: Изд-во МГУС, 2005. – 380 с.
3. Пронюшкина, Т.Г. Модель формирования графической культуры как системообразующей составляющей конкурентоспособности будущего инженера / Т.Г. Пронюшкина // *Сибирский педагогический журнал*. – Новосибирск: 2008. – № 4. – С. 186-197.

4. Слободской, А.Л. Организационная культура: учеб. Пособие / А.Л. Слободской, О.А. Касьяненко. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2003.-192 с.

**Пронюшкина Татьяна Геннадьевна**

Муромский институт (филиал) ФГОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Кандидат педагогических наук, профессор кафедры социально-гуманитарных наук

Тел: 89157772322

E-mail: TGpron@yandex.ru

**Морозова Анна Валентиновна**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК»

Кандидат социологических наук, заместитель директора по НИР Технологического института им. Н.Н. Поликарпова

Тел.: (4862) 555524

E-mail: niotiostu@gmail.com

---

T.G. PRONYUSHKINA, A.V. MOROZOVA

**COMPETITIVENESS AS AN INTEGRATING POTENTIAL FORMATION  
OF ORGANIZATIONAL CULTURE ENGINEER**

*The process of formation of the organizational culture of an engineer in the competitive structure of the expert. Structuring principle, a universal framework of the organizational culture of a professional engineer, is a competitive advantage. The developed system of value orientations, and development of key competencies considered by the author as the basis for the development and functioning of a competitive person.*

**Keywords:** *organizational culture, competitive, entrepreneurial potential, graphic culture, competitive model of training specialist.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kirichek, A.V. Procedura ocenivanja urovnja social'no-professional'noj kompetentnosti specialista mashinostroitel'nogo profila v uslovijah rynka truda / A.V. Kirichek, A.V. Morozova // Fundamental'-nye problemy tehniki i tehnologii: tezisy dokl. Mezhdunar. konf. ( Orel, 5-8=ijunja 2012 g.). Orel, 2012. – S. 402-404.

2. Pronjushkina, T.G. Konkurentosposobnost' kak determinanta professional'nogo obrazovanija in-zhenerov / T.G. Pronjushkina. – M.: Izd-vo MGUS, 2005. – 380 s.

3. Pronjushkina, T.G. Model' formirovanija graficheskoy kul'tury kak sistemoobrazujushhej sostavljajushhej konkurentosposobnosti budushhego inzhenera / T.G. Pronjushkina // Sibirskij pedagogicheskij zhurnal. – Novosibirsk: 2008. – № 4. – S. 186-197.

4. Slobodskoj, A.L. Organizacionnaja kul'tura: ucheb. Posobie / A.L. Slobodskoj, O.A. Kas'janenko. – SPb.: Izd-vo SPbGUJeF, 2003.-192 s.

**Pronyushkina Tatyana Gennadevna**

Murom Institute (Branch) FSEIHPE "Vladimir State University of Alexander and Nicholas G.G. Stoletovs

Ph.D., professor of department of social sciences and humanities

Tel: 89157772322

E-mail: tgpron@yandex.ru

**Anna Valentinovna Morozova**

FSBEI HVT «State University – ESPC»

Can.Sc. soc., Deputy Director of the Institute for scientific research works Polikarpov Technological Institute

Tel.: (4862) 555524

E-mail: niotiostu@gmail.com

# МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 544.725:687.15

М.В. РОДИЧЕВА, А.В. АБРАМОВ, А.А. ПАВЛОВСКАЯ

## МЕЗОМОДЕЛИ СТРУКТУРЫ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ КОЛЛОИДНЫХ ПОЛОТЕН

*Авторами рассмотрены актуальные подходы к моделированию структурных характеристик капиллярно-пористых коллоидных текстильных полотен, построены модели структуры на примере нескольких образцов, отличающихся друг от друга видом переплетения. Работа выполнена в рамках ГРАНТ № 12-08-97577 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и влагопереноса в структуре капиллярно-пористых коллоидных полотен».*

**Ключевые слова:** мезомодели структуры капиллярно-пористых коллоидных полотен, модель Pierce, модель Новикова Н.Г.

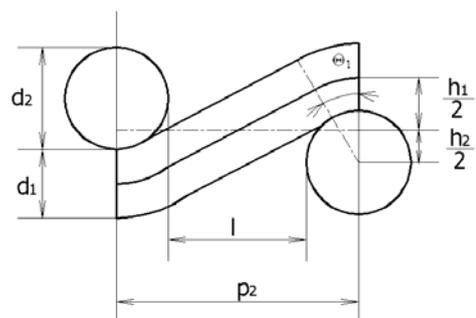
Исследование процессов переноса тепла и влаги в структурах капиллярно-пористых коллоидных тел является важной и актуальной задачей, решение которой направлено на поиск новых путей использования капиллярно-пористых материалов. В настоящее время появился широкий класс материалов, структурированных на микро и нано уровне, что придает им уникальные теплофизические и гигроскопические свойства. К ним относятся мембранные и пленочные материалы, современные нетканые утеплители, ячеистые конструкции на основе полимеров. Они широко используются в виде монослоев или пакетов при тепло- и влагоизоляции строительных конструкций, тепловых и отопительных систем, разработке новых видов защитной одежды и т.д. Разработка методов моделирования и исследования теплофизических, механических и гигроскопических свойств позволит расширить сферы применения капиллярно-пористых коллоидных полотен, а также разработать принципиально новые способы защиты человека от негативных влияний окружающей среды.

Известно, что свойства капиллярно-пористых коллоидных полотен как макро систем формируется на микро и мезоуровне. Их исследование связано с моделированием пористых сред. Согласно современным представлениям, пористая среда представляет собой твердое тело регулярных структур, содержащее микрокапилляры, мезокапилляры и макрокапилляры (поры). При этом может быть выделена элементарная мезо ячейка, свойства которой определяют свойства полотна в макро масштабе.

Для многих классов капиллярно-пористых коллоидных полотен, подобное предположение является достаточно точным. Например, для тканей роль мезо ячейки выполняет рапорт переплетения [3]. К числу первых моделей, описывающих геометрию рапорта, относятся модели Пирса (Pierce) (рисунок 1) и Н.Г. Новикова [3, 1].



а)



б)

**Рисунок 1 - Модель Pierce**

а – структура ячейки; б – геометрические характеристики ячейки

Принцип моделирования основан на графическом представлении отдельных ячеек, пропорционально их реальным размерам. Подобное представление основано на расчетах геометрической структуры. Подобные расчеты могут быть проведены по моделям Новикова Н.Г. и Mishra R. (таблица 1) [1, 2].

Таблица 1 – Расчетные зависимости для определения структурных характеристик тканых капиллярно-пористых коллоидных полотен

№ п/п	Наименование показателя	Формула по методике	
		Н.Г. Новикова	R. Mishra
1	Диаметр нити d, мм	$d_n = 0,0357 \sqrt{\frac{T}{\rho_f}} \quad (1)$	$d_n = \frac{1}{280,2} \sqrt{\frac{T}{\varphi \rho_f}} \quad (2)$
		где: T - линейная плотность нитей, тэкс; φ - коэффициент упаковки пряжи; ρ <sub>f</sub> - плотность нити, мг/мм <sup>3</sup>	
2	Расстояние между нитями основы и утка p, мм	$\Delta l = \frac{100 - d_n \Pi}{\Pi - 1} \quad (3)$	$p_o = D \sin \Theta = D \sin \left( \frac{l_1}{D} \right) \quad (4)$
		$p_y = D \sin \Theta = D \sin \left( \frac{l_2}{D} \right) \quad (5)$	
		где: l <sub>1</sub> ; l <sub>2</sub> - длина нити основы (утка) в ячейке, мм Π - плотность ткани, число нитей на 100 мм длины; D - диаметр ячейки, мм	
3	Общая пористость R, %	$R = \left( 1 - \frac{\delta_T}{\gamma} \right) 100 \quad (6)$	сведений нет
		где: δ <sub>T</sub> - объем заполнения, мг/мм <sup>3</sup> γ - плотность вещества волокна, мг/мм <sup>3</sup>	
4	Фаза строения ткани, (по основе h <sub>1</sub> и утку h <sub>2</sub> , мм)	$h_1 = (d_o + d_y) \sin \alpha \quad (7)$	$h_1 = D \left( 1 - \cos \frac{l_1}{D} \right) \quad (9)$
		$h_2 = (d_o + d_y) \sin \beta \quad (8)$	$h_2 = D \left( 1 - \cos \frac{l_2}{D} \right) \quad (10)$
		где: α - угол наклона нитей основы, ° β - угол наклона нитей утка, °	

На основе представленных зависимостей, авторами были рассчитаны геометрические показатели систем для следующих капиллярно-пористых коллоидных тканей:

- образец № 1: ткань полотняного переплетения, по основе и утку пряжа х/б кардная;
- образец №2: ткань саржевого переплетения, по основе и утку пряжа х/б кардная;
- образец №3: ткань сатинового переплетения, по основе и утку пряжа х/б кардная;
- образец № 4: ткань полотняного переплетения по основе и утку нить текстурированная полиэфирная;
- образец № 5: ткань атласного переплетения по основе: нить комплексная некрученая, по утку: нить комплексная крученая.

Структура образцов № 1,2,5 представлена на рисунке 2.

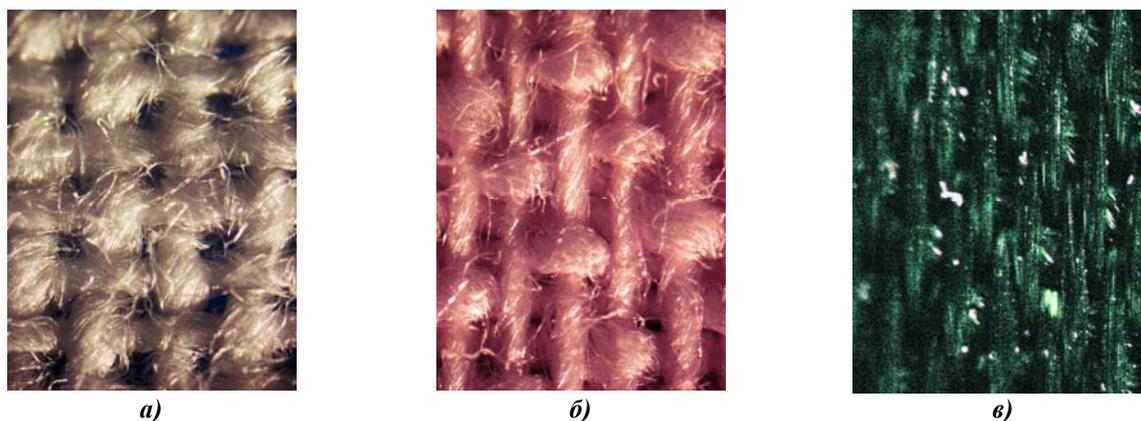


Рисунок 2 – Фотографии структуры исследуемых образцов  
а – образец № 1; б – образец № 3; в – образец № 5

В таблице 2 представлены результаты расчетов, проведенные по соотношениям (1-9).

Таблица 2 – Структурные характеристики исследованных образцов

Наименование показателя, размерность	№ образца				
	1	2	3	4	5
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	128	212	150	148	140
Толщина, мм	0,3	0,5	0,3	0,4	0,3
Общая пористость, %	71,5	71,7	78,7	73,2	74,3
Диаметр нитей, мм:					
основы	0,2	0,27	0,18	0,16	0,14
утка	0,21	0,21	0,18	0,16	0,16
Плотность тканей, п нитей на 100 мм					
по основе	228	210	302	296	710
по утку	218	296	304	284	316
интервал между нитями:					
по основе	0,21	0,21	0,18	0,17	0,1
по утку	0,26	0,13	0,1	0,19	0,1

На их основе авторами получены модели структуры рассмотренных образцов капиллярно-пористых коллоидных полотен (рис. 3).

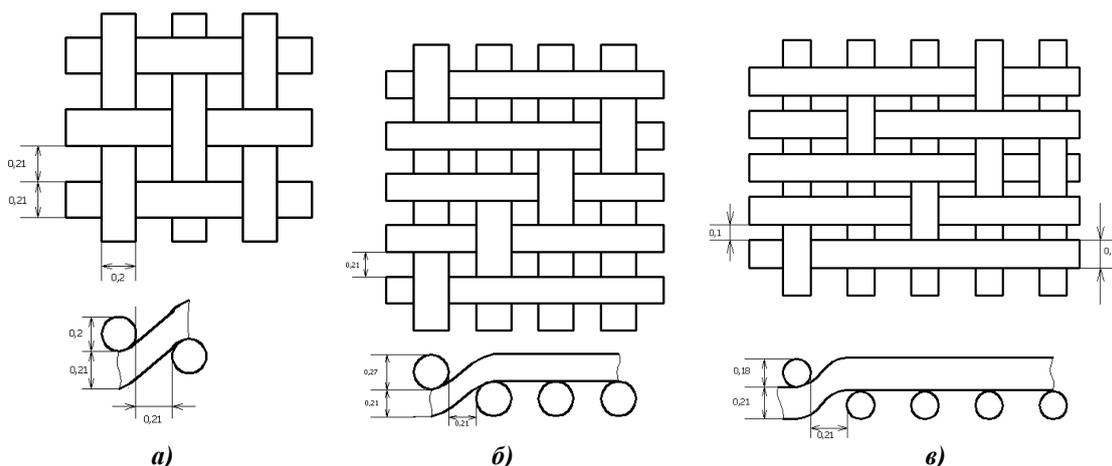


Рисунок 3 – Схемы образцов на мезоуровне  
а - образцов № 1,4 ; б - образца № 2 ; в - образцов № 3,5

Как отмечает S. Vassiliadis, наибольший вклад в свойства ячеек вносят физические свойства нитей. Поэтому можно ожидать, что гигроскопические и теплофизические показатели образцов № 1,2,3 окажутся предпочтительнее, чем у образцов № 4,5.

В то же время, доступ паров к микро- и мезокапиллярам нитей, определяется поверхностной плотностью тканей, поэтому, можно ожидать, что гигроскопические свойства

образца №2 окажутся выше, чем образца №1 и образца №3. Величина общей пористости, в представленном случае не является определяющей величиной, так как сорбция паров влаги из воздуха, зависит от объема микро и мезокапилляров, а не общего объема всего эффективного капиллярно-порового пространства.

Исходя из схожей структуры и материала нитей, гигроскопические свойства образцов №4,5 должны быть примерно одинаковыми. В случае синтетических капиллярно-пористых коллоидных полотен, величина общей пористости позволяет прогнозировать гигроскопические свойства. Поэтому критерию можно заключить, что гигроскопические свойства образца №4 окажутся выше, чем у образца № 5.

Известно, что тепловое сопротивление капиллярно-пористых коллоидных полотен в условиях спокойного воздуха определяются с одной стороны, толщиной материала; с другой - объемом воздуха, стабилизированного в структуре образца.

Как видно, структурные характеристики полотен позволяют сделать общие замечания относительно гигроскопических и теплофизических свойств структуры на макроуровне. Однако, для их уточнения необходимы дополнительные экспериментальные исследования, что является целью дальнейших исследований авторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузов, Б.А. Материаловедение швейного производства [Текст]: учебник для высших учеб. заведений лёгк. пром./ Б.А. Бузов, А.М. Алыменкова, Т.А. Модестова; под общ. ред. Б.А. Бузова.- М.: Издат. центр «Академия», 2004. – 448 с.
2. Mishra, R. Structural design engineering of woven fabrics by soft computing: non-plane weave / R. Mishra, D.Kremenakova, B. Behera, J. Militky // Autex Research Journal Vol. 11 №2, 2011 – P.42-46
3. Vassiliadis, S., et. Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art [Text] / S. Vassiliadis, A. Kallivretaki, D. Domvoglou, C. Provatidis // In-Tech – 2011 – 24p.

#### **Родичева Маргарита Всеволодовна**

Государственный университет - УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и конструирование швейных изделий»

Телефон (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

#### **Абрамов Антон Вячеславович**

Государственный университет - УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»

Телефон (4862) 76-14-39

E-mail bgdgtu@mail.ru

#### **Павловская Алла Александровна**

Государственный университет - УНПК, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Телефон (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

---

M.V. RODICHEVA, A.V. ABRAMOV, A.A. PAVLOVSKAYA

### **MESOMODELS OF STRUCTURE OF CAPILLARY AND POROUS COLLOIDAL CLOTHS**

*Authors considered actual approaches to modeling of structural characteristics of capillary and porous colloidal textile cloths, structure models on an example of several samples different from each other by a type of an interlacing are constructed. Work is executed in a framework the GRANT No. 12-08-97577 «Theoretical and pilot studies of processes warm and transfer moisture in structure of capillary and porous colloidal cloths».*

**Keywords:** mesomodels of structure of capillary and porous colloidal cloths, Pierce model, Novikov N. G. model

**BIBLIOGRAPHY**

1. Buzov, B.A. Materialovedeniye of sewing production [Text]: the textbook for higher educational institutions of light industry / B.A. Buzov, A.M. Alymenkova, T.A. Modestova; under Buzov's general edition. - M: Publishing center «Akademiya», 2004. – 448 p.
2. Mishra, R. Structural design engineering of woven fabrics by soft computing: non-plane weave / R. Mishra, D. Kremenakova, B. Behera, J. Militky // Autex Research Journal Vol. 11 №2, 2011 – P.42-46
3. Vassiliadis, S., ect. Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art [Text] / S. Vassiliadis, A. Kallivretaki, D. Domvoglou, C. Provatidis // In-Tech – 2011 – 24p.

**Rodicheva Margarita Vsevolodovna**

State university – ESPC. Orel

Cand. tech. sci., senior lecturer, head of the department «Technology and designing of garments»

Phone (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

**Abramov Anton Vyacheslavovich**

State university - ESPC. Orel

Cand. tech. sci., senior lecturer, department «Labor and environmental protection»

Phone (4862) 76-14-39

E-mail bgdgtu@mail.ru

**Pavlovskaya Alla Alexandrovna**

State university - ESPC. Orel

Cand. tech. sci., senior lecturer, department «Technology and designing of garments»

Phone (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

УДК 687.1.023: 687.053.661

Т.В. КВАСКОВА, Е.В. ПРОКОПОВА

## **ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ФОРМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ОДНОРОДНОСТЬ МОДЕЛЕЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДВУХИГОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Исследована зависимость потерь времени от количества остановов иглы при обработке клапанов различной конфигурации на двухигльном оборудовании. Выполнен расчет производительности труда за счет внесенных изменений в конфигурацию форм клапанов.*

**Ключевые слова:** конфигурация форм клапанов, технологическая однородность, двухигльное оборудование.

Одним из общепринятых подходов сравнения эффективности типовых и внедряемых промышленных методов обработки отдельных узлов швейных изделий является степень механизации труда на технологических операциях, определяющих качество их исполнения.

Значительное влияние на качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции оказывают отделки. Практически в каждой модели одежды присутствует тот или иной вид отделки, которая взаимосвязана со стилевым решением, формой, назначением одежды, модными тенденциями, возрастными и размерными параметрами. Классическим видом конструктивно-технологической отделки является – отстрочка (отделка декоративными швами). Этот вид отделки универсален, т.к. диапазон ее применения очень широк и не ограничивается стилевыми, размерными и возрастными особенностями моделей одежды. Отстрочку располагают или вдоль края формы изделия, или его элементов и деталей (низу изделия, низу рукава, по горловине, борту, планке, клапану, карману, манжете, воротнику и т.п.), или конструктивно-декоративных швов (рельефу, подрезу и т.д.). Так же отстрочки могут заполнять участки формы изделия и иметь разную конфигурацию.

Одной из основных характеристик отстрочки является ее читаемость на поверхности формы, она зависит от контрастности цвета ниток и ткани, разности фактур, например, нитки с блестящим эффектом на матовой поверхности материала, количества рядов отстрочки и интервалов между ними.

С точки зрения эстетических требований к одежде при выполнении строчек различной конфигурации, немаловажную роль играет применение двухигльного оборудования. С одной стороны повышается качество исполнения технологической операции (заданное количество и параллельность стежков, заданное расстояние между строчками), а с другой – влияет на зрительное восприятие параметров швов за счет возможности использования машин с различным расстоянием между иглами.

Часто композиционное решение одежды предполагает наличие карманов и клапанов, которые могут нести как функциональную, так и декоративную нагрузку. При обработке клапанов на двухигльной машине большое значение имеет конфигурация формы обрабатываемой детали.

Для исследования были выбраны клапаны, наиболее часто используемые при изготовлении верхних изделий. Варианты исследуемых клапанов представлены на рисунке 1.

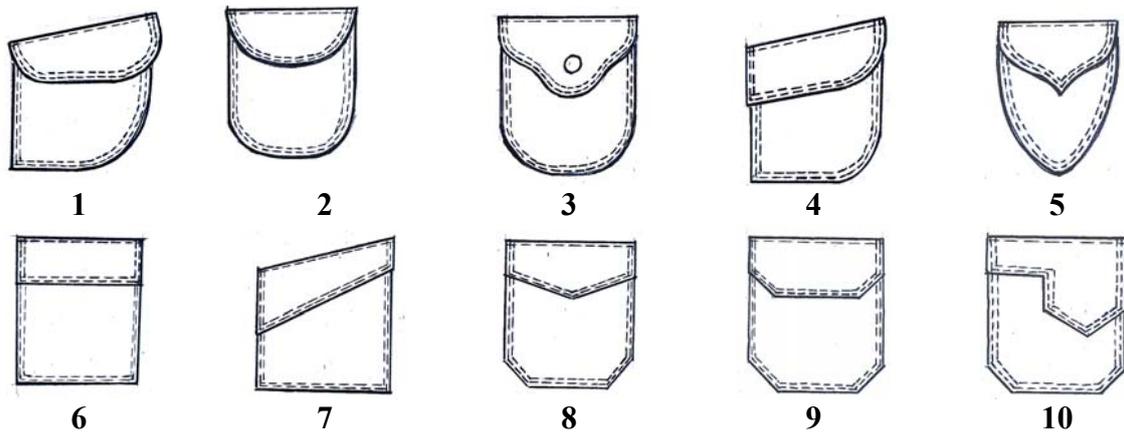


Рисунок 1 – Конфигурации форм исследуемых клапанов

Для проведения эксперимента использовано оборудование двух видов:

- одноигольная машина Tural 6160 – обладает двойным механизмом продвижения материала, т.е. нижний транспортер и отклоняющаяся игла. Скорость шитья 4500 об./мин. Челнок стандартный, вертикальный. Высота подъема лапки – 6 мм, максимальная длина стежка – 4 мм. Машина рассчитана на использование швейных игл DBx1 №75-110.

- двухигольная машина Tural GC6875M – предназначена для пошива верхней одежды, спецодежды, джинсовой одежды, сумок, обивки для мебели. Синхронизированное продвижение иглы и зубчатой рейки уменьшает посадку материала. Машина включает механизм отклонения иглы в направлении стачивания на длину стежка до 7 мм; механизм подъема лапки по вертикали, с высотой подъема до 7 мм; механизм многоемкого челнока с вертикальной осью. Скорость шитья машины 3000 об./мин. Машина рассчитана на использование швейных игл DPx5 №75-120.

Показания затрат времени на обработку полуфабриката фиксировались при помощи электронного секундомера 580195. Хронометраж мин/сек.-1/100. Диапазон показаний час/мин./сек.-9/59/59,99.

Для эксперимента отшиты по три образца каждой формы клапана из одного артикула ткани. В процессе эксперимента фиксировалось время обработки каждого клапана и количество остановов иглы в зависимости от формы. Число повторностей в эксперименте не менее трех раз на каждый вид клапана.

При обработке исследуемых клапанов с прямоугольными контурами на технологических поворотах обрабатываемой детали оператору необходимо отключить одну из игл, при этом определить число стежков до и после поворота, которые необходимо сделать до включения второй иглы. В этом случае выигрывает только качество изготовления, а скорость обработки на клапанах с отключением иглы четыре и больше проколов (образцы 9,10) даже ниже, чем при использовании одноигольной машины. Поэтому при формировании промышленной коллекции моделей и запуске их в производство необходимо строго следить за технологичностью деталей, влияющей на технологическую однородность моделей в целом, чтобы избежать потери производительной работы швейного потока. Если же конфигурация формы обрабатываемой детали не имеет углов (образцы 1,2,3), то машина работает двумя иглами непрерывно до завершения выполняемой операции и в этом случае обеспечивается минимизация потерь рабочего времени. Поэтому при разработке композиционного решения модели необходимо учитывать вышеизложенные аспекты.

В результате эксперимента было получено время обработки каждого образца. Зависимость времени потерь от количества остановов иглы на основе данных эксперимента определяются графически.

По оси абсцисс откладываются значения времени обработки клапанов  $t$ , в сек. По оси ординат – количество остановов иглы в исследуемых образцах,  $N$  (рис.2).

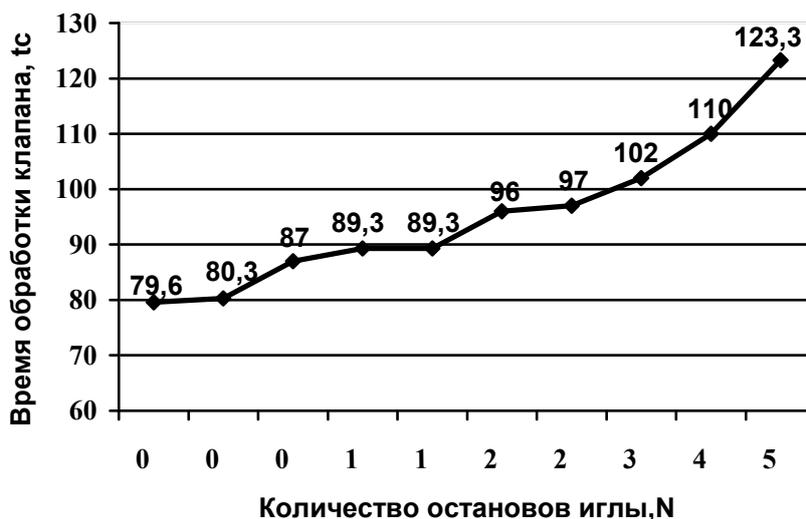


Рисунок 2 – Графики зависимости времени обработки, от количества остановов иглы, клапанов различной формы

В результате экспериментальных данных сделан вывод: чем сложнее конфигурация формы, тем больше остановов иглы в обрабатываемой детали, тем большее количество времени необходимо затратить на его обработку, т.е. потери времени на обработку узла взаимосвязаны с его технологической однородностью, а это влияет на расчет такта потока. Поэтому, для более эффективной работы технологического потока необходимо детально прорабатывать модели при запуске их в производство, собираемые детали должны соответствовать оптимальным условиям автоматического слежения и контроля (желательно, чтобы обрабатываемый контур был плавным, без резких переходов). Следует определить те случаи, когда угловатую конфигурацию детали изделия можно заменить на плавную, скругленную по контуру форму. Это возможно в двух случаях: во-первых, когда конфигурация не разрушает стилевое и образно-композиционное решение модели и во-вторых, когда функционально-декоративные и декоративные элементы выполняются из той же ткани, что и само изделие или они находятся в нюансном цветовом и фактурном отношении, т.е. детали и их контуры не активно визуальнo определяют на поверхности формы изделия.

Исходя из вышеизложенного предложены технологические конфигурации форм клапанов, наиболее оптимальные для обработки на двухигольном оборудовании.

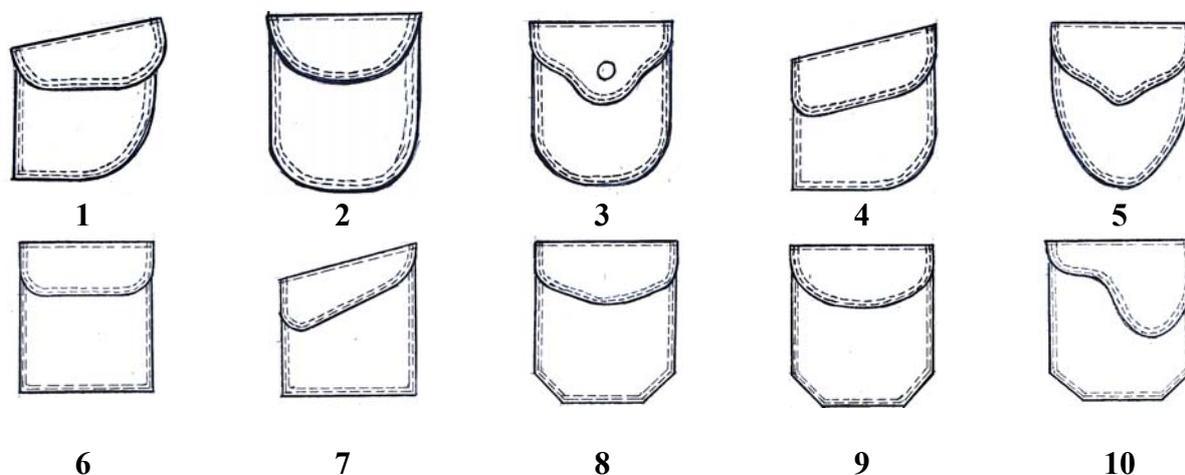


Рисунок 3 – Измененное композиционное решение исследуемых клапанов

Производительность труда оператора от вида выбранного оборудования в потоке и проработанности модели рассмотрено на примере клапанов различной конфигурации. На втором этапе эксперимента выполнен расчет сокращения затрат времени при обработке деталей клапанов с внесенными изменениями конфигураций (Рис.3) на двухигольном оборудовании, по сравнению с обработкой этих же клапанов на одноигольном оборудовании по формуле:

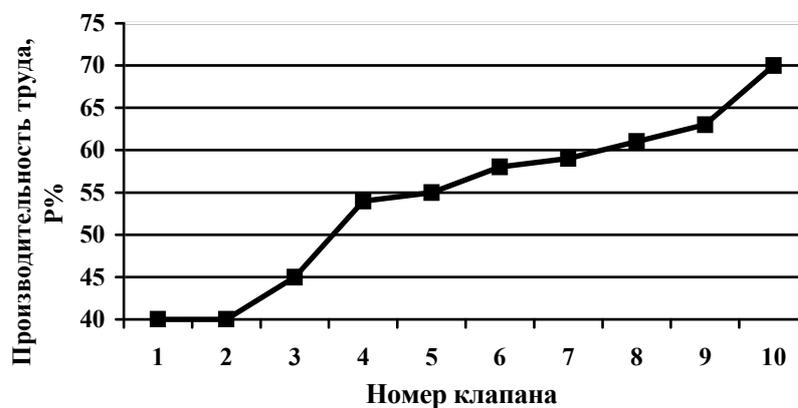
$$P_{сз} = \frac{T_{\partial} - T_{н}}{T_{н}} 100 \%,$$

где  $T_{\partial}$  – затраты времени на узел при обработке на одноигольном оборудовании, с

$T_{н}$  – новые затраты времени на узел при обработке на двухигольном оборудовании, с

$P_{сз}$  – сокращение затрат времени (%)

Согласно полученных результатов, построен график зависимости затрат времени  $P_{сз}$  (%) от проработанности формы клапанов и вида применяемого оборудования (рис. 3).



*Рисунок 3 – График зависимости сокращения затрат времени*

Анализ проведенных расчетов и построенных графиков, позволил сделать вывод, о том, что применение двухигольного оборудования при обработке клапанов различной формы, значительно эффективнее, одноигольного оборудования только при условии правильного оптимального подбора формы обрабатываемой технологической детали.

При обработке на одноигольной машине затраты времени на обработку этих же клапанов увеличиваются практически в два раза, а на некоторых образцах и более. Это обусловлено тем, что во-первых, такая строчка прокладывается в два приема: вначале – первая, а затем параллельно ей – вторая, во-вторых, увеличивается время на вспомогательные приемы т.к. поднять лапку, опустить лапку, переместить деталь для прокладывания второй строчки относительно первой. Естественно производительность потока в данном случае снижается, а качество операции зависит от квалификации исполнителя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычева, Е.Б. Конструктивное моделирование одежды [Текст]: учебное пособие для студентов вузов /Е.Б. Булычева, М.Н. Евсеева – 2-е изд. – М.: Издательский центр «Академия»: 2004 – 302 с.
2. Гусейнов, Г. М. Композиция костюма [Текст] : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Г. М. Гусейнов, В. В. Ермилова, Д. Ю. Ермилова. – М.: Академия, 2004. – 432 с.
3. Кваскова, Т.В. Оптимизация последовательности запуска моделей в производство на основе технологической однородности с использованием двухигольного оборудования / Т.В. Кваскова, Н.В. Шульдешова, Е.В. Баркова // Известия Орел ГТУ серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – № 3 - 2(293) 2012. – С. 117 – 123.
4. Кокеткин, П.П. Одежда: технология – техника, процессы – качество. [Текст]: Справочник / П. П. Кокеткин. - М.: МГУДТ, 2001. – 560 с.

**Кваскова Тамара Викторовна**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТИКШИ  
Тел. (4862) 55 – 11- 20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

**Проконова Елена Владимировна**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТИКШИ  
Тел. (4862) 55 – 11- 20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

---

T.V. KVASKOVA, E.V. PROKOPOVA

**THE INFLUENCE OF THE CONFIGURATION OF THE FORM  
OF FUNCTIONAL-DECORATIVE ELEMENTS ON TECHNOLOGICAL  
UNIFORMITY OF MODELS AND OVERALL PERFORMANCE OF THE  
TWO-NEEDLE EQUIPMENT**

*The dependence of time loss on the number of needle halts at processing of valves of various configurations on the two-needle equipment is investigated. The calculation of labour productivity at the expense of the changes in the configuration of forms of valves is carried out.*

**Keywords:** *configuration of forms of valves, technological uniformity, the two-needle equipment.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Bulycheva, E.B. Konstruktivnoe modelirovanie odezhdy [Tekst]: uchebnoe posobie dlja studentov vu-zov / E.B. Bulycheva, M.N. Evseeva – 2-e izd. – M.: Izdatel'skij centr «Akademija»: 2004 – 302 s.
2. Gusejnov, G. M. Kompozicija kostjuma [Tekst] : ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij / G. M. Gusejnov, V. V. Ermilova, D. Ju. Ermilova. – M.: Akademija, 2004. – 432 s.
3. Kvaskova, T.V. Optimizacija posledovatel'nosti zapuska modelej v proizvodstvo na osnove tehnologicheskoj odnorodnosti s ispol'zovanijem dvuhigol'nogo oborudovanija / T.V. Kvaskova, N.V. Shul'deshova, E.V. Barkova // Izvestija Orel GTU serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii». – № 3 - 2(293) 2012. – S. 117 – 123.
4. Koketkin, P.P. Odezhda: tehnologija – tehnika, processy – kachestvo. [Tekst]: Spravochnik / P. P. Koketkin. - M.: MGUDT, 2001. – 560 s.

**Kvaskova Tamara Viktorovna**

ФГБОУ ВПО "State University — UNPK". Eagle  
Candidate of Technical Sciences, associate professor ТИКШИ  
Ph. (4862) 55 - 11 - 20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

**Prokopova Elena Vladimirovna**

ФГБОУ ВПО "State University — UNPK". Eagle  
Candidate of Technical Sciences, associate professor ТИКШИ  
Ph. (4862) 55 - 11 - 20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 537.311.4

А.М. ШКИЛЬКО, И.В. КОМПАНЕЕЦ

## **ФАКТОРЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ**

*Представлены результаты исследований влияния паразитных эффектов на чувствительность измерителя контактной разности потенциалов. Приведены рекомендации, позволяющие минимизировать влияние паразитных эффектов на точность измерений контактной разности потенциалов.*

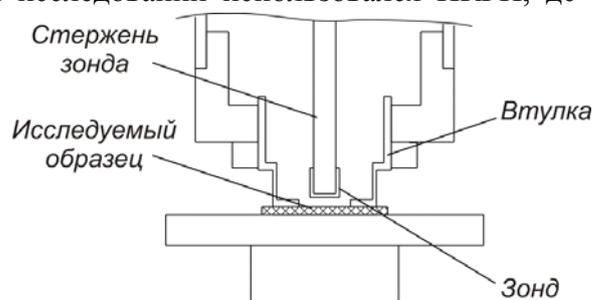
**Ключевые слова:** контактная разность потенциалов; паразитная емкость; емкость краевого эффекта; дрейф поверхностного потенциала.

**Введение.** Метод контактной разности потенциалов (КРП) получил достаточно широкое применение как метод неразрушающего контроля физико-химического состояния поверхности конструкционных материалов при различных внешних воздействиях (адсорбция, окисление, механическая обработка, деформация и т.п.), так и метод косвенного определения важнейшей характеристики твердотельных объектов – работы выхода электрона [1-2]. Современные измерители КРП (ИКРП) реализуются на основе трех методов – это безвибрационный, ионизационный и динамический конденсатор. В качестве экспрессных средств измерения КРП при контроле поверхности наиболее удобным с точки зрения приборной реализации является ИКРП с динамическим конденсатором [3]. Однако необходимо отметить, что, несмотря на достаточно широкое применение метода, на сегодняшний день существует ряд факторов, затрудняющих эффективную работу ИКРП, и, в первую очередь, это отсутствие единых требований к разработке и изготовлению первичных измерительных преобразователей (ПИП).

Ранее авторами была проведена классификация известных ПИП и установлена их физическая сущность, предложено аналитическое уравнение, устанавливающее взаимосвязь между геометрическими и электрическими параметрами ПИП, разработаны опытно-экспериментальный образец ИКРП и методики оценки качества поверхности конструкционных материалов (полупроводниковых пластин и деталей малогабаритных реле) на этапах технологического процесса производства [3-7].

**Цель работы.** Необходимым условием для создания промышленного образца ИКРП является установление закономерностей образования паразитных составляющих ПИП и разработка рекомендаций по их минимизации, что и определяет цель настоящей работы.

**Методика исследований.** Для проведения исследований использовался ИКРП, детально описанный в работе [4]. В отличие от большинства известных ИКРП в предложенной конструкции отсутствует необходимость проводить подбор межэлектродного расстояния при каждой смене исследуемых образцов (см. рис. 1). Для этого применен конструктивный элемент – втулка, которая соединяется с корпусом измерительного блока резьбовым соединением. Для проведения исследований использовались втулки с разной толщиной стенок, что позволило изменять расстояние между зондом и элементами конструкции измерительного блока, в данном случае – втулкой.



**Рисунок 1 – Конструкция измерительного блока**

Одним из основных конструктивных элементов любого ИКРП является зонд. Для экспериментальных исследований влияния применяемого материала зонда и условий его изготовления на стабильность работы ИКРП предусмотрена возможность быстрой смены зондов. Для исследований использовались зонды, рабочая поверхность которых выполнена из золота, платины, тантала, родия, меди, никеля и вольфрама.

#### **Результаты и их обсуждение**

**Паразитная емкость.** Из литературных данных [8-10] известно, что значительное влияние на чувствительность ИКРП оказывает паразитная емкость динамического конденсатора. Установившаяся емкостная связь между зондом и элементами конструкции (провода, механические части, корпус и т.п.) модулируется колебанием зонда и приводит к возникновению паразитного переменного сигнала, который может составлять десятые доли вольта. Эффективным способом уменьшения паразитной емкости является снижение амплитуды колебаний зонда. При этом необходимо учитывать тот факт, что уменьшение амплитуды колебаний зонда при сохранении основных параметров динамического конденсатора (частоты колебаний зонда, межэлектродного расстояния и т.д.) приведет к снижению коэффициента преобразования ПИП.

Вторым способом уменьшения паразитной емкости является увеличение расстояния между зондом и элементами конструкции измерителя (стенками измерительного блока и экранирующей камеры). Однако удаление экранирующих частей конструкции приводит к возрастанию влияния микрофонного эффекта, образующегося в результате вибрации токопроводящих элементов (соединительных проводов) и изоляторов. Как показали результаты исследований, отсутствие экрана вблизи измерительного зонда или замена его на детали, выполненные из диэлектрических материалов, способствует накоплению электростатического заряда на диэлектриках и, как следствие, к образованию электростатических полей. На результатах измерений это сказывается низким уровнем воспроизводимости и сбоям процесса измерений из-за влияния электростатических зарядов на показания измерительного зонда.

Наиболее эффективным способом минимизации погрешностей, образованных в измерительном блоке, является экспериментальный подбор амплитуды колебаний зонда и расстояния между зондом и элементами конструкции измерительного блока, а также максимально возможное уменьшение количества диэлектрических деталей в конструкции измерительного блока устройства.

Как известно, емкость динамического конденсатора изменяется обратно пропорционально расстоянию между электродами согласно уравнению [11]:

$$C(t) = \frac{C_0}{1 + L \sin(\omega t)}, \quad (1)$$

где  $L$  – коэффициент модуляции, равный отношению амплитуды колебаний  $A$  зонда к межэлектродному расстоянию  $d_0$  ( $0 < L < 1$ );

$C_0$  – статическая емкость или емкость динамического конденсатора в условиях отсутствия механических колебаний зонда.

Из выражения (1) следует, что для эффективного преобразования сигнала КРП в переменный сигнал шунтирующая емкость  $C_{ш}$  нагрузочного резистора должна быть как можно меньше по отношению к емкости динамического конденсатора. Данная емкость образуется суммой входной емкости предварительного усилителя и емкости проводников, связывающих зонд и первый усилительный каскад. К примеру, для площади зонда  $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  и частоты колебаний 300 Гц емкость конденсатора составляет не более  $9 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$ , поэтому даже незначительные размеры соединительного проводника могут внести существенную паразитную емкость. Кроме того, длинные линии связи являются источником шумов, вызванных механическими и электромагнитными наводками, которые приводят к образованию микрофонного эффекта и трибоэффекта.

**Емкость краевого эффекта.** Образуется между нерабочей поверхностью зонда и не исследуемыми областями образца и зависит от геометрических параметров зонда (формы, площади нерабочей области, высоты), физико-механического состояния поверхности мате-

риала (наличия оксидной пленки, дефектности поверхности и т.п.). Для теоретического расчета паразитной емкости краевого эффекта можно воспользоваться уравнением, предложенным в работе [12]:

$$C_n = \frac{1,113d_3}{8\pi} \left( \ln \frac{8\pi d_3}{d_0} - 3 + \left( 1 + \frac{h_3}{d_0} \right) \ln \left( 1 + \frac{h_3}{d_0} \right) - \frac{h_3}{d_0} \ln \frac{h_3}{d_0} \right) 10^{-12}, \quad (2)$$

где  $d_3$  – диаметр рабочей поверхности зонда;

$d_0$  – расстояние между зондом и исследуемым образцом в состоянии покоя;

$h_3$  – высота зонда.

Из уравнения (2) следует, что влияние паразитного эффекта возрастает с уменьшением диаметра зонда и с увеличением высоты зонда.

Расчеты, проведенные с использованием уравнения (2), показали следующее (см. рис. 2). Для рассматриваемых образцов с рабочей площадью в пределах  $8 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  паразитная емкость краевого эффекта не превышает 1/1000 от емкости динамического конденсатора при условии соблюдения выражения  $d_0 = 0,107\sqrt{S}$ , где  $S$  – площадь рабочей поверхности зонда.

Однако нужно учитывать, что уравнение (2) применимо, если отсутствуют элементы конструкции ИКРП в непосредственной близости от зонда, т.е. расстояние нерабочей поверхности зонда до исследуемой поверхности образцов значительно меньше, чем до элементов конструкции измерительного блока. В противном случае емкостная связь между нерабочей поверхностью зонда и исследуемым образцом фактически исчезает. Данное обстоятельство необходимо учитывать при разработке ИКРП.

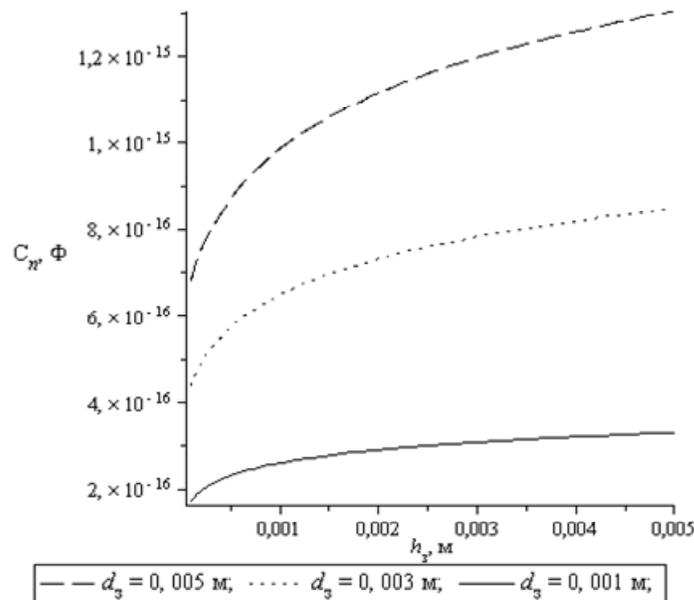


Рисунок 2 – Зависимость емкости краевого эффекта  $C_n$  от высоты зонда  $h_3$

**Дрейф поверхностного потенциала.** Возникновение паразитного эффекта, обусловленного дрейфом поверхностного потенциала зонда, зависит от физико-химических процессов (адсорбция, загрязнения, химические реакции, изменения температуры окружающей среды, структуры материала зонда вследствие старения и т.д.), происходящих на поверхности твердых тел.

При использовании метода КРП для измерений в атмосферных условиях возникает проблема выбора материала зонда и подготовки его поверхности.

Уменьшение дрейфа величины поверхностного потенциала, как правило, достигается путем тщательной подготовки рабочей поверхности зонда. Первоначально с поверхности удаляются загрязнения, трещины, царапины и другие неоднородности путем полировки до получения микронеровностей, не превышающих 10 мкм. Затем поверхность зонда покрывается слоем химически малоактивного материала таким, как золото, платина, тантал, родий, окис-

ленные пленки меди, никеля и др. На первом этапе после изготовления дрейф поверхностного потенциала может быть значительным и сильно колебаться во времени. Поэтому изготовленные зонды проходят соответствующие режимы термической обработки поверхности, пока показания поверхностного потенциала не стабилизируются и не станут воспроизводимыми. При необходимости зонды калибруются по материалу с известной работой выхода.

Обычно дрейф поверхностного потенциала в условиях окружающей атмосферы можно считать удовлетворительным в пределах  $(0,2-0,3) \cdot 10^{-3}$  В.

В случае, когда измерения проводятся в вакууме, круг материалов, используемых в качестве электродов, резко увеличивается, так как можно получать поверхности со стабильным значением работы выхода, близким к эталонному значению при очистке поверхности путем многократных отжигов и ионной бомбардировки.

**Заключение.** Наибольшее влияние на чувствительность ИКРП оказывают паразитные емкости. Поэтому для их минимизации необходимым условием является размещение входной цепи электронной схемы устройства в непосредственной близости от зонда, а также экспериментальный подбор основных параметров динамического конденсатора таких, как амплитуда колебаний зонда, частота колебаний зонда и межэлектродного расстояния.

Погрешность ИКРП, вызванная дрейфом поверхностного потенциала, может быть незначительной в случае соблюдения условий его термостабилизации и использования для зонда химически малоактивных материалов.

Полученные результаты необходимо учитывать при исследовании и разработке ИКРП с полезной площадью зонда в диапазоне  $8 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Целью дальнейших исследований является изучение влияния паразитных эффектов на точность измерений для ИКРП с диаметром зонда менее  $10^{-4}$  м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вудраф, Д. Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 564 с.
2. Шкилько, А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов / А.М. Шкилько. – Харьков: Ноулидж, 2009. – 244 с.
3. Компанец, И.В. Физические основы конденсаторных методов измерения контактной разности потенциалов / И.В. Компанец // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск «Автоматика и приборостроение». – 2009. – № 23. – С. 89-95.
4. Компанієць, І.В. Вимірювач контактної різниці потенціалів / І.В. Компанієць, А.М. Шкілько // Метрологія та прилади. – 2010. – № 4. – С. 33-36.
5. Компанец, И.В. Оценка чувствительности измерителя контактной разности потенциалов / И.В. Компанец, В.М. Комолов, А.М. Шкилько // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск «Новые решения в современных технологиях». – 2010. – № 46. – С. 89-94.
6. Компанец, И.В. Метод статистической оценки качества полупроводниковых материалов / И.В. Компанец, В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010): VII Міжнародна науково-технічна конференція, Харків, ННЦ «Інститут метрології», 12-14 жовтня 2010 р.: зб. наук. праць. – Т. 1. – С. 241-244.
7. Компанец, И.В. Исследование влияния технологического процесса на качество сварных соединений методом контактной разности потенциалов / И.В. Компанец, С.М. Замараев, В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 6/1 (48). – С. 9-13.
8. De Boer J.S.W. Analysis and Improvement of the Kelvin Method for Measuring Differences in Work Function / De Boer J.S.W., Krusemeyer H.J., Jaspers N.C.B. // Review of Scientific Instruments. – 1979. – V. 44, № 8. – P. 1003-1008.
9. Коротких, В.Л. Манипулятор для измерения контактной разности потенциалов методом Кельвина / В.Л. Коротких, А.Д. Коринфский, А.Л. Мусатов // Приборы и техника эксперимента. – 1977. – № 2. – С. 211-212.
10. D'Arcy R.J., Surplice N.A. The effects of stray capacitance on the Kelvin method for measuring contact potential difference / D'Arcy R.J., Surplice N.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1970. – № 3. – P. 482-488.
11. Илюкович, А.М. Техника электрометрии / А.М. Илюкович. – М.: Энергия, 1976. – 400 с.
12. Soonckind, L. Sur l'utilisation de la methode de Kekvin pour l'etude des travaux de sortie des surfaces inhomogenes / L. Soonckind, J. Bonnet, L. Lassabatere // Revue de physique appliquee. – 1979. – V. 14, № 8. – P. 795-798.

**Шкилько Анатолий Максимович**

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физики, теоретической и общей электротехники»

E-mail: kafedra@oef.uipa.kharkov.ua

**Компанец Игорь Валериевич**

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

Ассистент кафедры «Физики, теоретической и общей электротехники»

E-mail: kafedra@oef.uipa.kharkov.ua

A. M. SHKILKO, I. V. KOMPANEETS

**FACTORS LIMITING SENSITIVITY OF CONTACT POTENTIAL DIFFERENCE METER**

*The results of researches in the parasitic effects that influence the sensitivity of measuring contact potential difference are given. The recommendations that minimize parasitic effects and improve the accuracy of measurement of contact potential difference are suggested.*

**Keywords:** *contact potential difference, parasitic capacitance, capacitance of the edge effect, drift of the surface potential.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Vudraf, D. Sovremennye metody issledovaniya poverhnosti / D. Vudraf, T. Delchar. – Per. s angl. – M.: Mir, 1989. – 564 с.
2. Shkil'ko, A.M. Jekzozemissionnaja diagnostika poverhnosti konstrukcionnyh materialov / A.M. Shkil'ko. – Har'kov: Noulidzh, 2009. – 244 s.
3. Kompaneec, I.V. Fizicheskie osnovy kondensatornyh metodov izmerenija kontaktnoj raznosti po-tencialov / I.V. Kompaneec // Vestnik NTU «HPI». Tematicheskij vypusk «Avtomatika i priborostroenie». – 2009. – № 23. – S. 89-95.
4. Kompaniec', I.V. Vimirjuvach kontaktnoi rznici potencialiv / I.V. Kompaniec', A.M. Shkil'ko // Metrologija ta priladi. – 2010. – № 4. – S. 33-36.
5. Kompaneec, I.V. Ocenka chuvstvitel'nosti izmeritelja kontaktnoj raznosti potencialov / I.V. Kompaneec, V.M. Komolov, A.M. Shkil'ko // Vestnik NTU «HPI». Tematicheskij vypusk «Novye reshenija v sovremennyh tehnologijah». – 2010. – № 46. – S. 89-94.
6. Kompaneec, I.V. Metod statisticheskoy ocenki kachestva poluprovodnikovyh materialov / I.V. Kompaneec, V.V. Tihonenko, A.M. Shkil'ko // Metrologija ta vimirjuval'na tehnika (Metrologija-2010): VII Mizhnarodna naukovotehnichna konferencija, Harkiv, NNC «Institut metrologii», 12-14 zhovtnja 2010 r.: zb. nauk. prac'. – T. 1. – S. 241-244.
7. Kompaneec, I.V. Issledovanie vlijanija tehnologicheskogo processa na kachestvo svarnyh soedinenij metodom kontaktnoj raznosti potencialov / I.V. Kompaneec, S.M. Zamaraev, V.V. Tihonenko, A.M. Shkil'ko // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2010. – № 6/1 (48). – S. 9-13.
8. De Boer J.S.W. Analysis and Improvement of the Kelvin Method for Measuring Differences in Work Function / De Boer J.S.W., Krusemeyer H.J., Jaspers N.C.B. // Review of Scientific Instruments. – 1979. – V. 44, № 8. – P. 1003-1008.
9. Korotkih, V.L. Manipuljator dlja izmerenija kontaktnoj raznosti potencialov metodom Kel'vina / V.L. Korotkih, A.D. Korinfskij, A.L. Musatov // Pribory i tehnika jeksperimenta. – 1977. – № 2. – S. 211-212.
10. D'Arcy R.J., Surplice N.A. The effects of stray capacitance on the Kelvin method for measuring contact potential difference / D'Arcy R.J., Surplice N.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1970. – № 3. – R. 482-488.
11. Iljukovich, A.M. Tehnika jelektrometrii / A.M. Iljukovich. – M. : Jenergija, 1976. – 400 s.
12. Soonckind, L. Sur l'utilisation de la methode de Kekvin pour l'etude des travaux de sortie des surfaces inhomogenes / L. Soonckind, J. Bonnet, L. Lassabatere // Revue de physique appliquee. – 1979. – V. 14, № 8. – P. 795-798.

**Shkil'ko Anatolij Maksimovich**

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent, department of Physics, Theoretical and General Electrical Engineering

E-mail: kafedra@oef.uipa.kharkov.ua

**Kompaneets Igor Valerievich**

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkov

Assistant, department of Physics, Theoretical and General Electrical Engineering

E-mail: kafedra@oef.uipa.kharkov.ua

## УПРАВЛЯЕМЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

*Описан принцип работы двухпараметрового устройства для определения влажности, реализующего резонансный способ контроля. Предложено структурное решение, позволяющее снизить энергопотребление автономного влагомера за счет внедрения в его схему блока управления. Определен подход к расчету значений пассивных элементов блока управления. Произведен расчет выигрыша в энергопотреблении измерительной части влагомера.*

**Ключевые слова:** влажность, энергопотребление, средства резонансного контроля, генератор импульсов большой скважности.

В ряде отраслей промышленности (строительной, текстильной, пищевой и в сельском хозяйстве) технологические процессы связаны с измерением влажности обрабатываемых материалов. Например, в строительстве от влажности зависят основные свойства строительных материалов, их прочностные характеристики и, следовательно, эксплуатационные качества – надежность и долговечность. В сельском хозяйстве влажность почвы обуславливает целесообразность применения различных агротехнических методов, а влажность зерна является одним из факторов, определяющих его качество при хранении. Поэтому контроль влажности материалов занимает важное место в современных научных исследованиях.

Для контроля влажности материалов, которые в процессе увлажнения не образуют химических связей с водой, применяется диэлектрический метод, основанный на взаимодействии электрического поля с исследуемым веществом. Одной из реализаций данного способа является резонансный контроль. Его сущность заключается в том, что изменение влажности приводит к изменению емкости датчика, пропорционально которой изменяются как резонансная частота колебательного контура, так и амплитудно-фазовые характеристики сигнала, снимаемого с него.

Для повышения чувствительности и разрешающей способности приборов резонансного контроля влажности (влагомеров), применяют двухпараметровые устройства (рис. 1), анализирующие два параметра: амплитуду и фазу сигнала, проходящего через датчик [1].

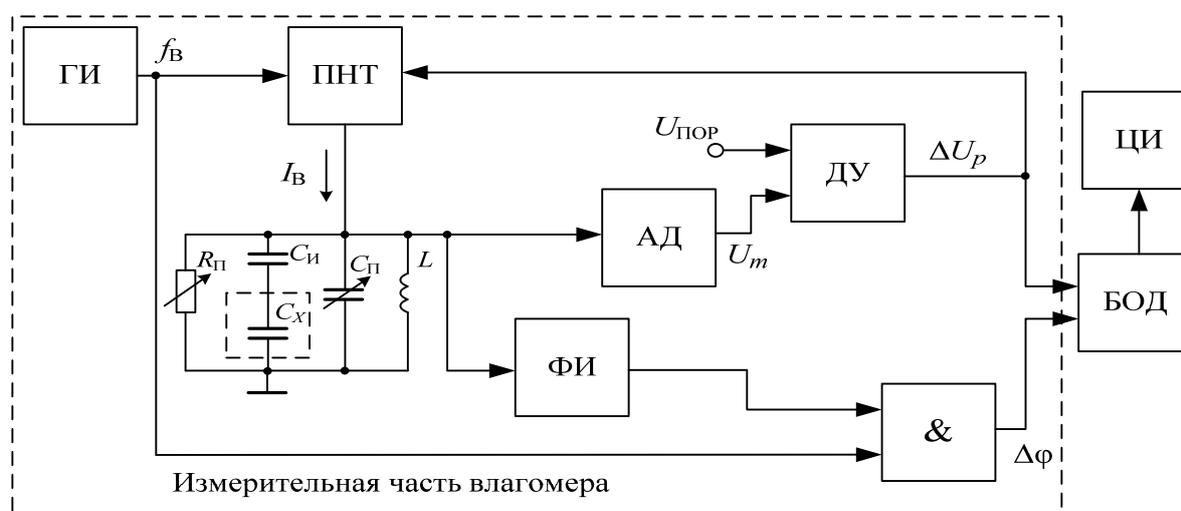


Рисунок 1 – Структурная схема двухпараметрового устройства резонансного контроля влажности материалов

В процессе работы влагомера от генератора импульсов (ГИ) через преобразователь напряжения в ток (ПНТ) подаются прямоугольные импульсы возбуждающего тока  $I_B$  на измерительный преобразователь на основе емкостного датчика  $C_x$  и  $LC$ -контура с переменным конденсатором  $C_{\Pi}$ . При высокой добротности  $LC$ -контура на его выходе формируется сигнал  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  гармонической формы, частота которого задается генератором ГИ. С помощью амплитудного детектора (АД) и дифференциального усилителя (ДУ) выделяется и усиливается сигнал разбаланса  $\Delta U_p$  между пороговым значением напряжения  $U_{\text{пор}}$  и амплитудой выходного преобразователя  $U_m$ , входящего в состав  $LC$ -контура.

Формирователь импульсов (ФИ) преобразует выходной гармонический сигнал датчика  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  в последовательность импульсов, которые сравниваются по фазе логическим элементом 2И с импульсами ГИ. При этом на выходе элемента 2И формируется последовательность импульсов, длительность каждого из которых зависит от разности фаз  $\Delta\phi$  между выходными сигналами генератора ГИ и датчика. Блок обработки данных (БОД) по полученным значениям  $\Delta U_p$  и  $\Delta\phi$  рассчитывает влажность контролируемого материала по заданному алгоритму. Результаты контроля выводятся на цифровой индикатор (ЦИ).

В ряде случаев устройства резонансного контроля влажности могут использоваться в автономном режиме. Например, при установке их на поверхностный слой дороги (асфальт, бетон) для получения оперативной информации о состоянии дорожного покрытия на сети автомобильных дорог [2]. Наличие этой информации позволяет дорожно-эксплуатационной службе прогнозировать возможность возникновения скольжения на дорогах и принимать решения по проведению необходимых работ по содержанию дорог в надлежащем состоянии.

При использовании рассматриваемого устройства в автономном режиме возникает задача снижения его энергопотребления и увеличения срока службы прибора без замены гальванических элементов питания, что позволяет повысить универсальность его применения.

Одним из решений такой задачи является использование *управляемого ("импульсного") режима* работы влагомера – влажность относится к медленно изменяющимся во времени параметрам, поэтому ее измерение можно осуществлять с некоторой периодичностью.

Для реализации указанного режима предлагается в структурную схему влагомера (рис. 1) включить блок управления (БУ), представляющий собой генератор импульсов большой скважности, собранный на логическом элементе  $DD$  типа "триггер Шмидта" (рис. 2, а).

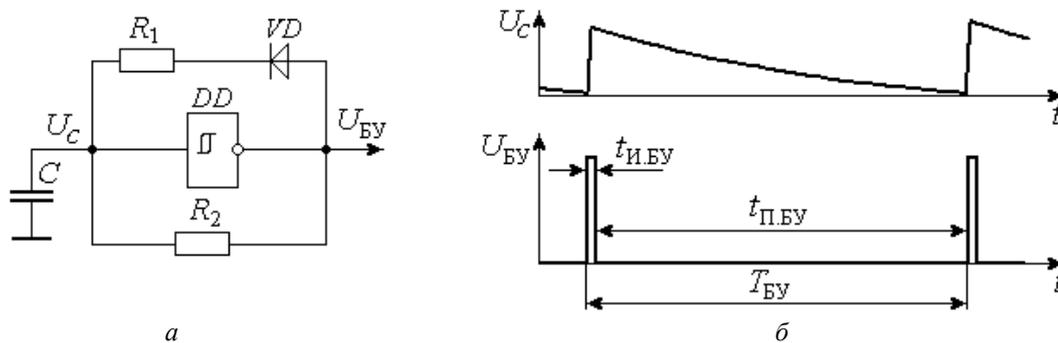


Рисунок 2 – Принципиальная схема генератора импульсов блока управления (а) и временные диаграммы его работы (б)

Параметры схемы блока управления (рис. 2, а) для указанного применения могут быть определены исходя из следующих соображений.

1. Согласно [3], пороговая частота мерцания ЦИ, то есть максимальная частота мерцания цифр, при которой еще возможна непосредственная визуальная оценка измеряемой величины, составляет не более 6 Гц, поэтому достаточная периодичность измерения влажности, определяемая блоком управления не превышает  $T_{\text{БУ}} = 1/f_{\text{БУ}} = 1/6 \text{ с} \approx 0,15 \text{ с}$ .

2. Длительность управляющих импульсов  $t_{И.БУ}$  должна превышать время установления колебаний в контуре  $t_{уст}$  на величину, обеспечивающую заданную погрешность измерения.

Процесс установления гармонических колебаний в контуре принято считать законченным при достижении напряжения на нем более 95 % от максимального значения [4]. Тогда минимальную длительность управляющих импульсов можно определить как

$$t_{И.БУ} \geq t_{уст} = 6Q/2\pi f_p, \quad (1)$$

где  $f_p$  – резонансная частота контура;  $Q$  – его добротность [4].

Согласно (1), чем выше добротность  $Q$  резонансного контура, тем дольше протекают в нем переходные процессы. Учитывая, что  $Q \approx 10 \dots 100$ , зависимость  $t_{уст}$  от добротности колебательного контура на некоторых частотах работы влагомера может быть представлена графически (рис. 3, а). При добротности  $Q = 100$  и частоте резонанса  $f_p = 1$  МГц минимальная длительность управляющих импульсов должна составлять примерно  $t_{И.БУ} \approx 0,1$  мс.

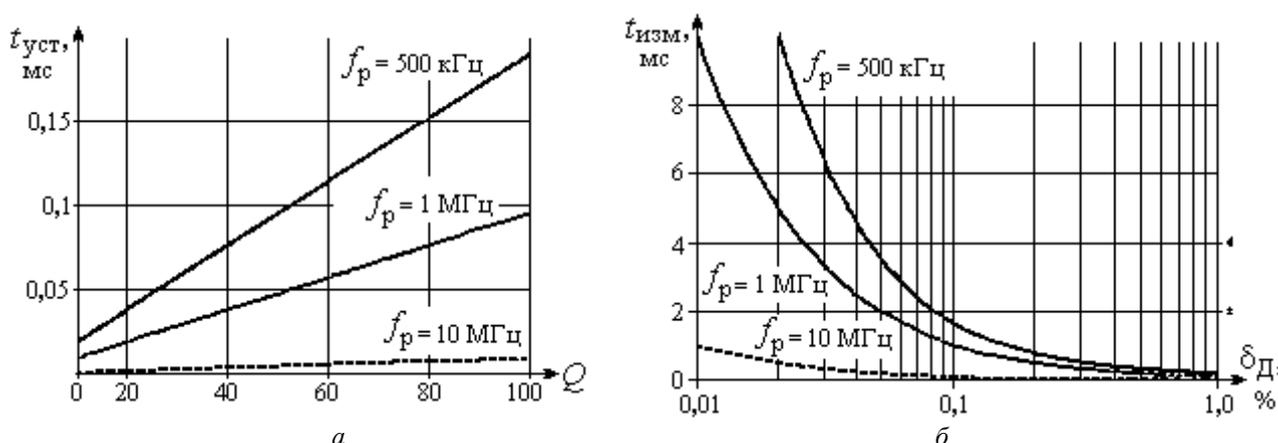


Рисунок 3 – Зависимости времени установления колебаний от резонансной частоты и добротности (а) и длительности измерения от заданной погрешности и добротности (б)

Для обеспечения заданной погрешности дискретности  $\delta_d$  длительность управляющих импульсов должна составлять  $t_{И.БУ} = t_{уст} + t_{изм}$ , где длительность измерения в стационарном режиме колебательного контура определяется выражением:

$$t_{изм} = 100/\delta_d \cdot f_p. \quad (2)$$

Зависимость  $t_{изм}$  от заданной погрешности  $\delta_d$  и частоты колебательного контура  $f_p$  представлена на рисунке 3, б.

Таким образом, при погрешности  $\delta_d = 0,1$  % на частоте  $f_p = 1$  МГц длительность управляющих импульсов составляет  $t_{И.БУ} = t_{уст} + t_{изм} = 0,1 + 1 = 1,1$  мс, а скважность этих импульсов достаточно велика:  $Q_{БУ} = T_{БУ} / t_{И.БУ} \approx 151$  (рис. 2, б).

В генераторе блока управления конденсатор  $C$  быстро заряжается через диод  $VD$  и резисторы  $R_1, R_2$  по экспоненциальному закону до уровня срабатывания триггера Шмидта  $DD$ . После его срабатывания выходное напряжение  $U_{БУ}$  становится нулевым, и конденсатор  $C$  экспоненциально разряжается до уровня отпуская через резистор  $R_2$  (рис. 2).

Длительность выходных импульсов генератора блока управления зависит от значений элементов  $R_1, R_2$  и  $C$ , т. е.  $t_{И.БУ} \approx 0,7 R_1 R_2 C / (R_1 + R_2)$ , а время разряда конденсатора между импульсами (время паузы) пропорционально сопротивлению  $R_2$  и составляет  $t_{П.БУ} \approx 0,7 R_2 C$ .





Рисунок 6 – Графики потребления тока измерительной частью влагомера в обычном и в управляемом режимах работы

С учетом энергопотребления ГИ и БУ, а также элементов *DD2.3* и *DD3.2* полная потребляемая мощность в обычном и управляемом режиме составила около 1,5 мВт и 0,65 мВт соответственно, что позволяет сделать вывод о снижении общей потребляемой мощности измерительной части влагомера примерно в 2,3 раза.

Дальнейшее снижение энергопотребления может быть достигнуто за счет работы элементов влагомера в *микрорежиме*, при котором ток потребления элементов не превышает долей миллиампера. Применение микрорежима позволяет значительно улучшить и такие важные показатели средства измерения, как точность, надежность, материалоемкость и экономичность [6].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисичкин, В.Г. Резонансные измерения параметров окружающей среды: моногр. / В.Г. Лисичкин. – Орёл: Академия ФСО России, 2011. – 286 с.
2. Распоряжение Федерального дорожного агентства от 25 ноября 2009 г. № 493-р "Об издании и применении ОДМ 218.28.003-2009 "Методические рекомендации по специализированному прогнозу состояния дорожного покрытия".
3. ГОСТ 21829-76. Система "человек-машина". Кодирование зрительной информации. Общие эргономические требования. – М.: Государственный комитет стандартов СССР, 1976. – 7 с.
4. Белецкий, А.Ф. Теория линейных электрических цепей: учебник для ВУЗ / А.Ф. Белецкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 543 с.
5. Серебряков, А.С. Электроника и электротехника. Лабораторный практикум на *Electronics Workbench* и *Multisim*: пособие для вузов / А.С. Серебряков. – М.: Высшая школа, 2009. – 336 с.
6. Загорский, Я.Т. Микроомощные электронные измерительные устройства / Я.Т. Загорский, Б.Р. Иванов. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.

#### Богданов Сергей Петрович

Академия Федеральной службы охраны России, г. Орел  
 Преподаватель кафедры электроники  
 E-mail: spbogdanov@mail.ru

#### Басов Олег Олегович

Академия Федеральной службы охраны России, г. Орел  
 Кандидат технических наук, докторант  
 E-mail: oobasov@mail.ru

S.P. BOGDANOV, O.O. BASOV

## MANAGED OPERATION OF RESONANCE CONTROL AUTONOMOUS DEVICES OF MATERIALS HUMIDITY

*The principle of the two-parameter moisture realizing resonant control method is outlined. The structural solution that reduces power consumption autonomous meter of hygrometer by the introduction in the circuit of the control block is offered. The approach to the calculation of passive circuit elements parameters control block is described. The calculation of the gain in energy consumption measurement of hygrometer is produced.*

**Keywords:** humidity, power, devices resonance control, high duty cycle pulse generator.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Lisichkin, V.G. Rezonansnye izmerenija parametrov okruzhajushhej sredy: monogr. / V.G. Lisichkin. – Orjol: Akademija FSO Rossii, 2011. – 286 s.
2. Rasporyazhenie Federal'nogo dorozhnogo agentstva ot 25 nojabrja 2009 g. № 493-r "Ob izdanii i pri-menenii ODM 218.28.003-2009 "Metodicheskie rekomendacii po specializirovannomu prognozu sostojanija dorozhnogo pokrytija".
3. GOST 21829-76. Sistema "chelovek-mashina". Kodirovanie zritel'noj informacii. Obshhie jergonomicheskie trebovanija. – M.: Gosudarstvennyj komitet standartov SSSR, 1976. – 7 s.
4. Beleckij, A.F. Teorija linejnyh jelektricheskikh cepej: uchebnik dlja VUZ / A.F. Beleckij. – M.: Radio i svjaz', 1986. – 543 s.
5. Serebrjakov, A.S. Jelektronika i jelektrotehnika. Laboratornyj praktikum na Electronics Workbench i Multi-sim: posobie dlja vuzov / A.S. Serebrjakov. – M.: Vysshaja shkola, 2009. – 336 s.
6. Zagorskij, Ja.T. Mikromoshhnye jelektronnye izmeritel'nye ustrojstva / Ja.T. Zagorskij, B.R. Ivanov. – M.: Jenergoatomizdat, 1993. – 320 s.

**Bogdanov Sergey Petrovich**

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol  
Lector  
E-mail: spbogdanov@mail.ru

**Basov Oleg Olegovich**

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol  
Candidate of technical Sciences  
E-mail: oobasov@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ ОТНОШЕНИЯ «МЕДЬ/НЕ МЕДЬ» В СВЕРХПРОВОДНИКАХ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ $Nb_3Sn$ ЗА СЧЕТ АСИММЕТРИИ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ СЕРДЦЕВИНЫ

*Приведены результаты теоретического исследования погрешности измерения отношения «медь/не медь» при вихретоковом контроле с использованием проходного вихретокового преобразователя сверхпроводников на основе соединения  $Nb_3Sn$ . Погрешность связана с неравномерным распределением меди по периметру проводника за счет асимметрии слабопроводящей сердцевины.*

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, вихретоковый метод, погрешность измерения, отношение «медь/не медь», сверхпроводник.

В ОАО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара разработана технология и налажено производство низкотемпературных сверхпроводников на основе соединения  $Nb_3Sn$ , предназначенных для изготовления обмоток катушек, создающих тороидальное магнитное поле в Интернациональном термоядерном экспериментальном реакторе (ИТЭР). В связи с жесткими требованиями к качеству стоит задача 100 % неразрушающего контроля сверхпроводников в процессе их производства. Как показано в работе [1], прежде всего, необходимо контролировать толщину медной оболочки сверхпроводника (отношение «медь/не медь»).

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать вихретоковый метод контроля [2], обладающий бесконтактностью и чувствительный к подлежащим контролю параметрам. В работе [3] проведен анализ и показана возможность измерения отношения «медь/не медь» с использованием проходного вихретокового преобразователя (ВТП). В работе приведены зависимости от рабочей частоты амплитуды вносимого напряжения проходного ВТП при изменении отношения «медь/не медь» для проводника с равномерным распределением меди по периметру.

Конструкция сверхпроводника на основе соединения  $Nb_3Sn$  представлена на рисунке 1. Повышение объемной доли стабилизирующей меди неизбежно приводит к уменьшению размера токонесущей сердцевины и, следовательно, к снижению критического тока. С другой стороны, уменьшение доли стабилизирующей меди, хотя и повышает критический ток, но приводит к недопустимому перегреву при защитном выводе энергии через медную оболочку. В связи с этим существует оптимум по доли меди в сверхпроводнике. Заданное количество меди принято характеризовать параметром – «медь/не медь», т.е. отношением объемных долей медной и не медной составляющих сверхпроводящего провода.

Возможность измерения отношения «медь/не медь» вихретоковым методом определяется существенно большей удельной электрической проводимостью меди, по сравнению с проводимостью не медной части проводника. Удельная электрическая проводимость медной оболочки составляет 58,8 МСм/м, а не медной части (бронзовая матрица с ниобиевыми волокнами + танталовые вставки + ниобиевый барьер) – 5,59 МСм/м. Влиянием хромового покрытия можно пренебречь, из-за его малой толщины (1...2 мкм) и более низкой электропроводимости.

Из-за особенностей технологии [4] внешний диаметр проводника остается неизменным и составляет 0,82 мм. По требованию разработчиков проекта ИТЭР параметр  $k_m$  «медь/не медь» должен находиться в диапазоне  $k_m = 1,0 \pm 0,1$ . Это соответствует номинальной толщине медной оболочки равной  $t_n = 0,12$  мм при нижнем допустимом значении  $t_{нд} = 0,1126$  мм и верхнем допустимом значении  $t_{вд} = 0,127$  мм.

Как показывают результаты металлографического анализа, сердцевина композиционного проводника может иметь овальность, что иллюстрируется рисунком 2. Неравномерное распределение меди по периметру проводника при ее неизменной объемной доле приводит к из-

менению вихретокового сигнала и вносит погрешность в измеряемое отношение. Изменение вихретокового сигнала связано с увеличением электрического сопротивления контуров, по которым циркулируют вихревые токи по мере уменьшения «узкой части» медной оболочки.

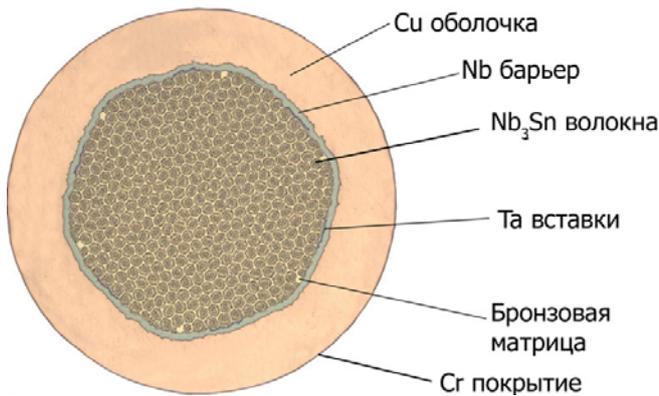


Рисунок 1 – Поперечное сечение сверхпроводника на основе соединения  $Nb_3Sn$

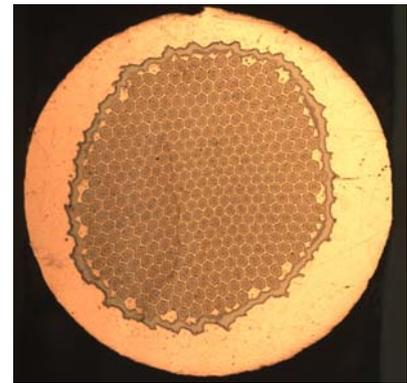


Рисунок 2 – Поперечные сечения сверхпроводника на основе соединения  $Nb_3Sn$  с овальной сердцевинной

Для количественной оценки степени влияния неравномерного распределения меди по периметру была использована геометрическая расчетная модель, представленная на рисунке 3. При расчетах принималось, что сердцевина имеет цилиндрическую форму с радиусом  $r_c$ , а ее центр может смещаться относительно центра внешней цилиндрической оболочки с радиусом  $r_o$  на величину  $C$ , изменяющуюся в диапазоне  $0 \leq C < (r_o - r_c)$ . Принималось, что материал сердцевины однороден и имеет удельную электрическую проводимость  $\sigma_c = 5,59$  МСм/м, а материал внешней медной оболочки – удельную электрическую проводимость  $\sigma_o = 58,8$  МСм/м.

Принималось, что на бесконечно длинный проводник заданной структуры воздействует однородное магнитное поле с напряженностью  $H$ , изменяющейся по гармоническому закону и направленной вдоль оси проводника. Это допущение достаточно точно выполняется при использовании для контроля проходного ВТП с соленоидальной возбуждающей катушкой, имеющей отношение диаметра к длине более 5 [2].

Для получения максимальной чувствительности контроля измерительную катушку ВТП стремятся максимально приблизить к контролируемому объекту, уменьшая ее диаметр до минимально возможного. В данном случае из-за особенностей конструкции ВТП измерительная катушка ВТП имела эквивалентный диаметр  $D_{ик} = 1,3$  мм.

Это связано с необходимостью механической защиты витков катушки и обеспечения свободного перемещения контролируемого провода через рабочую полость ВТП. Таким образом, коэффициент заполнения  $\eta = (2r_o/D_{ик})^2$  принятый при расчетах составил 0,398.

Расчет проводился методом конечных элементов (МКЭ), реализованном на программном пакете ANSYS. В процессе расчетов анализировалось изменение комплекса вносимого в ВТП напряжения при вариации степени несоосности поверхностей внешней медной оболочки и сердцевины, характеризуемое параметром  $C$ . Для обобщения полученных зависимостей применялась нормировка вносимого напряжения  $\underline{U}_{вн}$  и его изменений по модулю  $U_0$  напряжения холостого хода, наводимого в измерительной катушке при отсутствии контролируемого проводника, т.е.  $\underline{U}_{вн}^* = \underline{U}_{вн} / U_0$ .

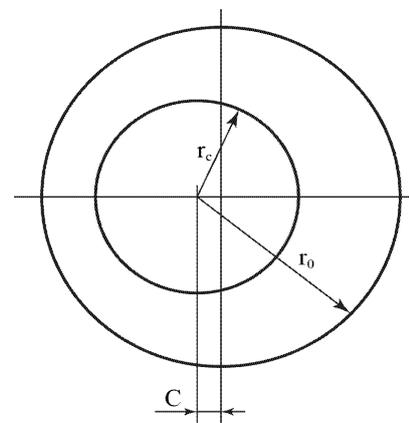


Рисунок 3 – Геометрическая расчетная модель области со смещенной центральной частью

Ранее выполненные расчеты показали, что оптимальная для измерения толщины  $t$  величина  $x$  лежит в диапазоне  $0,8 < x < 3,2$ . В связи с этим исследования проводились в данном диапазоне изменения  $x$ , что соответствует изменению рабочей частоты  $f$  в диапазоне  $8 \text{ кГц} < f < 128 \text{ кГц}$ .

На рисунках 4-5 приведены годографы нормированного вносимого напряжения  $\underline{U}_{\text{вн}}^*$  при изменении исходной толщины  $t$  медной оболочки и несоосности  $C$  для различных значений обобщенного параметра (рабочих частот).

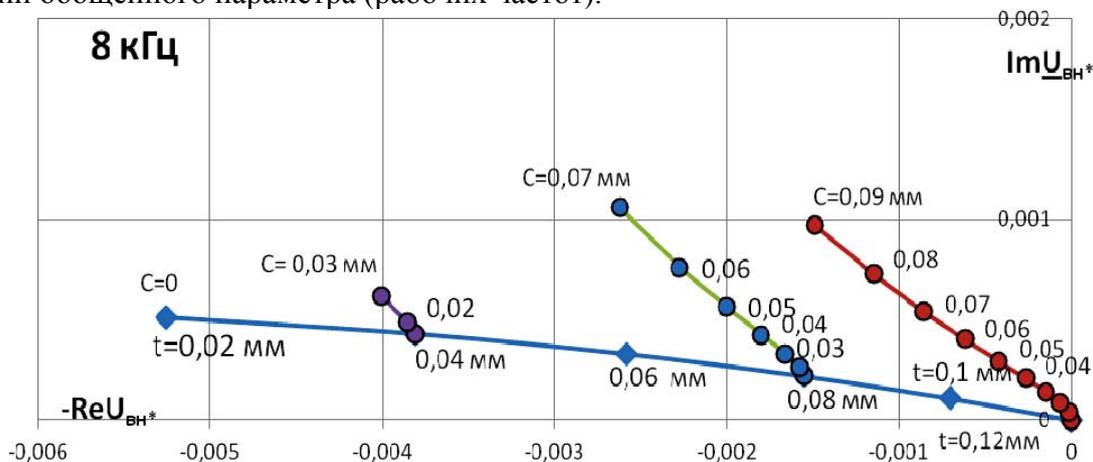


Рисунок 4 – Годограф нормированного вносимого напряжения для проходного ВТП при изменении толщины  $t$  медной оболочки и несоосности  $C$ . Компенсация на образце с номинальной толщиной  $t = 0,12 \text{ мм}$  при отсутствии несоосности ( $C=0$ )

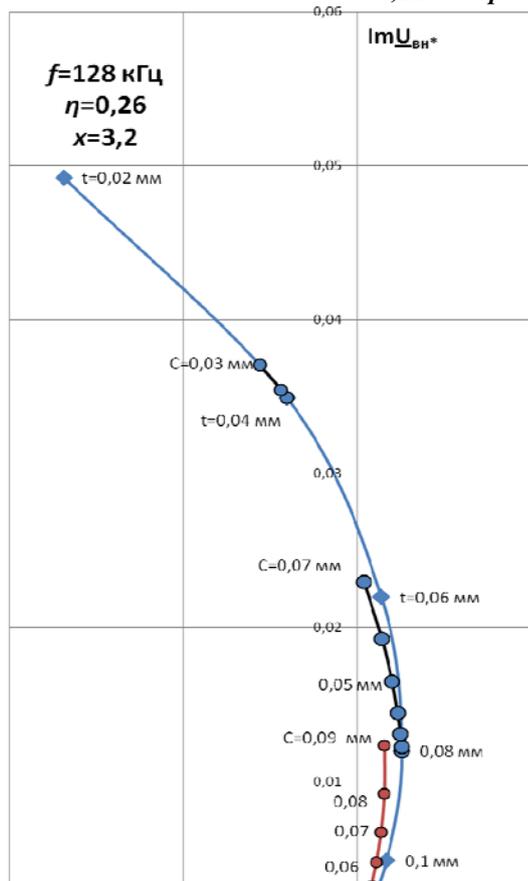


Рисунок 5 – Годограф изменения  $\underline{U}_{\text{вн}}^*$  при вариации исходной толщины  $t$  медной оболочки и несоосности  $C$  обобщенный параметр  $x = 3,2$ , компенсация на образце с номинальной толщиной  $t = 0,12 \text{ мм}$  при  $C=0$

За точку отсчета принималось комплексное напряжение  $\underline{U}_k^*$ , вносимое проводником с номинальными параметрами ( $t = 0,12 \text{ мм}$ ,  $C = 0$ ). Иначе говоря, принималось, что компенсация ВТП проводилась на образце с номинальной толщиной  $t = 0,12 \text{ мм}$  при отсутствии несоосности. Так как при возникновении несоосности толщина медной оболочки изменяется по периметру окружности в дальнейшем под  $t$  будем понимать исходную толщину медной оболочки, т.е. толщину, имевшую место без смещения.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что влияние смещения  $C$  на регистрируемые сигналы достаточно велико. При этом, как следует из приведенных на рисунках 4-5 годографов возможность отстройки от несоосности  $C$  амплитудно-фазовым методом имеется только при нижних значениях обобщенного параметра  $x$ . Однако в этом случае абсолютная чувствительность к контролируемому параметру довольно низка, что затрудняет практическую реализацию.

Приведенные на рисунке 6 графики показывают, что зависимость амплитуды  $\underline{U}_{\text{вн}}$  от  $C$  имеет

нелинейный характер. При этом, как следует из рисунка 7, влияние несоосности максимально проявляется на частоте 128 кГц, после чего наступают

уменьшение влияния несоосности с ростом частоты  $f$ . Однако это влияние ощутимо вплоть до  $f = 1 \text{ МГц}$ .

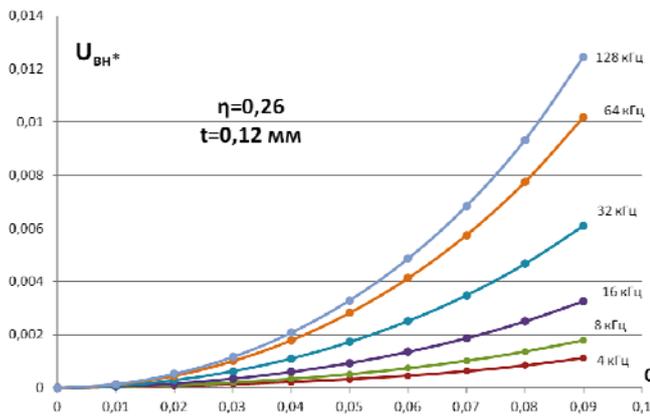


Рисунок 6 – Изменение амплитуды  $U_{вн}^*$  для разных значений частот в зависимости от несоосности  $C$

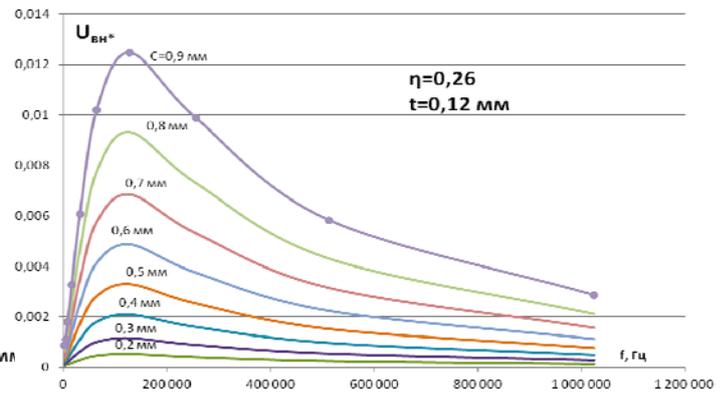


Рисунок 7 – Изменение амплитуды  $U_{вн}^*$  для разных значений несоосности  $C$  в зависимости от частоты

### Выводы

1. Проведенные исследования показывают, что влияние овальности сердцевины проводника весьма ощутимо и может приводить к погрешности измерения отношения «медь/не медь» до величины порядка 30 %.
2. Отстроиться от влияния овальности сердцевины на основе амплитудно-фазового метода маловероятно, из-за необходимости работы при низкой рабочей частоте порядка 8 КГц, не обеспечивающей приемлемой чувствительности к контролируемому параметру.
3. Применение многочастотного метода для отстройки от влияния овальности сердцевины малоперспективно, из-за ее ощутимого влияния вплоть до частоты  $f = 1$  МГц.
4. Для уменьшения погрешности, связанной с влиянием овальности слабопроводящей сердцевины сверхпроводника, целесообразно проведение дополнительных измерений неравномерности распределения меди в поперечном сечении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тронза, В.И. Определение и контроль структурных и геометрических параметров, влияющих на эксплуатационные свойства композиционных сверхпроводников на основе  $Nb_3Sn$  для термоядерного реактора ИТЭР: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / В.И. Тронза. – МГУПИ, 2012. – 18 с.
2. Федосенко, Ю.К. Вихрековый контроль: учеб. пособие / [Ю.К. Федосенко, П.Н. Шкатов, А.Г. Ефимов]; под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 224 с.
3. Шкатов, П.Н. Применение вихревых токов для контроля сверхпроводников на основе соединения  $Nb_3Sn$  для ИТЭР при их производстве / П.Н. Шкатов, В.И. Тронза, Д.К. Фигуровский, Е.А. Дергунова, С.М. Балаев, А.Е. Воробьева // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 4 (282). – С. 120-127.
4. Shikov A., Pansyomy V., Vorobieva A., Dergunova E., Vogdaev L., Kozlenkova N., Mareev K., Tronza V., Sytnikov V., Taran A., Rychagov A. Development of the  $Nb_3Sn$  bronze strand of TF Conductor Sample for testing in SULTAN Facility // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – vol. 19. – № 3. – 2009.

**Куценко Денис Олегович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва  
аспирант  
E-mail: ffriders@yandex.ru

D.O. KUTSENKO

## STUDY OF ERRORS IN MEASURING BY EDDY CURRENT METHOD OF THE RATIO OF THE "CU/S" IN SUPERCONDUCTORS ON THE BASIS OF CONNECTION OF $Nb_3Sn$ DUE TO THE ASYMMETRY OF WEAKLY CONDUCTING CORE

*Presents the results of a theoretical study of errors in measuring the ratio of the "Cu/S" in eddy current control with the use of the passing of eddy current changes-user superconductors on the basis of connection of Nb<sub>3</sub>Sn. The error is associated with the uneven distribution of copper on the perimeter of a conductor due to the asymmetry of weakly conducting core.*

**Keywords:** *non-destructive testing, eddy current method, the measurement error, the attitude of the "Cu/S", the superconductor.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Tronza, V.I. *Opređenje i kontrol' strukturnyh i geometričeskih parametrov, vlijajushhih na jekspluatacionnye svojstva kompozicionnyh sverhprovodnikov na osnove NB<sub>3</sub>Sn dlja termojadernogo reaktora ITJeR: avtoref. dis. na soisk. uch. step. kand. tehn. nauk / V.I. Tronza.* – MGUPI, 2012. – 18 s.
2. Fedosenko, Ju.K. *Vihretokovyj kontrol': ucheb. posobie / [Ju.K. Fedosenko, P.N. Shkatov, A.G. Efimov]; pod obshh. red. V.V. Kljueva.* – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2011. – 224 s.
3. Shkatov, P.N. *Primenenie vihrevyh tokov dlja kontrolja sverhprovodnikov na osnove soedinenija Nb<sub>3</sub>Sn dlja ITJeR pri ih proizvodstve / P.N. Shkatov, V.I. Tronza, D.K. Figurovskij, E.A. Dergunova, S.M. Balaev, A.E. Vorob'eva // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii.* – 2010. – № 4 (282). – S. 120-127.
4. Shikov A., Pantsyrny V., Vorobieva A., Dergunova E., Vogdaev L., Kozlenkova N., Mareev K., Tronza V., Sytnikov V., Taran A., Rychagov A. *Development of the Nb<sub>3</sub>Sn bronze strand of TF Conductor Sample for testing in SULTAN Facility // IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* – vol. 19. – № 3. – 2009.

### **Kutsenko Denis Olegovich**

The Moscow state University of instrument engineering and Computer science, Moscow

Post-graduate student

E-mail: ffriders@yandex.ru

А.М. ВАСИЛЬЕВ, В.В. СЛЕПЦОВ

## АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМ ПОТОКОМ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

*Предложен алгоритм управления скоростью отправки сегментов в распределенных информационно-измерительных системах гибких автоматизированных производств (РИИС ГАП), работа которого осуществляется не изменением окна передачи, а индивидуальной задержкой каждого сегмента. Определено, что изменение скорости отправки потока выражается в изменении его скважности (межсегментного временного интервала). В рассмотренном алгоритме устранена логическая зависимость алгоритмов коррекции ошибок передачи и управления потоком данных. Алгоритм доказал свою эффективность, так как он минимизирует среднюю длину очередей в маршрутизаторах и не доводит РИИС ГАП до состояния перегрузки в процессе определения максимально доступной соединению доли пропускной способности.*

**Ключевые слова:** распределенные информационно-измерительные системы, гибкое автоматизированное производство, передача данных, управление информационными потоками.

Задачу управления скоростью передачи данных можно условно разбить на два компонента:

- контроль отсутствия перегрузки принимающей части распределенной информационно-измерительной системы гибкого автоматизированного производства (РИИС ГАП);
- контроль отсутствия перегрузки структуры РИИС ГАП.

Иными словами, целью системы управления потоком является выравнивание скорости передачи данных со скоростью их приема. Механизм контроля перегрузки отправляет данные в РИИС ГАП не быстрее, чем РИИС ГАП может их доставлять в место назначения и не быстрее, чем получатель может их обрабатывать.

Перегрузка является проблемой неэффективного совместного использования разделяемых ресурсов. В РИИС ГАП ресурсы распределены между всеми узлами, коммутаторами и каналами передачи данных. Любой из этих трех компонентов может стать узким местом в РИИС ГАП и вызвать ее перегрузку.

С одной стороны РИИС ГАП должна обслуживать все пользовательские запросы на передачу данных, которые, как правило, не могут быть предсказаны и выражаются в виде всплесков по отношению к времени возникновения, скорости и объему передаваемой информации [1].

С другой стороны все физические ресурсы РИИС ГАП имеют ограниченную мощность и должны быть управляемыми для достижения оптимального общего использования многими периодами обмена данными. Более формальное описание состояния перегрузки РИИС ГАП можно получить, рассмотрев производительность ее работы в зависимости от нагрузки. Мерой производительности может служить мощность, определенная как [1]

$$P = W / RTT. \quad (1)$$

После достижения РИИС ГАП насыщенного состояния (точка А) пропускная способность перестает расти, а время ответа (RTT) продолжает, поскольку

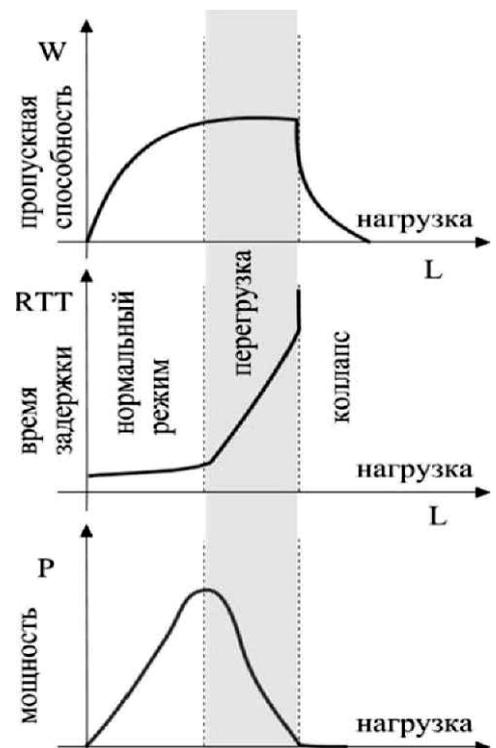


Рисунок 1 – Зависимость характеристик РИИС ГАП от нагрузки

происходит заполнение буферов внутри устройств РИИС ГАП. Мощность РИИС ГАП достигает пика в точке А – это оптимальный режим работы РИИС ГАП.

Механизмы управления потоками должны удерживать режим работы РИИС ГАП на оптимальном значении нагрузки и обеспечивать возможность выхода из состояния перегрузки, если перегрузка все-таки произошла.

Задержка данных при их передаче в РИИС ГАП состоит из двух компонентов:

$$D = D_T + D_q, \quad (2)$$

где  $D_T$  – время, затрачиваемое блоком данных на прохождение по элементам физической инфраструктуры линии связи, зависящее лишь от скорости распространения электромагнитных волн в той или иной среде;

$D_q$  – определяется временем, которое блок данных проводит в очередях маршрутизаторов, ожидая обслуживания.

Большинство алгоритмов управления потоками различаются способом определения наступления состояния перегрузки и реагируют на изменения состояния сети путем аддитивного увеличения нагрузки и мультипликативного сброса, в случае определения наступления перегрузки [2].

В такую традиционную схему можно внести некоторые полезные усовершенствования, а именно:

– управлять скоростью отправки сегментов в РИИС ГАП не изменением размера окна передачи, а индивидуальной задержкой каждого сегмента. Изменение скорости отправки потока выражается в изменении его скважности (межсегментного временного интервала);

– сделать индикатором текущего состояния РИИС ГАП и соответственно, наступления перегрузки не потерю пакета, а изменение скважности потока сегментов, измеряемое получателем, а также изменение времени транзита сегментов, измеряемое отправителем;

– установить независимость функционирования алгоритма от потока подтверждений для синхронизации отправки новых сегментов в РИИС ГАП.

Таким образом, в данном алгоритме устраняется логическая зависимость алгоритмов коррекции ошибок передачи и управления потоком.

Алгоритм оказывается более эффективным, так как он минимизирует среднюю длину очередей в маршрутизаторах и не доводит РИИС ГАП до состояния перегрузки в процессе определения максимальной доступной соединению доли пропускной способности.

Для проведения модельного эксперимента использована объектно-ориентированная программная модель архитектуры РИИС ГАП, которая моделирует ее основные свойства, определяющие: задержку, мультиплексирование, потери и ошибки передачи. Такая модель позволяет конструировать любую топологию соединений в РИИС ГАП.

Необходимо найти способ получения информации о состоянии РИИС ГАП, отличный от применения в этих целях потерь сегментов. Наиболее хорошо на роль индикатора состояния РИИС ГАП подходят временные характеристики потока:

- время задержки RTT;
- межсегментные интервалы.

Получается следующая схема: установка скорости потока отправителем посредством тщательной диспетчеризации сегментов, измерение скорости прибытия потока у получателя и передача этой информации отправителю вместе с остальной контрольной информацией.

Разность старого и нового значений скорости отправки информационного потока алгоритма на каждом шаге задается случайной переменной, однако, при наличии сигнала о перегрузке РИИС ГАП вероятность снижения скорости превышает вероятность ее увеличения на каждом новом шаге.

Пусть  $t$  – временной интервал между последовательными трансляциями пакетов. Задача функции диспетчеризации сегментов в том, чтобы задерживать отправку очередного сегмента на время  $\tau_s$  после начала передачи предыдущего сегмента. Обозначим все переменные, относящиеся к отправителю индексом  $S$  и  $r$  – относящиеся к получателю.

Итак,  $\tau_s$  временной интервал между моментами начала отправки в сеть сегмента  $i + 1$  и  $i$ -го, а  $\tau_r$  интервал между последовательно прибывшими к получателю сегментами.

Пусть  $R_{ls}$  скорость канала связи, непосредственно к которому подключен отправитель тогда время, уходящее на отставку одного сегмента (с момента начала передачи до момента ее окончания)  $t_{ls} = S / R_{ls}$ , где  $S$  – размер передаваемого сегмента.

Очевидно, что максимально возможная скорость потока

$$R_s^{\max} = R_{lx} = S / \tau_s^{\min}. \quad (3)$$

Минимальное значение межсегментного интервала в этом случае будет  $T_s^{mn} = t_{ls}$ , когда пакеты отправляются в РИИС ГАП без задержек с максимальной скоростью канального уровня.

Путем изменения  $\tau_s$  в пределах  $[\tau_s^{\min}, \infty)$  алгоритм может контролировать скорость потока в пределах  $[R_{ls}, 0)$ .

Алгоритм управления скоростью потока представлен на рисунке 2.

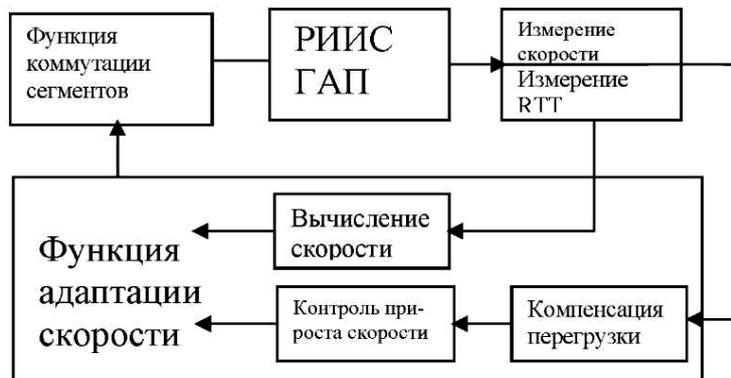


Рисунок 2 – Функциональная схема алгоритма управления потоком

В задачи функции диспетчеризации сегментов входит отправка сегментов в РИИС ГАП со строго заданной скоростью, которая выражается в значениях межсегментных временных интервалов. Функция измерения скорости определяет скважность потока поступающего к получателю и информирует отправителя о параметрах прибывающего потока.

Кроме того, отправитель сам производит измерение времени RTT. Черные прямоугольники обозначают сегменты одного соединения. Различие ширины прямоугольников отражает различие скоростей каналов. Меньшей скорости соответствует более длительное время передачи.

Значения скважности потока, измеренной получателем, и времени RTT, измеренного отправителем, поступают на вход функции адаптации, которая определяет новое значение скорости отправки потока в соответствии с полученными на вход значениями и своим состоянием в этот момент времени. Алгоритм использует два признака начала перегрузки РИИС ГАП, когда средняя скорость прибытия запросов сравнивается со средней скоростью обслуживания и началом роста очереди: начало роста RTT и стабилизацию  $R_r(t)$  при увеличении  $R_s(t)$ . Получатель алгоритма в сегментах с подтверждениями указывает значение скорости прибытия потока.

Получая подтверждение сегмента спустя время RTT после его отправки, источник алгоритма получает информацию о значении скорости, с которой поток, содержащий этот сегмент, прибыл к получателю и использует  $R_r(t)$  в качестве оценки  $R_e(t)$  ПС РИИС ГАП.

Диспетчер сегментов отправляет сегменты на линию через строго заданные межсегментные временные интервалы. Значение интервалов определяются скоростью отправки потока, которая задается функцией адаптации.

Очевидно, что скорость приема потока получателем не может быть выше скорости обслуживания потока на участке с наименьшей ПС, через который проходит соединение.

Таким образом, зная скорость прибытия потока к получателю, можно определить доступную пропускную способность сети. Для корректного измерения скорости необходимо не учитывать выпавшие из потока, т. е. потерянные сегменты, а также сегменты, доставляемые сетью в измененном порядке.

Для выполнения этого условия в поле "PS" каждого отправляемого сегмента записывается порядковый номер (или смещение) от предыдущего сегмента.

Получив сегмент  $i$ , получатель вычисляет разницу текущего времени и времени прибытия предыдущего  $j$  сегмента  $\tau_r$  и в случае, если поле "PS"  $i$ -го сегмента содержит значение  $j$ , помещает  $R_r = S / \tau$  в поле "PI" подтверждения следующего в противоположном направлении. Получатель извлекает значение поля "PI" из получаемых подтверждений и использует его для управления скоростью передачи (рис. 3).

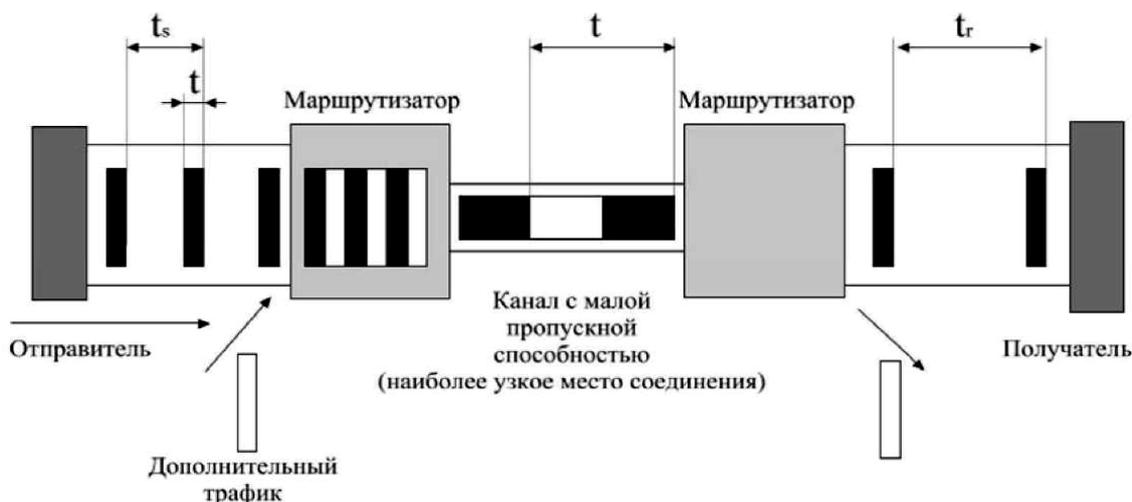


Рисунок 3 – Диспетчеризация сегментов и измерение скорости потока

Алгоритм управления потоком должен достичь быстрой реакции потока на изменяющиеся условия соединения и стабилизировать скорость передачи, когда она равна максимальной скорости РИИС ГАП.

На рисунке 4 представлена диаграмма режимов алгоритма адаптации алгоритма. Штрихованные линии обозначают возможные переходы в состояние остановки РИИС ГАП. Работа алгоритма начинается с режима быстрого увеличения скорости, аналогичной механизму замедленного старта стандартного алгоритма, для максимально быстрого достижения соединением верхнего предела доступной пропускной способности.

После того, как верхний предел достигнут, алгоритм переходит в режим точной настройки, в течение которой удерживает скорость на уровне доступной ПС. В случае определения уменьшения доступной ПС, алгоритм совершает мультипликативное снижение скорости, которое в случае продолжительного состояния перегрузки продолжается экспоненциально.

Итак, адаптация скорости передачи потока алгоритмом происходит в пяти режимах:

- режим ускоренного старта (SS) имеет цель максимально быстро увеличить скорость потока от минимального значения до значения, равного или превосходящего ПС канала сразу после инициализации соединения. Для этого скорость увеличивается экспоненциально.

После реализации перехода 2, алгоритм переходит в состояние мультипликативного сброса MD1.

- Режим мультипликативного сброса (MD1) следует за режимом SS. После выхода из SS значение  $R_s(t)$  будет превышать  $R_e(t)$ , поэтому в режиме MD1 скорость потока скачкообразно устанавливается заведомо ниже  $R_e(t)$ . После снижения скорости алгоритм переходит в режим восстановления.

– Режим восстановления (REC) имеет целью, линейно увеличивая скорость, довести ее до уже известного значения ПС канала  $R_s(t)$ , компенсируя возникшую в режиме SS перегрузку. В режиме REC вычисляется значение площади области компенсации  $A_c(t_i)$  как площади фигуры, образованной значениями  $R_s(t)$  над прямой  $R_e(t_i)$  за время, пока  $R_s(t_i) > R_e(t_i)$  в режиме SS.

На рисунке 5 представлены результаты после грубой настройки алгоритма.  $A_c(t_i)$  равна сумме площадей трапеции DCBE и треугольника ABE.  $A_c(t_0)$  равно отрезку ED.

Закрашенная область, состоящая из ABE и BCDE, есть площадь области компенсации, и выражает объем данных, накопившихся в буфере. Штриховая линия обозначает текущую оценку ПС алгоритма управления потоком РИИС ГАП.

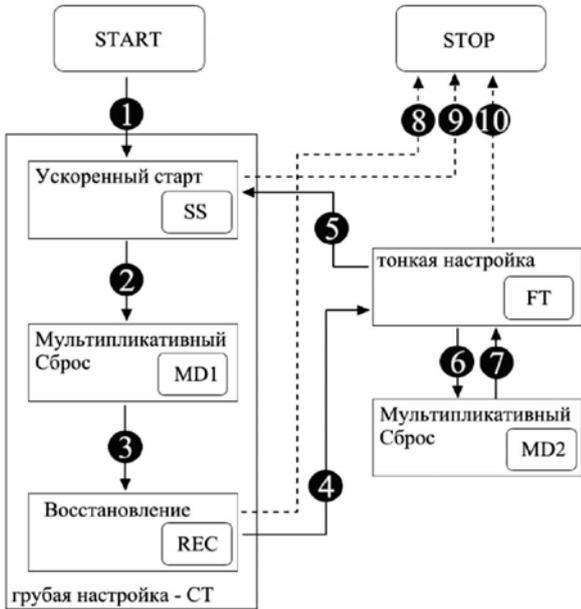


Рисунок 4 – Диаграмма режимов алгоритма адаптации алгоритма

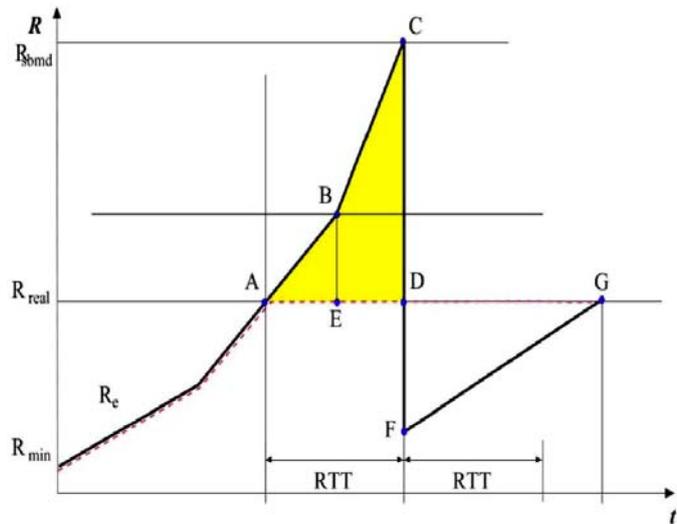


Рисунок 5 – Зависимость скорости от времени в фазе грубой настройки алгоритма

Ввиду задержки информации о состоянии РИИС ГАП на время  $RTT$ , в состоянии быстрого увеличения скорости отправки сегментов поток вызовет наполнение буферов РИИС. Пакеты будут накапливаться в РИИС в течение времени, когда скорость отправки сегментов превышает ПС РИИС (отрезок AD на рис. 5).

Пребывание соединения в состоянии восстановления необходимо для того, чтобы РИИС справилась с возникшей до уменьшения скорости отправки перегрузкой. Очевидно, что количество данных, накопившихся в буферах РИИС, определяется площадью области  $A_c(t_i)$ , поэтому скорость отправки сегментов в состоянии REC должна быть снижена таким образом, чтобы площадь фигуры DFG была равна  $A_c(t_i)$ .

– Режим тонкой настройки (FT) следует за режимом REC, в режиме FT скорость отправки данных медленно подстраивается под ПС канала. Отношение коэффициентов *speedup* и *slowdown* в состоянии FT определяет вероятность снижения или повышения скорости на каждом шаге.

Коэффициент *speedup*, отвечающий за повышение скорости, обратно пропорционален скорости данного соединения. Коэффициент *slowdown*, отвечающий за снижение скорости, пропорционален отношению измеряемого  $RTT$  к минимальному значению  $RTT$ . Значение *speedup* больше при меньших значениях  $R_s(t)$ , что дает медленным соединениям преимущество для получения доступа к большей относительной доле ПС.

Таким образом, вероятность повышения скорости для медленных соединений больше, а вероятность снижения скорости одинакова для всех соединений. Выход из режима FT происходит в случае скачкообразного изменения измеряемого RTT.

Отношение  $speedup/slowdown$  определяет знак отклонения мгновенного значения скорости от среднего. Если  $speedup > slowdown$ , то отклонение от среднего значения для мгновенного значения скорости будет положительным, то есть скорость потока будет увеличиваться. В случае  $speedup < slowdown$  скорость потока будет снижаться.

Также, в состоянии FT максимальное отклонение мгновенного значения скорости отправки пакетов от среднего за предыдущий период пропорционально среднему значению скорости. В связи с этим поток, совершая переход 4 в состоянии FT при большем значении оценки доступной ПС, приспосабливается к небольшим изменениям ПС более интенсивно.

– Режим мультипликативного сброса (MD2) необходим для быстрого снижения скорости при условии резкого роста RTT.

После этого протокол переходит в состояние FT, реализуя переход 7. В том случае мультипликативное уменьшение продолжается, поскольку последовательность переходов 6-7 реализуется неоднократно, выражаясь в экспоненциальном уменьшении скорости передачи данных.

Завершение работы протокола может произойти из любого состояния {SS, REC, FT} – переходы (8, 9, 10).

Ожидаемое поведение алгоритма управления скоростью потока в различных режимах изображено на рисунке 6. Значения  $t$  в точках А, В, С обозначают моменты перехода в новый режим.

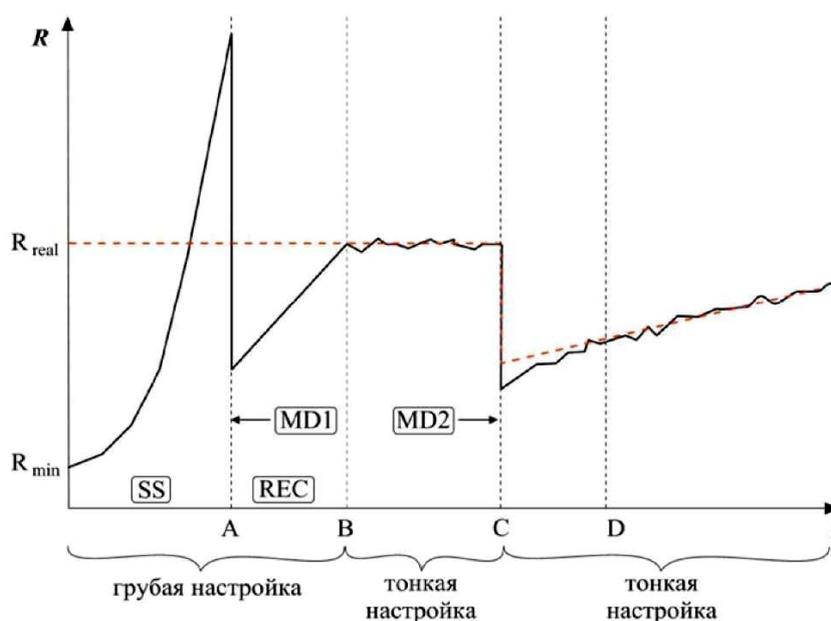


Рисунок 6 – Ожидаемое поведение алгоритма управления скоростью потока (зависимость скорости от времени)

В предложенном алгоритме управление скоростью отправки сегментов в РИИС ГАП осуществляется не изменением окна передачи, а индивидуальной задержкой каждого сегмента. Изменение скорости отправки потока выражается в изменении его скважности (межсегментного временного интервала).

Таким образом, в данном алгоритме устраняется логическая зависимость алгоритмов коррекции ошибок передачи и управления потоком данных.

Алгоритм оказывается более эффективным, так как он минимизирует среднюю длину очередей в маршрутизаторах и не доводит РИИС ГАП до состояния перегрузки в процессе определения максимально доступной соединению доли пропускной способности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оллсон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Оллсон, Дж. Пиани. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.: ил.
2. Васильев, А.М. Современные распределенные информационно-измерительные системы. Методология построения. Книга 1. / А.М. Васильев. – М.: МГУПИ, 2008. – 235 с. ил.

### **Васильев Андрей Михайлович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»  
Тел.: (499) 269-56-10  
E-mail: mgupir1@mail.ru

### **Слепцов Владимир Владимирович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и информационно-измерительные системы»  
Тел.: (499) 269-56-10  
E-mail: mgupir1@mail.ru

---

A.M. VASIL'EV, V.V. SLEPTSOV

## **ALGORITHM OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF THE INFORMATION STREAM IN THE DISTRIBUTED INFORMATION-MEASURING SYSTEMS OF THE FLEXIBLE AUTOMATED MANUFACTURES**

*The algorithm of a speed control of sending of segments in the distributed information-measuring systems of the flexible automated manufactures (RIIS ГАИ) which work is carried out not by change of a window of transfer, and an individual delay of each segment is offered. It is defined that change of speed of sending of a stream is expressed in change of its porosity (an intersegment time interval). In the considered algorithm logic dependence of algorithms of correction of errors of transfer and management of the data flow is eliminated. The algorithm has proved the efficiency as it minimises average length of turns routers and does not lead up RIIS ГАИ to a condition of an overload in the course of definition of share of throughput as much as possible accessible to connection.*

**Keywords:** *the distributed information-measuring systems, flexible automated manufacture, data transmission, management of information streams.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Ollson, G. Cifrovye sistemy avtomatizacii i upravlenija / G. Ollson, Dzh. Piani. – SPb.: Nevskij Dialekt, 2001. – 557 s.: il.
2. Vasil'ev, A.M. Sovremennye raspredelennye informacionno-izmeritel'nye sistemy. Metodologija postroeni-ja. Kniga 1. / A.M. Vasil'ev. – M.: MGUPI, 2008. – 235 s. il.

### **Vasil'ev Andrey Mihaylovich**

Moscow state university of instrument making and informatics, Moscow  
Candidate of technical Science, Senior teacher  
Tel.: (499) 269-56-10  
E-mail: mgupir1@mail.ru

### **Sleptsov Vladimir Vladimirovich**

Moscow state university of instrument making and informatics, Moscow  
Professor, Sci. Dr. in Technical sciences, head of “Devices and information-measuring systems” chair  
Тел.: (499) 269-56-10  
E-mail: mgupir1@mail.ru

# **ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА** **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 543.544.5.068.7

С.Н. СЫЧЕВ, В.А. ГАВРИЛИНА, С.Е. ПУЗЫРЕВ,  
К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, Е.В. ПАХОЛКИН

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ (ВЭЖХ) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 2. ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРИСАДОК И ПРОДУКТОВ ТЕРМО- И ТЕРМООКСИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ**

*Рассмотрено применение метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) для исследований присадок для смазочных материалов (СМ) в нормальных условиях и условиях термо- и термоокислительной деструкции. Показано, что при строгом выполнении хроматографических условий наблюдается хорошее качество хроматограмм для большого количества присадок, представляющих разные классы органических соединений. Результаты продемонстрированы преимущественно на примере использования обращено-фазового варианта ВЭЖХ.*

***Ключевые слова:** обращенно-фазовый вариант ВЭЖХ, анализ, смазочные материалы, присадки, термоокислительная деструкция.*

### **Введение**

Исследование механизмов термо- и термоокислительной деструкции присадок смазочных материалов (СМ) является важнейшим элементом определения оптимального состава и условий эксплуатации СМ в условиях термо- и термоокислительной деструкции (ТОД). Большое разнообразие составов и условий эксплуатации присадок ставит перед исследователем задачу по унификации хроматографических условий при анализе СМ, содержащих присадки. Не менее важная задача: унифицированные условия проведения ВЭЖХ должны быть пригодными для исследования присадок и продуктов ТОД методом жидкостной хромато-масс-спектрометрии (LC/МС), имеющего определенные ограничения по составу подвижной фазы (ПФ). Применение метода LC/МС в ряде случаев критично при уточнении механизмов ТОД.

Существует два основных варианта ВЭЖХ: нормально-фазовый (НФ ВЭЖХ) и обращено-фазовый (ОФ ВЭЖХ), подробно описанных в литературе [1, 2, 3]. Применение НФ ВЭЖХ для анализа базовых масел и кислород-серу-содержащих соединений описано в части 1 работы [4].

При анализе присадок и продуктов ТОД в основном применяется ОФ ВЭЖХ на основе водно-ацетонитрильных растворов. Введению анализируемой пробы в хроматограф предшествует экстракция присадок и продуктов их ТОД элюентом при воспроизводимых условиях: в противном случае хроматографические колонки быстро выходят из строя и наблюдается убывающая со временем воспроизводимость хроматограмм.

### **Анализ присадок к смазочным материалам**

Введение в состав СМ различного рода присадок значительно улучшает их эксплуатационные качества. Большое разнообразие и широкое применение присадок требует непрерывного совершенствования методов определения их качества, технологического контроля при изготовлении масел и определения количества и подлинности присадок в товарных маслах. Метод ВЭЖХ – один из немногих методов, способных хотя бы частично решить эту проблему.

Основной целью данной работы является выяснение возможностей метода ВЭЖХ при анализе присадок и продуктов ТОД, представляющих различные классы органических соединений.

### Экспериментальная часть

Хроматографический эксперимент проводился на хроматографе «Милихром-5-3» со сканирующим УФ-детектором. Хроматографические условия для анализа присадок: хроматографическая колонка КАХ-6-80-5, заполненная Сепароном С18; элюент «ацетонитрил-вода» в соотношении 80:20 по объему; расход элюента 150 мкл/мин.; длины волн 210, 230, 254 и 280 нм; температура окружающей среды 22±2 °С.

В зависимости от консистенции присадки использовались два варианта подготовки пробы: 1) 5 г присадки растворяют в 5 мл гексана. 2 мл полученного раствора и 10 мл раствора «ацетонитрил – вода» в объёмном соотношении 80:20 помещают в делительную воронку на 25 мл с притертыми пробками и встряхивают на встряхивающей машине АВУ-6С (или аналогичной) в течение 10 мин. После расслаивания фаз (центрифугирование) водно-ацетонитрильный экстракт фильтруют через фильтровальную бумагу (синяя лента) для отделения неотстоявшихся частиц. В результате получают аналитическую пробу в смеси «ацетонитрил – вода» 80:20; 1 г присадки и 10 мл раствора «ацетонитрил – вода» в объёмном соотношении 80:20 помещают в делительную воронку на 25 мл с притертыми пробками и встряхивают на встряхивающей машине АВУ-6С (или аналогичной) в течение 10 мин. После расслаивания фаз (центрифугирование) водно-ацетонитрильный экстракт фильтруют через фильтровальную бумагу (синяя лента) для отделения неотстоявшихся частиц. В результате получают аналитическую пробу в смеси «ацетонитрил – вода» 80:20.

### Требования к хроматографическим пикам присадок

Требования к хроматографическим пикам присадок: хроматографический пик или пики (если присадка представляет смесь веществ) присадки не должен уширяться: реальная эффективность хроматографической колонки по анализируемой присадке не должна быть меньше паспортной более чем на 10 %; должна быть предусмотрена возможность улучшения селективности хроматографической системы за счет изменения концентрации ацетонитрила в элюенте; с целью получения устойчивых спектральных отношений основные хроматографические пики присадки должны быть близки к гомогенным, т.е. соответствовать одному веществу (рис.1).

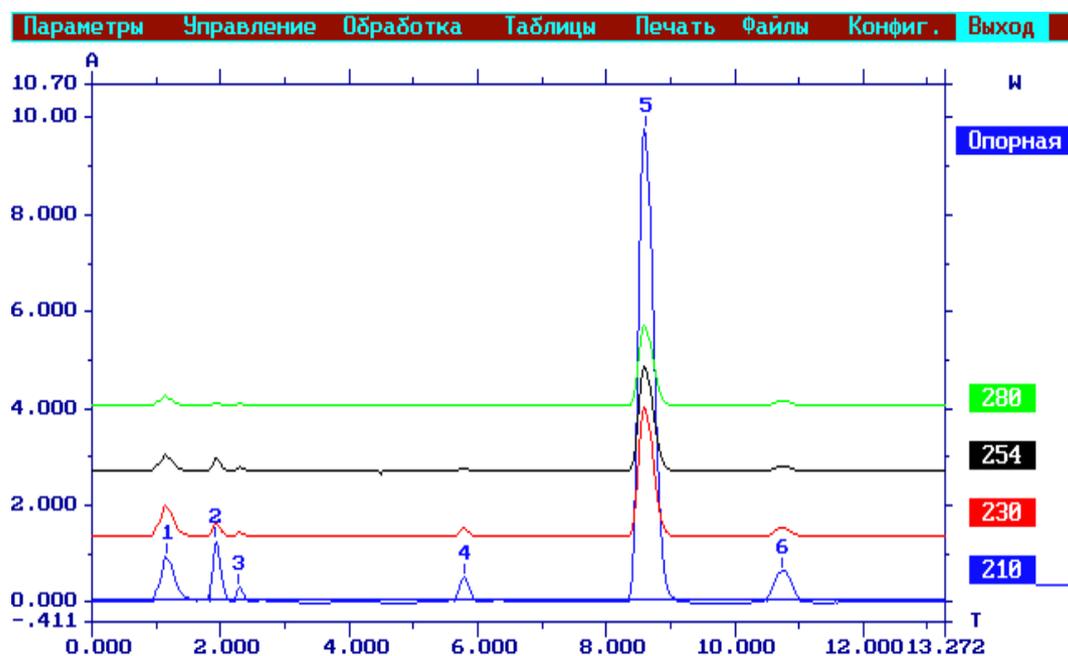


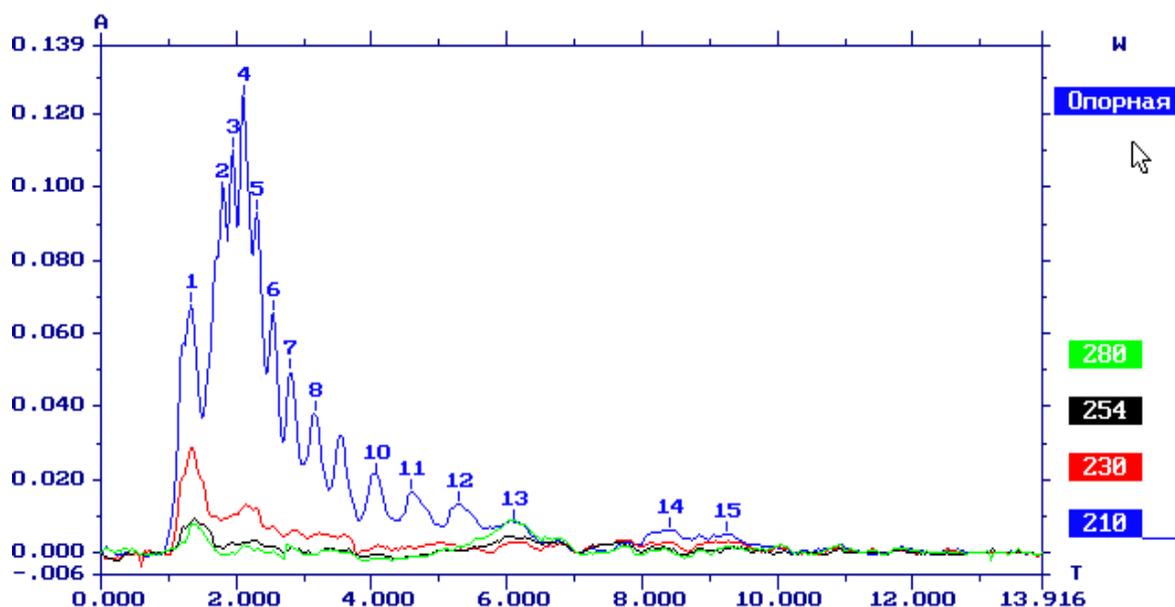
Рисунок 1 – Водно-ацетонитрильный экстракт присадки Infinitum T 4405

Колонка 80×2, Сепарон С18. Элюент «ацетонитрил-вода» 80:20 по объему, расход элюента 150 мкл/мин, длины волн 210, 230, 254, 280 нм

Таким требованиям в указанных хроматографических условиях соответствуют следующие присадки: присадки к турбинным маслам – агидол, ионол, фриктол; присадки к трансмиссионным маслам – INFINEUM T 4405, Хайтек 320, Хайтек 343; присадки к моторным маслам – Хайтек 8610, Хайтек 521F, Хайтек 8204, Хайтек 9250, Майкосойл-Депрессор, EMCARATE 1110, INFINEUM C 9353.

Указанные хроматографические условия можно использовать для исследования и стандартизации молекулярно-массового распределения компонентов присадок, представляющих собой смесь полимеров или олигомеров.

К таким присадкам можно отнести следующие: КНД, LZ-600, LZ-5705, LZ-859, LZ-6661, Д-157, С-150 и др. (рис. 2).



**Рисунок 2 – Хроматограмма экстракта присадки Д-157**

*Колонка 80×2, Сепарон С18. Элюент*

*«ацетонитрил-вода» в соотношении 80:20 по объему, расход элюента 150 мкл/мин.,  
длины волн 210, 230, 254, 280 нм*

### **Обнаружение присадок в отработанных и свежих моторных маслах**

Определение присадок в СМ – сложная и важная аналитическая задача. Особенно актуальной является проблема определения присадок в отработанных СМ, что позволяет оценить эффективность присадок при повышении потребительских свойств СМ.

Аналитическую пробу присадки вводят в хроматограф и получают хроматограмму при следующих условиях:

1. элюент: «ацетонитрил-вода» в соотношении 95:5 по объему;
2. элюент: «ацетонитрил-вода» в соотношении 80:20;
3. элюент: «ацетонитрил-вода» в соотношении 70:30.

Состав элюента выбирается в зависимости от вида СМ и условий получения хроматограммы присадки в банке данных.

4. Многоволновая детекция. Длины волн 210, 230, 254 и 280 нм; постоянная времени детектора 0,4 с;

5. объем пробы – 6 мкл;

6. расход элюента – 150 мкл/мин;

7. температура окружающей среды 20±2 °С;

8. хроматографические колонки 80×2, заполненные Сепароном С18 (5 мкм);

9. вода дистиллированная, ацетонитрил для хроматографии «0»-го, «1» или «2» сорта фирмы «Криохром» (г. Санкт-Петербург).

В указанных условиях получают хроматограмму аналитической пробы и сравнивают с хроматограммой присадки из банка данных. Сравнение происходит по временам удерживания и спектральным отношениям хроматографических пиков.

В случае сильного загрязнения масла для получения хроматограммы можно использовать ступенчатый градиентный режим элюирования с изменением содержания ацетонитрила от 55 до 85 % по объему [5].

На рисунках 3, 4 и 5 представлен пример обнаружения алкилсульфонатов кальция в свежем и отработанном моторном масле М-8Г.

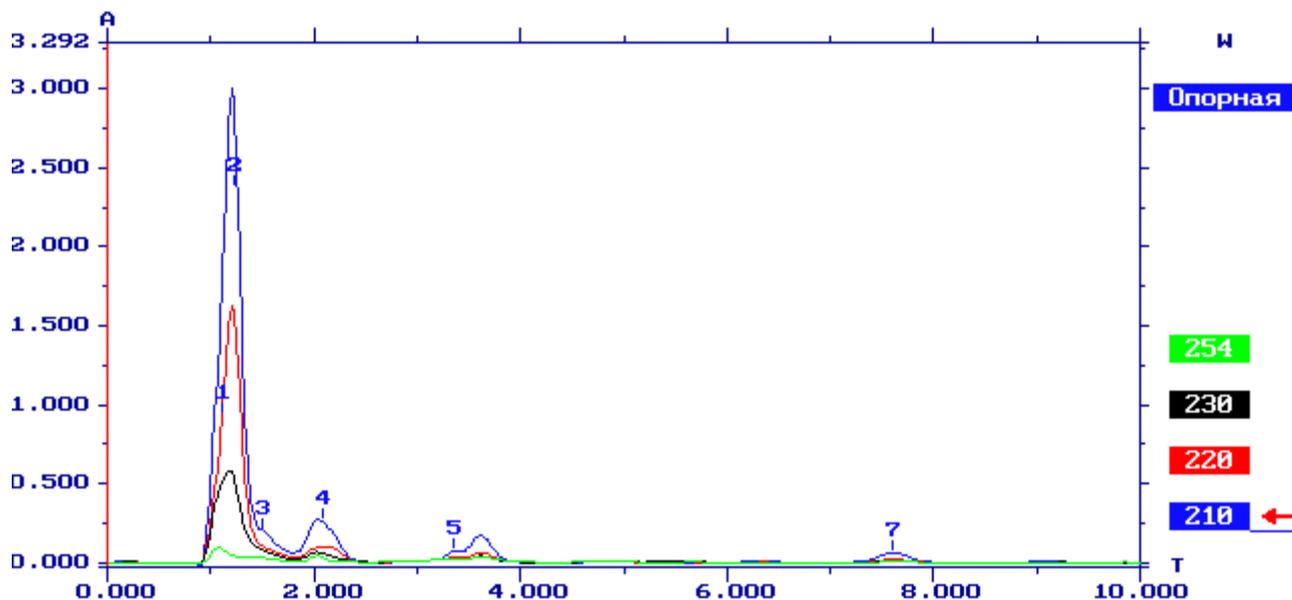


Рисунок 3 – Хроматограмма присадок в испытуемом масле М-8Г

Анализируется экстракт («ацетонитрил-вода» 80:20 по объему). Колонка 80×2 заполнена Сепароном С18. Элюент «ацетонитрил-вода» 80:20 по объему. 1, 2, 3 – алкил-сульфонаты кальция

Пики алкилсульфонатов достаточно близки, сходны и спектральные отношения. На рисунке 4 представлена хроматограмма присадок в свежем масле М-8Г.

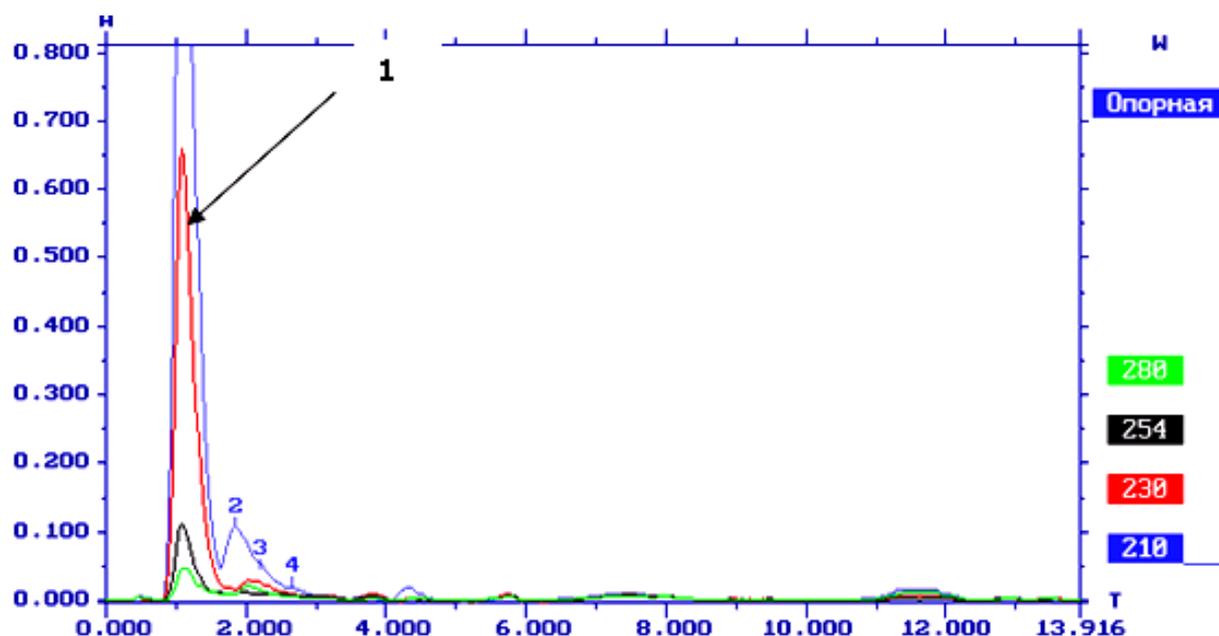
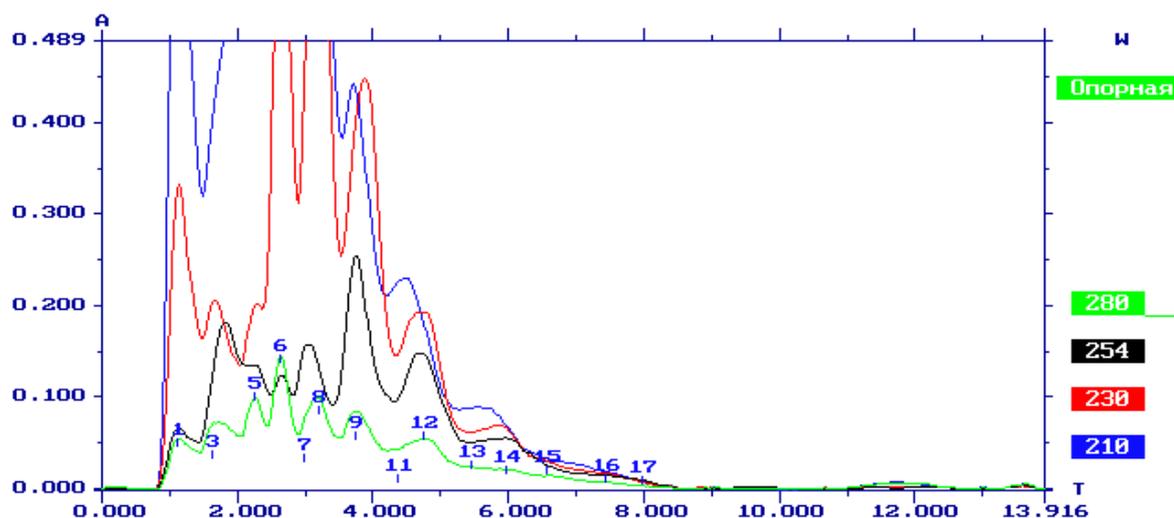


Рисунок 4 – Хроматограмма экстракта свежего масла М<sub>6</sub>14Г производства Рязанского НПЗ

Пик №1 – алкилсульфонат кальция на длине волны 230 нм

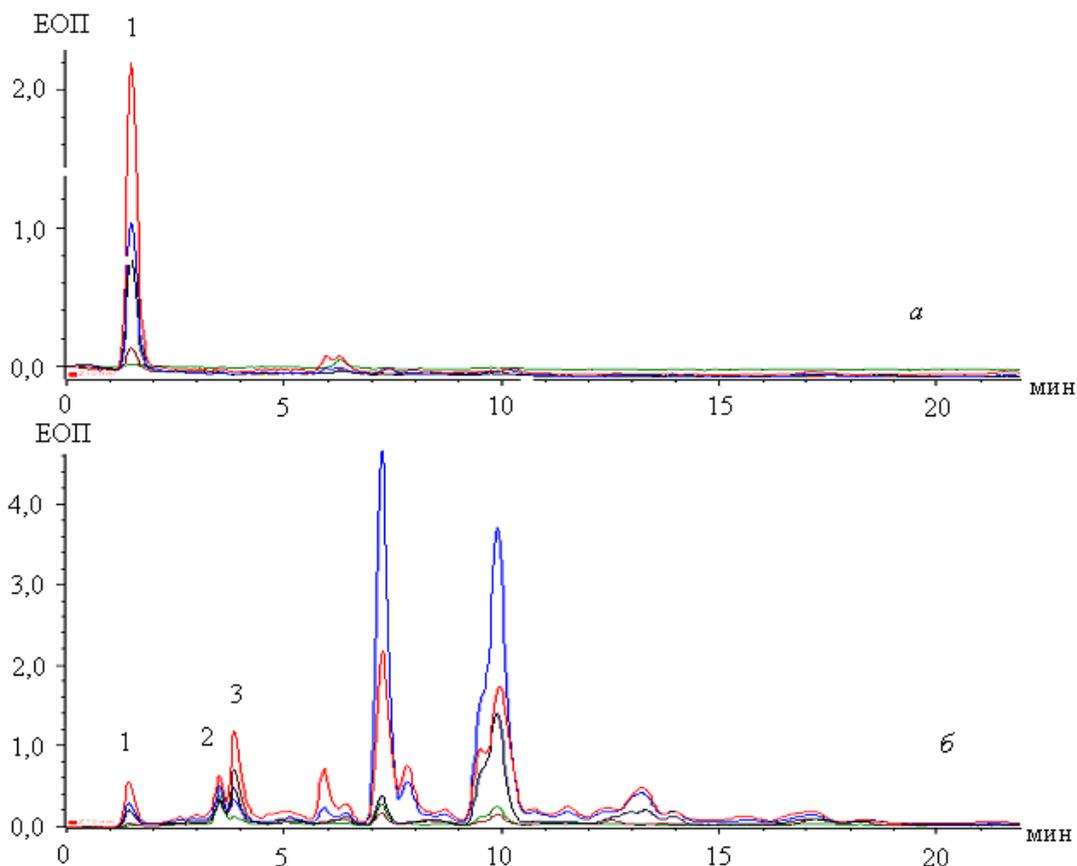
На рисунке 5 представлена хроматограмма присадок в отработанном масле М-8Г.



**Рисунок 5 – Хроматограмма экстракта отработанного масла (пробег 2000 км) M<sub>6</sub>14Г производства Рязанского НПЗ**  
 Пик № 1 – алкилсульфонат кальция на длине волны 230 нм,  
 2–17 – продукты окситермодеструкции

Обращает на себя количество разных продуктов окситермодеструкции, которые никак не могли получиться, исходя из одной, двух или даже трех кинетических схем ТОД.

На рисунке 6 приведена хроматограмма моторного масла, используемого в автомобиле «Баргузин»: а – пробег 0 км; б – пробег 274 км.



**Рисунок 6 – Хроматограммы водно-ацетонитрильных экстрактов моторного масла, используемого в автомобиле «Баргузин»**  
 а – пробег 0 км; б – пробег 274 км. 1 – добавка в моторном масле; 2, 3 – наиболее заметные кислородсодержащие соединения, получающиеся при деструкции добавки 1;  
 4, 5 – ароматические компоненты бензина, попавшего в моторное масло

Обращает на себя внимание неполное сгорание бензина в двигателе машины и исключительно плохое качество поршневых колец.

### **Выводы**

1. Предлагаемая для анализа хроматографическая система в режиме ОФ ВЭЖХ пригодна для обнаружения продуктов ТОД разнообразных присадок и может быть использована для исследования механизма ТОД в различных условиях.

2. Используемая для пробоподготовки экстракция хотя и несколько ухудшает количественную оценку продуктов ТОД, зато делает безопасным введение пробы в жидкостной хромато-масс-спектрометр.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сычев, С.Н. Методы совершенствования хроматографических систем и механизмы удерживания в ВЭЖХ / С.Н. Сычев. – Орел: ОрелГТУ, 2000. – 212 с.
2. Сычев, С.Н. Высокоэффективная жидкостная хроматография на микроколоночных жидкостных хроматографах серии «Милихром» / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина, К.С. Сычев. – Орел: ОрелГТУ, 2002. – 135 с.
3. Сычев, С.Н. Высокоэффективная жидкостная хроматография как метод определения фальсификации продукции / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина, Р.С. Музалевская. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 145 с.
4. Сычев, С.Н. Применение метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) для исследования смазочных материалов. Часть 1. Анализ базовых масел и кислородсодержащих соединений / С.Н. Сычев, К.В. Подмастерьев, В.А. Гаврилина, Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 6.

#### **Сычев Сергей Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел  
Доктор технических наук  
E-mail: chemistry@ostu.ru

#### **Гаврилина Вера Александровна**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: chemistry@ostu.ru

#### **Пузырев Станислав Григорьевич**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел  
Аспирант

#### **Подмастерьев Константин Валентинович**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail asms-orel@mail.ru

#### **Пахолкин Евгений Васильевич**

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: eugene-p@bk.ru Тел. (8486) 419892  
E-mail chemistry@ostu.ru

---

S.N. SYCHEV, V.A. GAVRILINA, S.E. PUZYREV,  
K.V. PODMASTER'EV, E.V. PAHOLKIN

## **APPLICATION BY HPLC TO INVESTIGATE THE LUBRICANT. PART 2. CHROMATOGRAPHIC CONDITION FOR ANALYSIS OF ADDITIVES AND PRODUCTS OF THERMAL AND OXIDATIVE DEGRADATION**

*Consider an Application of the method of high performance liquid chromatography (HPLC) for studies of additives for lubricants (SM) under normal conditions and under thermal and oxidative degradation. It is shown that the strict implementation of chromatographic conditions are in good quality chromatograms for a large number of additives representing different classes of organic compounds. The results are shown mainly by the example of the use of reversed-phase HPLC option.*

**Keywords:** *reversed-phase HPLC option, analysis, lubricants, additives, oxidation and thermal degradation.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Sychev, S.N. Metody sovershenstvovaniya hromatograficheskikh sistem i mehanizmy uderzhivaniya v VJeZhH / S.N. Sychev. – Orel: OrelGTU, 2000. – 212 s.
2. Sychev, S.N. Vysokojeffektivnaja zhidkostnaja hromatografija na mikrokolonochnyh zhidkostnyh hromatografah serii «Milihrom» / S.N. Sychev, V.A. Gavrilina, K.S. Sychev. – Orel: OrelGTU, 2002. – 135 s.
3. Sychev, S.N. Vysokojeffektivnaja zhidkostnaja hromatografija kak metod opredelenija fal'sifikacii produkcii / S.N. Sychev, V.A. Gavrilina, R.S. Muzalevskaja. – M.: DeLi print, 2005. – 145 s.
4. Sychev, S.N. Primenenie metoda vysokojeffektivnoj zhidkostnoj hromatografii (VJeZhH) dlja issledovaniya smazochnyh materialov. Chast' 1. Analiz bazovyh masel i kislorodsoderzhashhih soedinenij / S.N. Sychev, K.V. Podmaster'ev, V.A. Gavrilina, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 6.

### **Sychev Sergey Nikolaevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Doctor of Technical Sciences  
E-mail: chemistry@ostu.ru

### **Gavrilina Vera Aleksandrovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Ph.D, assistant of professor  
E-mail: chemistry@ostu.ru

### **Puzyrev Stanislav Grigorevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
The post-graduate student  
Tel. (8486) 419892  
E-mail chemistry@ostu.ru

### **Podmasteriev Konstantin Valentinovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
E-mail: asms-orel@mail.ru

### **Paholkin Eugene Vasilyevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Ph.D, assistant of professor  
E-mail: eugene-p@bk.ru

## ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН НА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ УЧАСТКАХ ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

*Статья посвящена исследованию влияния кривизны поверхности на результаты измерения электропотенциальным методом глубины поверхностных трещин. Рассмотрено влияние кривизны выпуклых участков металлических объектов при различной ориентации поверхностных трещин конечной длины. Установлена взаимосвязь между регистрируемыми сигналами и поверхностными трещинами разной глубины и длины в зоне галтельных переходов. На основании расчетов, проведенных методом конечных элементов, построены соответствующие градуировочные характеристики.*

**Ключевые слова:** электропотенциальный метод, поверхностная трещина, глубина трещины, сложнопрофильный участок, кривизна.

Электропотенциальный метод [1] основан на пропускании тока через контролируемый участок с помощью токовых электродов и регистрации напряжения между потенциальными электродами. Он успешно применяется для измерения глубины поверхностных трещин, выявленных каким-либо другим методом неразрушающего контроля, а также для получения информации о росте трещин в процессе механических испытаний [2-4].

О глубине трещины судят по относительному изменению напряжения при переходе от бездефектного (напряжение  $U_0$ ) к дефектному (напряжение  $U_r$ ) участку. При этом вычисляемая по результатам измерений величина  $U^* = (U_r - U_0)/U_0$  не зависит от удельной электрической проводимости металла. Для исключения влияния магнитной проницаемости металла необходимо проводить измерения на постоянном токе [5].

Вместе с тем, на величину  $U^*$ , помимо измеряемого параметра – глубины трещины  $h$ , влияет длина  $l$  трещины, толщина  $T$  контролируемого участка и кривизна поверхности [6-7].

В работе [8] аналитически решена задача интерпретации результатов измерения глубины трещин конечной длины, ортогональных к поверхности, в плоских пластинах электропотенциальным методом с использованием постоянного тока. Полученное решение используется в электропотенциальном измерителе глубины трещин «ЗОНД ИГТ-98» [11].

Однако возможная кривизна поверхности при интерпретации результатов измерения в разработанном алгоритме не учитываются. Вместе с тем глубину трещин необходимо измерять и на цилиндрических вогнутых и выпуклых поверхностях, например, на поверхностях труб, валов, галтельных переходов. В связи с этим вопрос измерения глубины трещин электропотенциальным методом с учетом кривизны поверхности весьма актуален.

Для определения влияния кривизны выпуклой поверхности при измерении глубины продольных трещин использовалась расчетная модель, приведенная на рисунке 1.

Расчеты проводились методом конечных элементов на основе программного пакета ANSYS. При расчетах межэлектродные расстояния электропотенциального преобразователя (ЭПП) принимались равными  $R_T = 20$  мм и  $R_P = 2$  мм, что соответствует параметрам ЭПП, используемого в «ЗОНД ИГТ-98» [6].

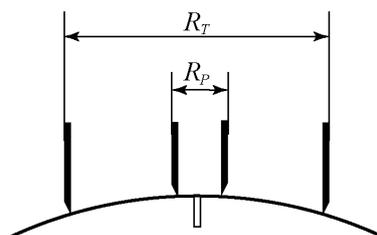


Рисунок 1 – Геометрическая расчетная модель для определения влияния кривизны выпуклой поверхности при продольной трещине

Соответствующие зависимости приведены на рисунке 2. Они показывают, что степень влияния кривизны для продольных трещин возрастает по мере увеличения их глубины и уменьшения длины. При этом влиянием кривизны на трещины глубиной менее 2 мм можно пренебречь.

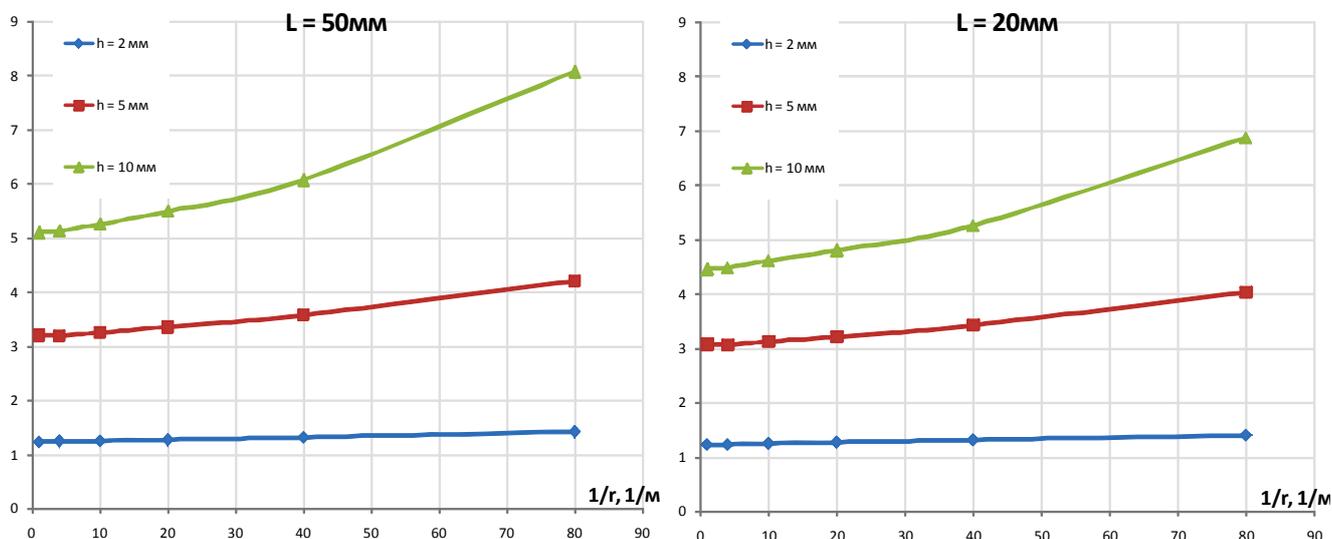


Рисунок 2 – Зависимость  $U^*$  от кривизны выпуклой поверхности для продольных трещин разной глубины и длины

Аналогичные исследования проводились для поперечных трещин (рис. 4) с формой в виде лунки (пропил) и типа углового сегмента.

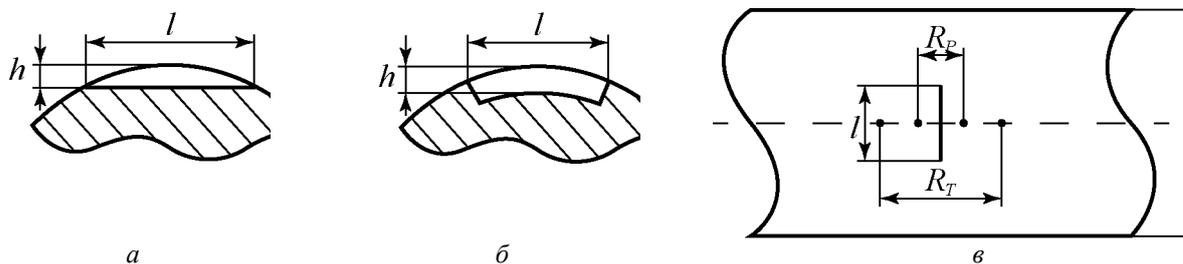


Рисунок 3 – Геометрические расчетные модели для определения влияния кривизны выпуклой поверхности при поперечной трещине  
а – типа пропила, б – типа угловой сегмент, в – вид сверху

Результаты расчета, приведенные на рисунке 4, показывают, что отмеченные для поперечной трещины закономерности сохраняются и здесь.

Наиболее часто возникает необходимость контроля объектов с выпуклой поверхностью типа валов. В тоже время подавляющее большинство объектов с вогнутой поверхностью – галтельные переходы.

Для анализа взаимодействия ЭПП с подобными объектами была разработана расчетная модель, представленная на рисунке 5.

Здесь для измерения используется специализированный ЭПП, обеспечивающий надежный контакт электродов с поверхностью металла.

На рисунке 6 приведены зависимости, показывающие, что с увеличением радиуса сопряжения  $r$  величина  $U^*$  монотонно растет. Здесь же показана предельная зависимость  $U^*(h)$  для плоской поверхности.

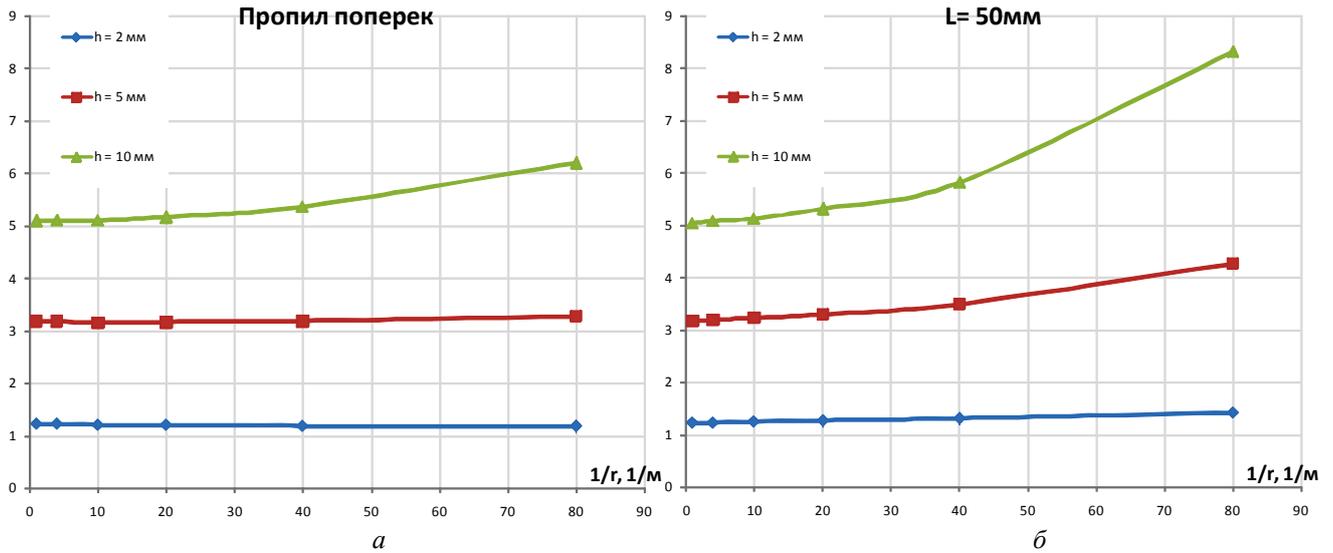


Рисунок 4 – Зависимости  $U^*$  от кривизны выпуклой поверхности для поперечных трещин разной глубины  
 а – типа пропила, б – типа углового сегмента

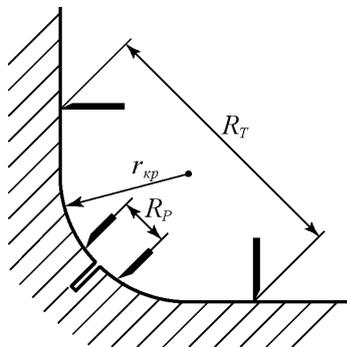


Рисунок 5 – Расчетная модель для определения влияния кривизны в галтельных переходах

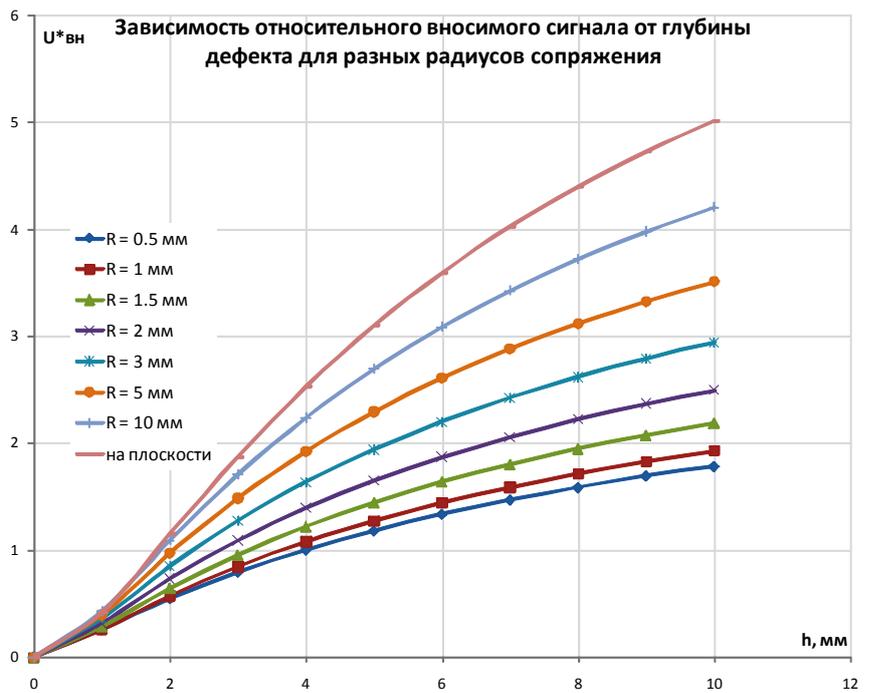


Рисунок 6 – Зависимости  $U^*$  от глубины трещины для различных радиусов сопряжения поверхностей при  $l = 100$  мм

На рисунке 7 показано влияние длины трещины при различных радиусах сопряжения и глубинах трещины. Они показывают, что степень влияния длины не зависит от кривизны поверхности. Это важно при построении алгоритмов коррекции результатов измерения.

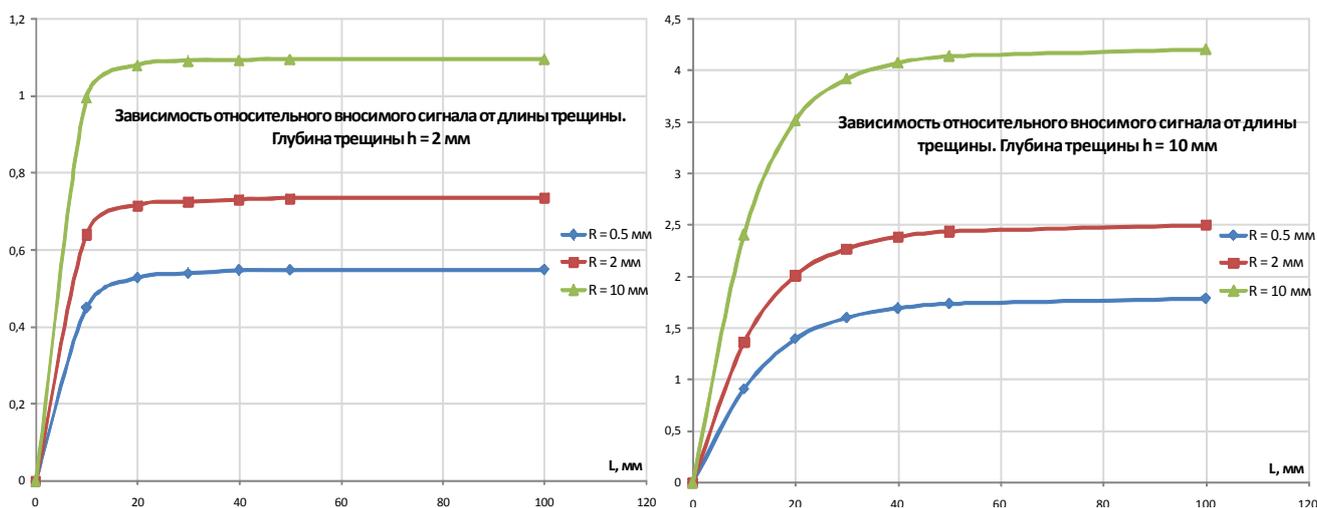


Рисунок 7 – Зависимости  $U^*$  от длины дефекта для различных радиусов сопряжения поверхностей для трещин глубиной 2 мм и 10 мм

Проведенный анализ позволил определить степень влияния ранее не учитываемой кривизны поверхности на регистрируемые сигналы при электропотенциальной дефектометрии. Полученные зависимости позволят построить соответствующие алгоритмы коррекции и обеспечить существенное снижение погрешности измерений. Это чрезвычайно важно, так как глубина трещин является одним из основных параметров, определяющих остаточный ресурс контролируемого объекта, его ремонтпригодность и определяет стратегию ремонта дефектных участков (зачистка, выборка, замена). Для определения степени кривизны поверхности разработан способ измерения, основанный на измерении отношения сигналов при двух взаимно ортогональных положениях ЭПП. Таким образом, не требуется дополнительных средств измерения для определения влияющей величины. На основе полученных результатов проводится модернизация электропотенциального измерителя глубины трещин «ЗОНД ИГТ – 98», которая позволит расширить его функциональные возможности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 томах. Т. 5. / Под ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 2: Электрический контроль / К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Кондорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужижкий. – М.: Машиностроение, 2004. – 697 с.
2. Makoto Akama, Masumi Saka. Nondestructive sizing of a 3D surface crack generated in a railway component using closely coupled probes for direct-current potential drop technique // Engineering Fracture Mechanics Volume 72, Issue 2, January 2005, Pages 319–334.
3. Hicks M.A. and Pickard A.C. A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical drop technique for crack length determination. International Journal of Fracture 1982; 20:91-101.
4. Cláudio R.A., Maia J., Dias Pereira J.M., Baptista R., Branco C.M. and Byrne J. Development of a DC potential drop system controlled by computer. 9th Portuguese Conference on Fracture - ESTSetúbal, Ed. by SPM (Portuguese Society of Materials) 2004.
5. Брайнин, Э.И. Контроль элементов электрических машин и аппаратов электропотенциальным методом / Э.И. Брайнин. – М.: Энергия. – 1980. – 80 с.
6. Шкатов П.Н. Исследование погрешности измерения глубины трещин электропотенциальным методом / П.Н. Шкатов // Тезисы докладов 14-ой российской НТК «Неразрушающий контроль и диагностика». – М. – 1996.
7. Shkatov P.N. Increased preciseness of deep defects defecting through electropotential method // 7<sup>th</sup> European Conference on NDT. – Copenhagen. – 1998.
8. Шкатов, П.Н. Решение обратной задачи электропотенциальной дефектометрии для поверхностной трещины конечной длины / П.Н. Шкатов // Тезисы докладов 3-ей международной НТК «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике». – М. – 2002.
9. Шкатов, П.Н. Компьютеризированный измеритель глубины трещин «ЗОНД ИГТ-98» / П.Н. Шкатов // Контроль. Диагностика. – № 2. – 1988.

**Шкатов Петр Николаевич**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва  
Доктор технических наук, профессор, директор НУЦ «КАСКАД» МГУПИ  
E-mail: petr\_shkatov@mail.ru

**Елисов Алексей Алексеевич**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва  
Аспирант  
E-mail: tenzor-expert@mail.ru

P.N. SHKATOV, A.A. ELISOV

**MEASURING THE DEPTH OF SURFACE CRACKS ON THE  
FIGURINE PLOTS BY ELECTROPOTENTIAL METHOD**

*The article is devoted to the investigation of the influence of the curvature of the surface on the results of the measurement of electric potential method of depth of surface cracks. The influence of the curvature of a convex areas metal objects with different orientation of surface cracks finite length. The interrelation between the logged signals and surface cracks of different depths and lengths in the zone of fillet transitions. On the basis of calculations made by the method of finite elements, constructed the corresponding graduation characteristics.*

**Keywords:** *electric potential method, surface crack, crack depth, complex-profile area, the curvature.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik v 8 tomah. T. 5. / Pod red. V.V. Kljueva. T. 5: V 2 kn. Kn. 2: Jelektricheskij kontrol' / K.V. Podmaster'ev, F.R. Sosnin, S.F. Kondorf, T.I. Nogacheva, E.V. Paholkin, L.A. Bondareva, V.F. Muzhickij. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 697 s.
2. Makoto Akama, Masumi Saka. Nondestructive sizing of a 3D surface crack generated in a railway component using closely coupled probes for direct-current potential drop technique // Engineering Fracture Mechanics Volume 72, Issue 2, January 2005, Pages 319–334.
3. Hicks M.A. and Pickard A.C. A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical drop technique for crack length determination. International Journal of Fracture 1982; 20:91-101.
4. Cláudio R.A., Maia J., Dias Pereira J.M., Baptista R., Branco C.M. and Byrne J. Development of a DC potential drop system controlled by computer. 9th Portuguese Conference on Fracture - ESTSetúbal, Ed. by SPM (Portuguese Society of Materials) 2004.
5. Brajnin, Je.I. Kontrol' jelementov jelektricheskikh mashin i apparatov jelektropotencial'nyh metodom / Je.I. Brajnin. – M.: Jenergija. – 1980. – 80 s.
6. Shkatov P.N. Issledovanie pogreshnosti izmerenija glubiny treshhin jelektropotencial'nyh metodom / P.N. Shkatov // Tezisy dokladov 14-oj rossijskoj NTK «Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika». – M. – 1996.
7. Shkatov P.N. Increased preciseness of deep defects defecting through electropotential method // 7th European Conference on NDT. – Copenhagen. – 1998.
8. Shkatov, P.N. Reshenie obratnoj zadachi jelektropotencial'noj defektometrii dlja poverhnostnoj treshhiny konechnoj dliny / P.N. Shkatov // Tezisy dokladov 3-ej mezhdunarodnoj NTK «Komp'juternye metody i obratnye zadachi v nerazrushajushhem kontrole i diagnostike». – M. – 2002.
9. Shkatov, P.N. Komp'juterizirovannyj izmeritel' glubiny treshhin «ZOND IGT-98» / P.N. Shkatov // Kontrol'. Diagnostika. – № 2. – 1988.

**Shkatov Petr Nikolaevich**

The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow  
Doctor of technical science, professor, director of the NCA "CASCADE"  
E-mail: petr\_shkatov@mail.ru

**Elisov Alexey Alexeevich**

The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow  
The post-graduate student  
E-mail: tenzor-expert@mail.ru

УДК 621.3

Д.Е. ГОРОХОВ, С.В. ГРЕБЕНЕВ, В.Б. ИВКИН, В.Ю. СЕРГЕЕНКОВ

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СЕТИ СВЯЗИ

*В статье предложен подход к моделированию ситуаций, возникающих в процессе функционирования сети документальной связи под воздействием различных дестабилизирующих факторов. Предлагаемая модель основана на описании состояния сети в дискретном пространстве тенденций изменения значений параметров, входящих в состав информационного поля контроля. Использование данной модели позволит выявить дестабилизирующие воздействия, которые могут привести к снижению качества предоставляемых услуг, и прогнозировать дальнейшее развитие ситуации.*

**Ключевые слова:** сеть, воздействие, признаки, изменение, тенденции, оценка.

Сети связи представляют собой распределенные, сложные организационно-технические структуры. Они составляют базу для управленческой инфраструктуры региона (местности, производственного комплекса), от их состояния и качества функционирования зависит не только существующий уровень экономического развития, но и возможности его дальнейшего роста. Простое поддержание таких сетей в рабочем состоянии предполагает постоянное внимание и сопряжено с несимволическими затратами (как материальными, так, например и человеческими ресурсами). Сеть связи представляет собой многоуровневую иерархическую структуру, включающую в себя множество узлов, связанных между собой определенным образом. Проектирование новых сетей и развитие уже существующих связано с проблематикой принятия решений по использованию имеющихся сетевых ресурсов: управлению потоками, распределению ресурсов между узлами. Перечисленные проблемы тесно связаны с задачей контроля состояния сети. В комплекс мероприятий по контролю входит анализ процессов информационного обмена, выявления изменений в процессе функционирования сети, вскрытие вызвавших их событий и прогнозирование возможных тенденций развития ситуации.

На процесс информационного обмена оказывают влияние внутренние и внешние дестабилизирующие факторы. Наиболее распространенными источниками внутренних дестабилизирующих факторов являются: качество электрических контактов; старение электрорадиоэлементов (изменение со временем их характеристик); нарушение электромагнитной совместимости (нарушение экранирования, заземлений, фильтрации) и вследствие этого, ухудшение устойчивости оборудования к воздействию электромагнитных помех; перебои в электроснабжении.

Под внешними дестабилизирующими факторами (ВДФ) по отношению к сети доступа понимаются такие факторы, источники которых расположены вне сети. В зависимости от характера воздействия на элементы сети ВДФ делятся на классы: механические (сейсмический удар, ударная волна взрыва, баллистический удар); электромагнитные (низкочастотное излучение, высокочастотное излучение, сверхвысокочастотное излучение, электромагнитный импульс); ионизирующие (альфа-излучение, бета-излучение, гамма-излучение, нейтронное излучение); термические (световое излучение взрыва).

Источники ВДФ по признаку отношения и природе возникновения разделяют на субъективные (искусственные) и объективные (естественные). К объективным источникам ВДФ относятся: землетрясение, разряд молнии, радиоактивное заражение местности вследствие техногенных катастроф, линия электропередачи в аварийном режиме, контактная сеть железных дорог, радиолокационные станции, радиопередающие станции. К субъективным относятся неправильные действия персонала, эксплуатация элементов сети в нештатных режимах, различные виды атак на сетевые элементы и программное обеспечение.

Применение системы мониторинга с реализованными в ней алгоритмами обработки и анализа получаемых данных позволяет выделить основные характеристические параметры

$X = \{x_i\}_{i=1}^N$  (величина интенсивности входящего (исходящего) трафика; количество пакетов, адрес отправителя и получателя; количество запросов на установление соединения и разъединения; использование ресурсов маршрутизатора и т. д.), прямо или косвенно характеризующие события в сети на данный момент времени. Оценка интенсивности изменения значенных параметров позволит реализовать прогнозирование развития ситуации, с целью оперативного реагирования на негативные изменения и восстановления функционирования сети связи с требуемыми характеристиками.

Основой построения аналитической модели является информационное поле контроля (ИПК). ИПК более общая по отношению к понятию множества признаков категория и включает непосредственно множество признаков  $X$ , на котором заданы определенные операции и отношения (упорядочения, взаимосвязи), используемые при решении задач контроля состояния сети связи.

Формирование признакового пространства основывается на оценке значимости признаков развития тех или иных событий по показателям: информативность, устойчивость и степень их взаимозависимости.

I. Для формирования набора признаков, изменение которых адекватно отражает события протекающие в сети, необходимо оценить зависимость между параметрами информационных потоков и дестабилизирующими воздействиями.

1. Для каждого  $x_i \in X'$ , имеющего статистический характер изменения, с помощью экспертов, а также с учетом статистических данных определяется период оценки значений  $\tau$ . Период оценки значений параметра не должен превышать полупериода развития события, в ходе которого он проявляется. Для  $x_i$ , имеющих разовый характер проявления, данный интервал не учитывается и считается, что в нормальном состоянии системы данные признаки не проявляются. В соответствии с  $\tau$  фиксируются значения параметров  $x_i$ , характеризующих информационные потоки в системе связи в ходе ее нормального режима функционирования.

В связи с разнородностью признакового пространства, для формализованного анализа необходима нормализация значений параметров [3]. На основе расчетов заполняется массив  $\tilde{X} = \{\tilde{x}_i\}_{i=1}^{N'}$ , где  $\tilde{x}_i$  – нормированные значения параметров  $x_i$ ,  $N'$  – количество оцениваемых параметров. Далее во всех расчетах применяются нормированные значения параметров  $x_i$ .

2. Для всех количественных  $x_i$  определяются выборочное среднее  $M_{\tilde{X}} = \{m_i\}_{i=1}^{N'}$  и выборочная дисперсия  $\theta_{\tilde{X}} = \{\sigma_i\}_{i=1}^{N'} [1, 2]$ .

3. Вычисляются  $\delta_i^{\max}$  и  $\delta_i^{\min}$  – пороговые величины отклонений нормированного значения параметра  $x_i$  от среднестатистического и заполняются массивы данных  $\Theta_{\tilde{X}}^{\max} = \{\delta_i^{\max}\}_{i=1}^{N'}$  и  $\Theta_{\tilde{X}}^{\min} = \{\delta_i^{\min}\}_{i=1}^{N'}$  [3, 6]. Получаем  $(\delta_i^{\max}, \delta_i^{\min})$  – интервал, к которому принадлежат возможные нормированные значения  $x_i$  в отсутствии дестабилизирующих воздействий.

4. Для каждого нормированного значения  $x_i$  формируются массивы выборочного среднего  $M_{\tilde{X},l} = \{m_{i,l}\}_{i=1}^{N'}$  и выборочной дисперсии  $\theta_{\tilde{X},l} = \{\sigma_{i,l}\}_{i=1}^{N'}$ , характеризующие пределы значений  $x_i$  в ходе развития различных событий  $l = (\overline{1, K})$ .

5. Определяются параметры, значения которых меняются в связи с дестабилизирующими воздействиями на систему, и формируется набор признаков в соответствии с условием:

$$\delta_i^{\min} \geq m_{i,l} \geq \delta_i^{\max}. \quad (1)$$



Рисунок 1 – Значения параметра  $x_i$  в ходе развития  $l$ -го и  $s$ -го событий

6. По результатам анализа для каждого события  $c_l$  из множества  $C$  строится вектор признаков  $X_l^{\Pi} = \{x_{i,l}^{\Pi}\}_{i=1}^{N'}$ , принимающих значения  $x_{i,l}^{\Pi} = (0,1)$ . Признаку  $x_{i,l}^{\Pi}$  присваивается значение "1", если условие (1) выполняется и  $x_{i,l}^{\Pi} = 0$ , если (1) не выполняется.

7. Формируется матрица кодов событий  $C_{X^{\Pi}} = \left| x_{i,l}^{\Pi} \right|_{N \times K}$ . Количество ее строк равно числу событий  $K$ , количество столбцов – количеству наблюдаемых параметров  $N'$ . Каждая строка матрицы  $C_{X^{\Pi}}$  представляет собой вектор  $X_l^{\Pi} = \{x_{i,l}^{\Pi}\}_{i=1}^{N'}$  и является кодом, единичные значения разрядов которого качественно характеризуют наличие изменений в значениях параметров в ходе развития тех или иных событий под воздействием дестабилизирующих факторов.

II. Для исключения из набора  $X_l^{\Pi}$  нерельефных признаков, необходимо рассчитать информативность и устойчивость каждого из них.

1. Оценивается информативность признаков  $x_i$  для каждого  $l$ -го события:

$$I_{i,l} = \begin{cases} 0, & \text{при } \sum_{l=1}^K x_{i,l}^{\Pi} = 0, \text{ или } \sum_{l=1}^K x_{i,l}^{\Pi} = K \\ \frac{1}{\sum_{l=1}^K x_{i,l}^{\Pi}}, & \text{при } 0 < \sum_{l=1}^K x_{i,l}^{\Pi} < K \end{cases}, \quad (2)$$

где  $K$  – количество анализируемых событий.

По результатам вычислений (2) проводится анализ наличия для каждого  $c_l$  индивидуального признака, для которого  $I_{i,l} = 1$ . Из индивидуальных признаков формируется массив  $X_{id} = \left| x_{id} \right|_{N' \times K}$ , где  $x_{id}$  – некоторый индивидуальный признак развития  $l$ -го события.

Параметры  $x_{i,l}^{\Pi}$  для которых  $I_{i,l} = 0$  или  $I_{i,l} = 1/K$  исключаются из  $X$ .

2. Для каждого  $x_i$  определяется нормированное расстояние между событиями [2, 4]:

$$\Delta m_{i,l,s} = \frac{|m_{i,s} - m_{i,l}|}{\max(\tilde{x}_{i,s}) - \min(\tilde{x}_{i,l})}, \quad (3)$$

где  $\Delta m_{i,l,s}$  – нормированное расстояние между  $l$ -м и  $s$ -м событиями по  $i$ -му признаку;  $\tilde{x}_{i,l}$ ,  $\tilde{x}_{i,s}$  – нормированное значение  $i$ -го признака, при  $l$ -м и  $s$ -м событиях.

3. Рассчитывается усредненный показатель информативности  $i$ -го признака [2, 4]:

$$I_i^a = \frac{2}{k(k-1)} \cdot \sum_{l=1}^{k-1} \left( \sum_{s=l+1}^k \Delta m_{i,l,s} \right), \quad (4)$$

где  $k$  – количество объектов, представленных для распознавания в выборке. Формируется массив  $I_X^a$ , содержащий значения информативности каждого признака.

4. Для оценки устойчивости проявления признаков формируется выборка нескольких реализаций однотипных событий.

5. Рассчитывается устойчивость проявления признака:

$$P_{i,l} = \frac{\sum_{j=1}^J x_{i,l,j}^{\text{л}}}{J}, \quad (5)$$

где  $P_{i,l}$  – вероятность проявления  $i$ -го признака при  $l$ -м событии;  $x_{i,l,j}^{\text{л}}$  – логическое значение  $i$ -го признака в  $j$ -ой реализации  $l$ -го события. Для каждого события формируется массив  $P_l = \{P_{i,l}\}_{i=1}^{N'}$ .

6. По результатам расчета информативности и устойчивости элементов ИПК из  $X' = \{x_i\}_{i=1}^{N'}$  формируется вектор  $X = \{x_i\}_{i=1}^N$  и группа векторов  $X_l^{\text{л}} = \{x_{i,l}^{\text{л}}\}_{i=1}^N$ , при  $N \leq N'$ .

$$x_i \in \{X\}, \text{ при } P_{i,l} \geq P_{\text{тр}}, I_i^a \geq I_{\text{тр}}. \quad (6)$$

III. Оценка интегративных свойств параметров ИПК на основе расчета коэффициента парной корреляции.

$$r_{i,g,l} = \frac{\sum_{m=1}^M (\tilde{x}_{i,l,m} - m_{i,l}) \cdot (\tilde{x}_{g,l,m} - m_{g,l})}{M \cdot \sigma_{i,l} \cdot \sigma_{g,l}}, \quad (7)$$

где  $r_{i,g,l}$  – коэффициент корреляции  $i$ -го и  $g$ -го признаков при  $l$ -м событии;  $\tilde{x}_{i,l,m}$ ,  $\tilde{x}_{g,l,m}$  – значения  $i$ -го и  $g$ -го признаков, проявившихся при  $l$ -м событии в  $m$ -й реализации;  $m_{i,l}$ ,  $m_{g,l}$  – средние значения  $i$ -го и  $g$ -го признаков, проявившихся при  $l$ -м событии;  $\sigma_{i,l}$ ,  $\sigma_{g,l}$  – среднеквадратические отклонения параметров  $i$ -го и  $g$ -го признаков при  $l$ -м событии.

Строится корреляционная матрица признаков  $R_l = \left| r_{i,j}^{(l)} \right|_{N \times N}$  для каждого из событий  $c_l$ .

В случае, если зависимость выявлена, в ИПК включаются дополнительные признаки, выступающие в форме пара- или полипризнака.

IV. В комплексной аналитической модели состояния сети связи под воздействием дестабилизирующих факторов необходимо учитывать не только значения параметров информационных потоков, но и характер их изменения, что является главной отличительной особенностью предлагаемой модели. В соответствии с этим, ситуация, характеризующая состояние сети, представляется в дискретном пространстве тенденций изменения значений признаков, что дает возможность описать процесс воздействия дестабилизирующих факторов в динамике. Данный подход позволит создавать базу знаний о реакциях состава информационного потока на внутренние и внешние дестабилизирующие воздействия.

1. Определим направление приращений значений признаков в сторону отклонения от среднего – как инкрементное отклонение  $T_{i^+}$ , и наоборот – в сторону возвращения – декрементное  $T_{i^-}$ , а  $T_{i^0}$  – отсутствие изменений.

2. Обозначим множество возможных тенденций  $T = \{tnd_i\}_{i=1}^N$  и осуществим кодирование полного множества событий  $C = \{c_l\}_{l=1}^K$  в пространстве тенденций изменения значений параметров ИПК.

Значения  $x_i$  записываются в массив  $X(t) = \left| x_{i,j} \right|_{N \times M}$ , где  $j = (\overline{1, M})$  – номер измерения значений параметра с интервалом между  $j$  и  $j-1$  измерениями, равным  $\tau$ .

3. Вычисляются девиации значений признаков:

$$T_i = \begin{cases} tnd_i = T_{i^+} & \text{если } \left| \tilde{x}_{i,j} - m_i \right| > \left| \tilde{x}_{i,j-1} - m_i \right| \\ tnd_i = T_{i^-} & \text{если } \left| \tilde{x}_{i,j} - m_i \right| < \left| \tilde{x}_{i,j-1} - m_i \right| \\ tnd_i = T_{i^n} & \text{если } \left| \tilde{x}_{i,j} - m_i \right| = \left| \tilde{x}_{i,j-1} - m_i \right| \end{cases}, \quad (8)$$

где  $tnd_i$  – параметр, характеризующий направление изменения признака;  $m_i$  – среднее значение признака, рассчитанное на этапе оценки характеристик ИПК.

4. Для дополнения описания событий вводится количественный показатель – оценка интенсивности тенденции  $V = \{v_i^j\}_{i=1}^N$ :

$$v_i^j = \frac{\left| \Delta \tilde{x}_{i,j} \right|}{\left| \Delta \tilde{x}_{i,j-1} \right|}. \quad (9)$$

где  $\left| \Delta \tilde{x}_{i,j} \right|$ ,  $\left| \Delta \tilde{x}_{i,j-1} \right|$  – разница между текущим и предыдущим нормированными значениями признака  $x_i$  при  $j$  и  $j-1$  измерениями.

5. На основе вычислений формируется девиационная модель развития ситуации.

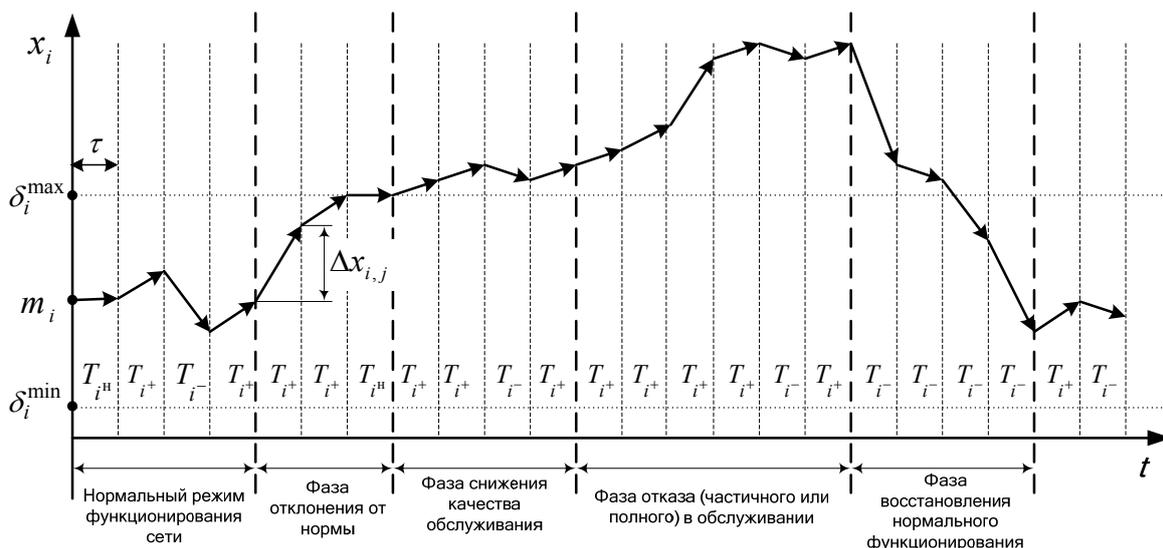


Рисунок 2 – Графическое представление фрагмента девиационной модели

По результатам вычислений, модель ИПК можно представить в виде дескрипторов:

$$DS_X = \langle \{X\}, \{\tilde{X}\}, \{M_{\tilde{X}}\}, \{\theta_{\tilde{X}}\}, \{\Theta_{\tilde{X}}^{\max}\}, \{\Theta_{\tilde{X}}^{\min}\}, \{I_X^a\}, \{\tau_X\} \rangle, \quad (10)$$

$$DS_{X_C} = \left\{ DS_{X_l} \right\}_{l=1}^K, \quad (11)$$

$$DS_{X_l} = \langle \{X_l^n\}, \{\tilde{X}_l\}, \{M_{\tilde{X}_l}\}, \{\theta_{\tilde{X}_l}\}, \{X_{id,l}\}, \{P_l\}, \{R_l\}, \{T\}, \{V\} \rangle. \quad (12)$$

С помощью предлагаемого подхода к описанию ИПК обеспечивается возможность реализации алгоритмов обработки разнородных данных в автоматизированной информационно-аналитической системе, ядром которой является база знаний, содержащая модель информационного поля контроля состояния сети связи. Построение соответствующей модели ИПК базы знаний позволит в автоматизированном режиме накапливать опыт оценки состояния сети и формировать на его основе выводы о возможном развитии ситуации, с целью принятия адекватных решений по управлению ресурсами сети связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.: ил.
2. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика / Н.Ш. Кремер. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 551 с.
3. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Юсупова Р. М. – Л.: МО, 1984. – 563 с.
4. Фомин, Я.А. Статистическая теория распознавания образов / Я.А. Фомин, Г.Р. Тарловский. – М.: Радио и связь, 1986. – 263 с.

**Горохов Денис Евгеньевич**

в/ч 93872, Орел  
сотрудник, кандидат технических наук  
Тел. (4862) 49-81-98  
E-mail: gde@inbox.ru

**Гребенев Сергей Васильевич**

в/ч 93872, Орел  
сотрудник, кандидат технических наук  
Тел. (4862) 49-81-98  
E-mail: gde@inbox.ru

**Ивкин Владимир Борисович**

в/ч 93872, Орел  
сотрудник, кандидат технических наук  
Тел. (4862) 49-81-98  
E-mail: gde@inbox.ru

**Сергеенков Виктор Юрьевич**

в/ч 93872, Орел  
сотрудник, кандидат технических наук  
Тел. (4862) 49-81-98  
E-mail: gde@inbox.ru

---

D.E. GOROKHOV, S.V. GREBENEV, V.B. IVKIN, V.Y. SERGEENKOV

**ANALYTICAL MODEL OF THE COMMUNICATION NETWORK  
CONDITION CONTROL INFORMATION FIELD**

*In article the approach to modeling the situations arising during functioning of a documentary communication network under influence of various destabilizing factors is offered. The offered model is based on the description of a network condition in discrete space of tendencies of the parameters values change which are a part of an information field of the control. Use of the given model will allow to reveal destabilizing influences which can lead to decrease in quality of given services and to predict the further development of a situation.*

**Keywords:** network, influence, attributes, change, tendencies, estimation.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Ventcel'. E.S. Teorija verojatnostej i ee inzhenernye prilozhenija: ucheb. posobie dlja vuzov / E.S. Ventcel', L.A. Ovcharov. – 2-e izd., ster. – М.: Vyssh. shk., 2000. – 480 s.: il.
2. Kremer, N.Sh. Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika / N.Sh. Kremer. – 3-e izd., pererab. i dop. – М.: JuNITI-DANA, 2007. – 551 s.
3. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov nabljudenij / Pod red. Jusupova R. M. – L.: MO, 1984. – 563 s.
4. Fomin, Ja.A. Statisticheskaja teorija raspoznavanija obrazov / Ja.A. Fomin, G.R. Tarlovskij. – М.: Ra-dio i svjaz', 1986. – 263 s.

**Grebenev Sergey Vasilevich**

m/u 93872

employee, Candidate of technical Sciences, associate Professor

tel. (4862) 49-81-98

E-mail: gde@inbox.ru

**Sergeenkov Viktor Yurevich**

m/u 93872

employee, Candidate of technical Science

tel. (4862) 49-81-98

E-mail: gde@inbox.ru

**Ivkin Vladimir Borisovich**

m/u 93872

employee, Candidate of technical Science

tel. (4862) 49-81-98

E-mail: gde@inbox.ru

**Gorokhov Denis Evgenevich**

m/u 93872

employee, Candidate of technical Sciences

tel. (4862) 49-81-98

E-mail: gde@inbox.ru

УДК 620.179.1.082.7

В.Н. ЧЕРНЫШОВ, В.В. МИШИН, М.В. МАЙОРОВ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДШИПНИКА В РЕЖИМЕ СУХОГО ТРЕНИЯ

*В работе приведены результаты экспериментального исследования динамики электрического сопротивления подшипника качения, отражающей состояние рабочих поверхностей трибосопряжения при отсутствии смазочного материала.*

*Ключевые слова:* подшипник качения, электрическое сопротивление трибосопряжения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Подшипники качения являются широко распространенными элементами механических систем и часто определяют их эксплуатационные показатели, в частности, показатели надежности. Поэтому при изготовлении, эксплуатации и ремонте ответственных механизмов и машин необходимо осуществлять диагностирование входящих в их состав подшипников.

Среди перспективных методов диагностирования трибосопряжений все более широкое применение находят методы, основанные на флуктуации активного электрического сопротивления. Информация о состоянии объекта при этом поступает непосредственно из зон трения в форме электрического сигнала. Данные методы являются относительно простыми в реализации, безопасными и практически безынерционными по отношению к трибологическим процессам.

При реализации электрических методов подшипник представляет собой множество параллельно включенных сопротивлений трибосопряжений «кольцо – тело качения – кольцо». Так же тела качения могут быть соединены в дополнительные цепи через сепаратор, однако для большинства случаев вероятность протекания значительного тока по цепям контакта «тело качения – сепаратор» мала, т.к. эти контакты являются слабонагруженными.

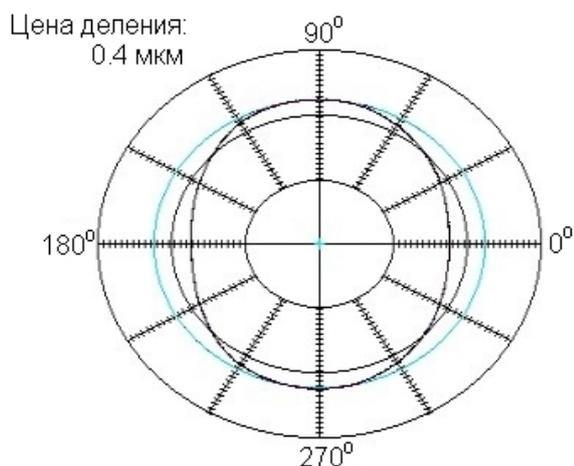
Сопротивление отдельного трибосопряжения в режиме сухого трения (т.е. тела качения и кольца разделяются только третьим телом, состоящим в основном из оксидных пленок и элементов поверхностного слоя) определяется как сумма сопротивлений стягивания, металлического слоя, окисных пленок и прочих элементов поверхностного слоя. Флуктуация сопротивления подшипника определяется структурой граничного и поверхностного слоев элементов трибосопряжений в контактах деталей подшипника, параметрами субмикро-, микро- и макрогеометрии деталей подшипника, силовым режимом работы каждого трибосопряжения, фактическим износом поверхностей трения, локальными неоднородностями, дефектами поверхностей трения и прочими факторами, в конечном итоге формирующими фактическую долговечность подшипника [1].

Задача данного исследования состоит в определении характерных свойств сигнала электрического сопротивления подшипника качения, работающего без смазочного материала для оценки возможности диагностирования качества подшипников с учетом микро- и макрогеометрии рабочих поверхностей.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ

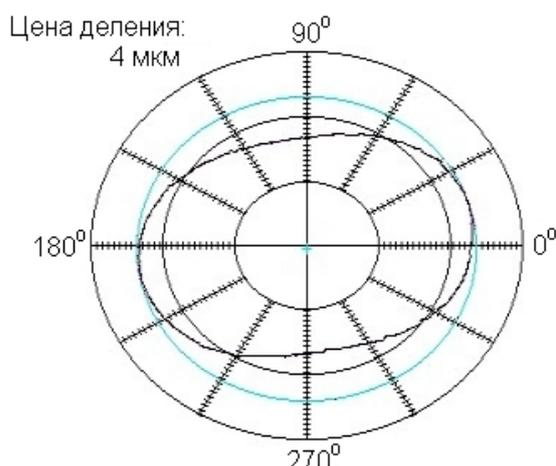
Все исследования проводились в лабораторных помещениях при нормальных климатических условиях на стенде для приработки подшипников качения, разработанным совместно ООО «НПП «Астрон Электроника» и ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК». Объектами исследования являлись подшипники типа 1000900, с разной макрогеометрией внутренних дорожек качения (рис. 1), предварительно промытые в гексане и высушенные в течение 20 минут.

Измерение сигнала сопротивления осуществлялось при радиальной грузке 20 Н и частоте вращения внутреннего кольца 300 мин<sup>-1</sup>. Временные зависимости сопротивления, в качестве примера, приведены на рисунке 2. В начальный период времени сопротивление обоих подшипников лежит в диапазоне от 15 до 720 Ом (рис. 2, а, в). Сигнал сопротивления подшипника с макроотклонением 2,48 мкм (рис. 2, а) имеет ярко выраженную огибающую с частотой колебания равной частоте вращения кольца. В тоже время при макроотклонении 37,91 мкм (рис. 2, в), сигнал менее стабилен и огибающая принимает более сложный вид.



Амплитуда эксцентриситета, мкм: 1,23  
Фаза эксцентриситета, град: 152,86  
Отклонение от округлости, мкм: 2,48

а



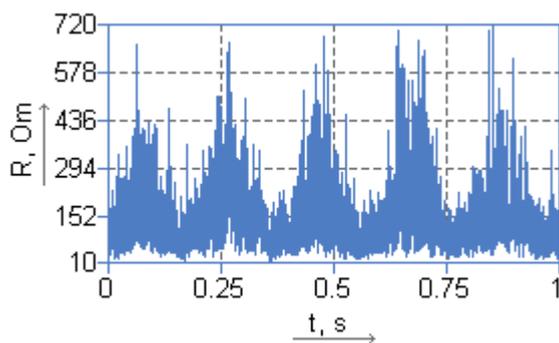
Амплитуда эксцентриситета, мкм: 28,44  
Фаза эксцентриситета, град: 242,21  
Отклонение от округлости, мкм: 37,91

б

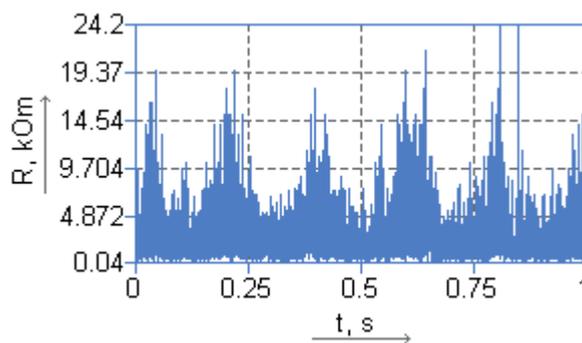
**Рисунок 1 – Круглограммы исследуемых подшипников**

а – подшипник № 1; б – подшипник № 2

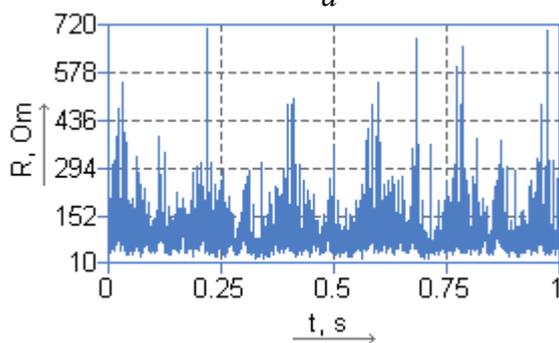
На начальном этапе работы среднее значение и среднеквадратическое отклонение сопротивления экспериментального подшипника с условным номером 1, соответственно, равны 130 Ом и 97 Ом (рис. 3, а). Наличие макроотклонения дорожек качения приводит к тому, что трибосопряжения «кольцо – тело качения – кольцо» подшипника работают в среднем при больших давлениях, чем при практическом отсутствии макроотклонения. Данное утверждение находит свое отражение в законе распределения сигнала сопротивления подшипника № 2 (рис. 3, в), который смещен по отношению к распределению сопротивления подшипника № 1 в более низкоомную часть диапазона значений в виду большего отклонения от округлости внутренней дорожки качения (рис. 1). Среднее значение и среднеквадратическое отклонение подшипника № 2 составили 86 Ом и 53 Ом.



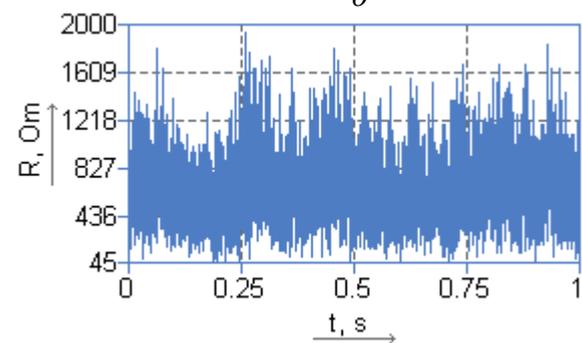
а



б



в

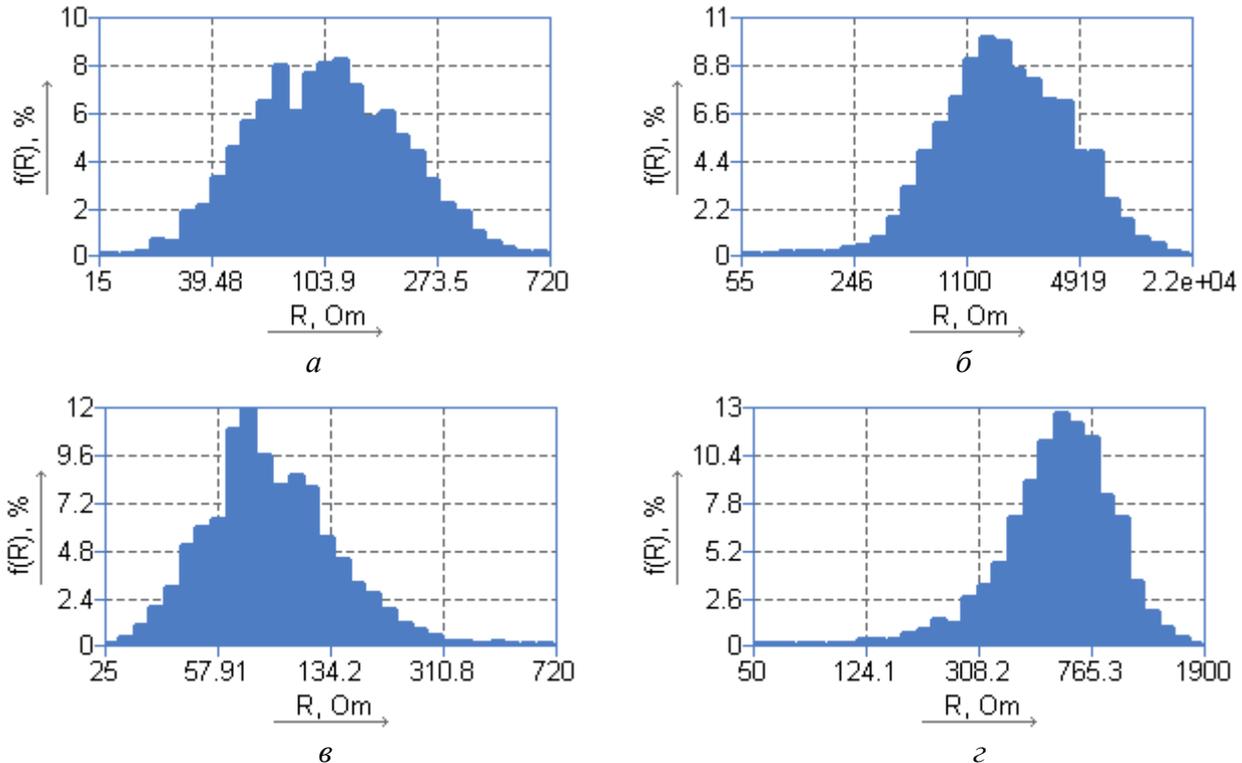


г

**Рисунок 2 – Сигнал сопротивления**

а – подшипник № 1, начало работы; б – подшипник № 1, после 15 мин; в – подшипник № 2, начало работы; г – подшипник № 2, после 15 мин

После 15 минут работы подшипника в описанных выше условиях, средние значения сигналов сопротивлений подшипников № 1 и № 2 увеличились до 2660 Ом и 647 Ом соответственно, а их среднеквадратические отклонения стали равны 2375 Ом и 257 Ом. Смещение сопротивления в высокоомную часть диапазона и увеличение разброса значений является общей динамикой закона распределения сигнала сопротивления, и предположительно объясняется разрушением поверхностного слоя и, соответственно, измененной геометрией микронеровностей, приводящей к изменению фактической площади контакта трибосопряжений.

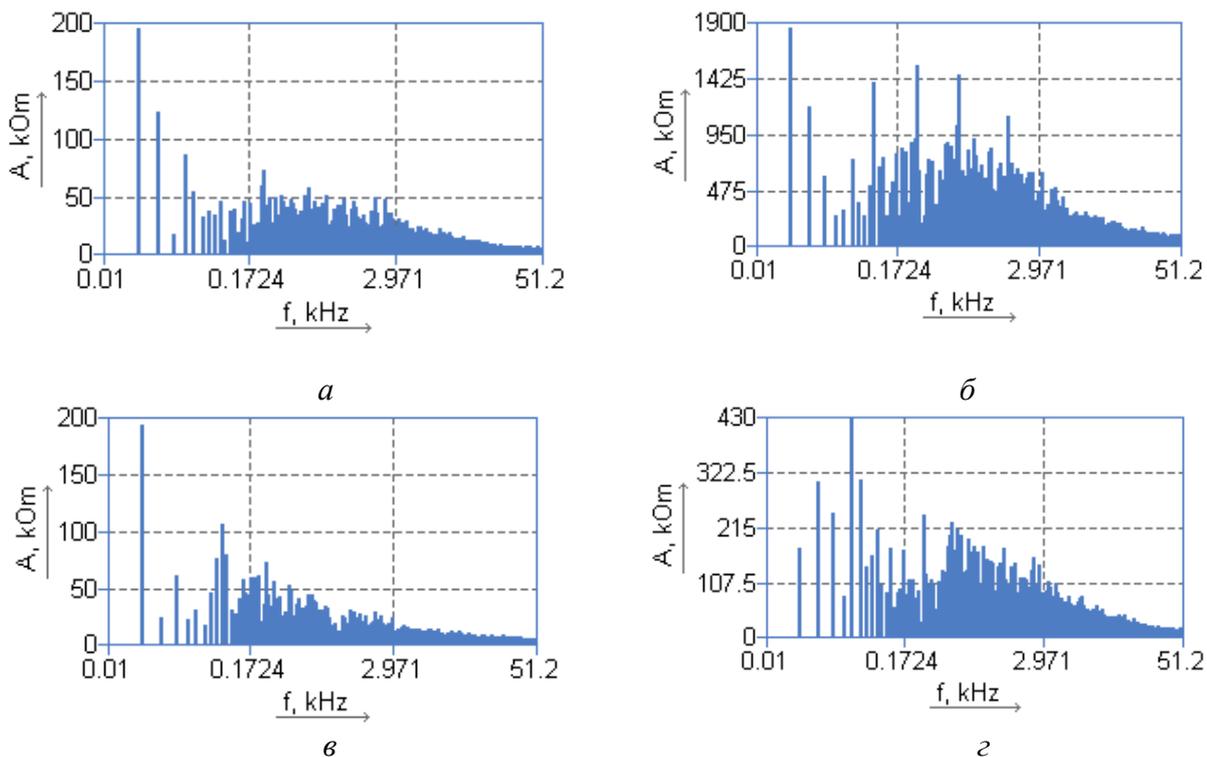


**Рисунок 3 – Гистограммы распределения сопротивления**

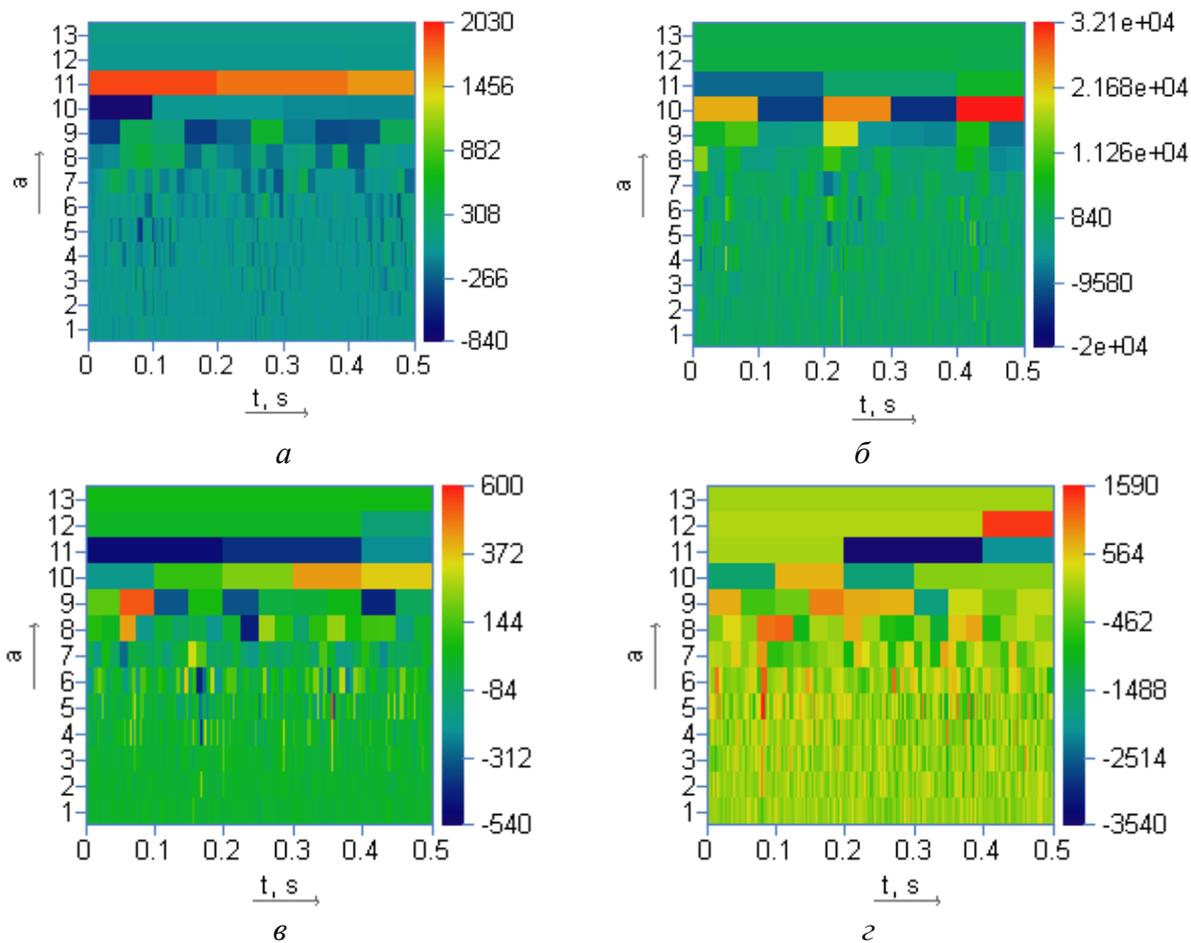
*а – подшипник № 1, начало работы; б – подшипник № 1, после 15 мин;  
в – подшипник № 2, начало работы; г – подшипник № 2, после 15 мин*

Полученные данные позволяют констатировать отсутствие возможности в отдельно взятый момент времени регистрировать режим трения подшипника по интегральному параметру или по виду сигнала сопротивления, поскольку диапазоны сопротивлений подшипника при сухом и смешанном режимах трения являются пересекающимися. Например, диагностический параметр нормированного интегрального времени микроконтактирования (НИВ) [1] для подшипников № 1 и № 2 в начальный период времени соответственно равны 0,465234 и 0,635059, а после 15 минут работы 0,00117 и 0,002148. Основываясь на этих данных можно утверждать, что произошел процесс приработки и подшипники вышли на работу преимущественно в смешанном режиме трения.

Подтверждение вышесказанному можно получить путем анализа динамики сигнала сопротивления и их спектров (рис. 4). В начальный момент времени в спектрах сигналов обоих подшипников ярко выражена гармоника с частотой 20 Гц, что соответствует составляющей, равной произведению частоты сепаратора на число тел качения. После 15 минут работы для подшипника № 1 доминирующими являются частоты: 20 Гц, 110 Гц, 260 Гц, 600 Гц и 1620 Гц. Для подшипника № 2 при том же периоде работы экстремумы располагаются на частотах 60 Гц и 260 Гц. Можно отметить, что в целом при сухом режиме трения определенность спектра низкая виду доминирующей в сигнале случайной компоненты, обусловленной случайным характером контактирования в соответствии с распределением микрогеометрии.

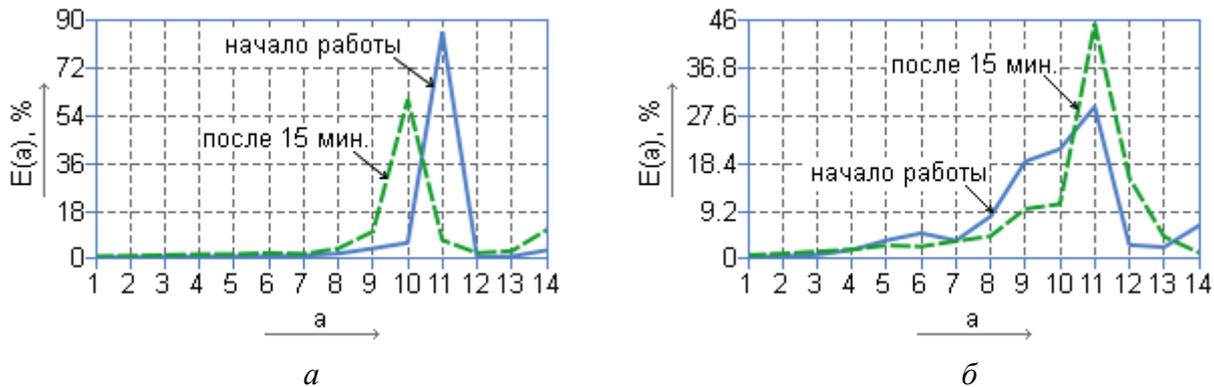


**Рисунок 4 – Спектры сигналов сопротивления**  
 а – подшипник № 1, начало работы; б – подшипник № 1, после 15 мин;  
 в – подшипник № 2, начало работы; г – подшипник № 2, после 15 мин



**Рисунок 5 – Вейвлет образы сигналов сопротивления**  
 а – подшипник № 1, начало работы; б – подшипник № 1, после 15 мин;  
 в – подшипник № 2, начало работы; г – подшипник № 2, после 15 мин

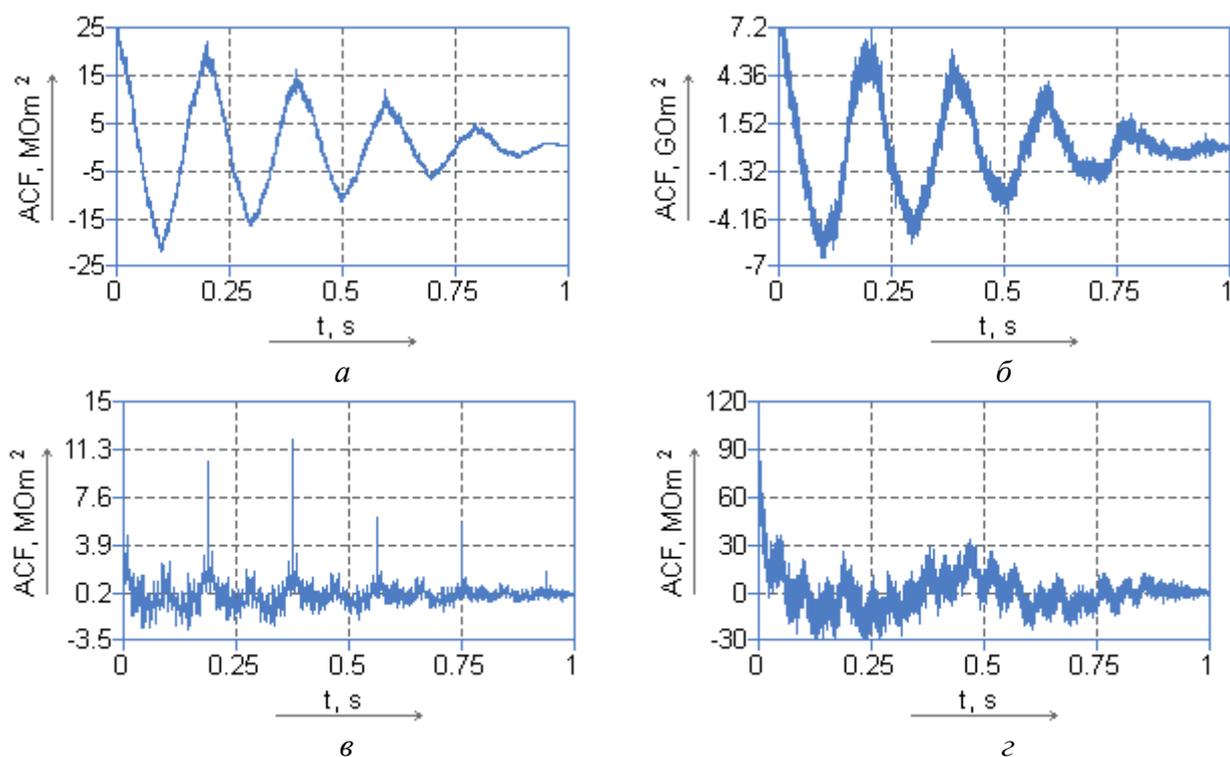
Для более углубленного анализа сигналов сопротивления подшипника проведен их вейвлет анализ. На вейвлет образах (рис. 5) в начале работы подшипника заметно наличие значительных нестационарных особенностей сигнала, периодичность которых равна периоду вращения и является проявлением периодической повторяемости взаимного расположения деталей, а так же вида и ширины зоны нагружения, обусловленной в том числе и макрогеометрией дорожек качения. По этой же причине, при большем значении овалности дорожки качения, в вейвлет образе на малых масштабах нестационарность имеет более локализованный во времени характер (рис. 5, в). При сухом режиме трения вейвлет, так же как и спектр, является избыточным описанием, при этом более удобной и компактной формой является скалограмма (рис. 6). На ней видны качественные и количественные различия в распределении энергии сигналов исследуемых подшипников по масштабным коэффициентам вейвлета.



**Рисунок 6 – Скалограммы сигналов сопротивления**  
*a – подшипник № 1; б – подшипник № 2*

Для выявления характерных периодических составляющих в сигнале сопротивления на фоне доминирующей случайной компоненты были рассчитаны автокорреляционные функции (АКФ) сигналов сопротивления, представленные на рисунке 7. На графиках АКФ подшипника № 1 (рис. 7, а, б) отчетливо видна периодическая составляющая с периодом равным периоду вращения внутреннего кольца 0,2 секунды, причем, в начале работы доля случайной компоненты в АКФ минимальна (рис. 7, а). После 15 минут работы для обоих подшипников вклад случайной компоненты увеличивается (рис. 7, б, в).

АКФ подшипника № 2 имеет принципиально иной характер, в начале работы АКФ содержит колебания с частотой 10 Гц, и всплески с периодичностью 0,2 с. После 15 мин на колебания частотой 2,5 Гц наложены колебания с частотой 20 Гц и случайная высокочастотная компонента порядка 1-5 кГц. В начале работы доля высокочастотной случайной компоненты в АКФ (рис. 7, в) соизмерима с колебательными составляющими, что указывает на менее стабильные условия работы трибосопряжений. После 15 минут работы относительный вклад случайной компоненты в АКФ подшипника № 2, так же как и для подшипника № 1, увеличивается (рис. 7, з). Что является следствием изменения микрогеометрии рабочих поверхностей подшипника в процессе его работы.



**Рисунок 7 – Автокорреляционные функции:**

*а – подшипник № 1, начало работы; б – подшипник № 1, после 15 мин;  
в – подшипник № 2, начало работы; г – подшипник № 2, после 15 мин*

## ВЫВОДЫ

1. По результатам выполненных экспериментальных исследований можно констатировать, что значение сигнала сопротивления определяется условиями процесса трения (в частности макро- и микро-геометрией рабочих поверхностей) и износа.

2. Характер изменения сигнала сопротивления при работе подшипника является сложным и неоднозначным. Применение только интегральных диагностических параметров, такие как статистические моменты сигнала, НИВ, и производных от них, не является достаточным для идентификации режима трения. Результаты исследования показывают невозможность их однозначной трактовки.

3. Компактным и информативным описанием сигнала сопротивления является закон распределения (плотность распределения) и скалограмма, использование которых дает возможность осуществить достаточно подробный анализ процесса трения, что при проведении дальнейших исследований вейвлет образов и скаллограмм позволит получать новую диагностическую информацию непосредственно из зон трения подшипника.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.

### **Чернышов Виктор Николаевич**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», Орел  
Научный сотрудник  
Тел. (4862) 41-98-76  
E-mail: vikorbit@gmail.com

### **Мишин Владислав Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», Орел  
к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862)41-98-76  
E-mail: vlad89290@gmail.com

**Майоров Максим Валерьевич**  
ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», Орел  
Ассистент  
Тел. (4862) 41-98-76

---

V.N. CHERNYSHOV, V.V. MISHIN, M.V. MAYOROV

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SIGNAL BEARING RESISTANCE  
IN MODE DRY FRICTION**

*In this paper presents results of experimental studies of the dynamics of electrical resistance reflects the state of the rolling bearing of working surfaces of friction units in the absence of lubricant.*

**Keywords:** ball bearings, electrical resistance of friction units.

**Chernyshov Viktor Nikolaevich**  
State University – Education Science Production Complex, Orel  
Research associate  
Tel. (4862) 41-98-76  
E-mail: vikorbit@gmail.com

**Mishin Vladislav Vladimirovich**  
State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”  
Tel. (4862)41-98-76  
E-mail: vlad89290@gmail.com vm@rbcmil.ru

**Mayorov Maxim Valer’evich**  
State University – Education Science Production Complex, Orel  
Assistant  
Tel. (4862) 41-98-76

**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 иверху – 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, 55-05-81  
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 28.12.2012 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,5.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № 141/13П1

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет - УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.