

**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-корр. 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.  
**Корндорф С.Ф.** д-р техн. наук, проф.  
**Малинин В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Мулюкин О.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Осадчий В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Панин В.Е.** д-р техн. наук, проф., академик РАН  
**Распопов В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Смоленцев В.П.** д-р техн. наук, проф.

**Ответственный за выпуск**

**Григорьева О.Ю.**

**Адрес редакции**

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

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

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

© Госуниверситет – УНПК, 2011

## Содержание

### Естественные науки

<i>Ромашин С.Н., Седов А.В., Хорошилова М.В., Шоркин В.С.</i> Влияние электростатического поля на механические свойства диэлектрика.....	3
<i>Варламов А.В., Мулюкин О.П.</i> Методика расчета и варьирования пределов показателей динамического качества системы «бункер сыпучего материала - сводообрушающий механизм».....	10
<i>Коростелёв Д.А., Харламов В.Ф.</i> Электронные явления в наногетерогенной структуре, содержащей квантовые антиоточки.....	18
<i>Поландов Ю.Х., Бабанков В.А., Трубикина Н.Ю.</i> О взрыве газо-воздушной смеси в незаключенном объеме цилиндрической формы.....	24
<i>Фоминова О.В., Бузев В.С., Чернышев В.И.</i> Оптимальное управление виброзащитной системы с фрикционным исполнительным механизмом.....	28

### Моделирование технологических процессов

<i>Русляков Д.В.</i> Анализ оценки эффективности термодинамических циклов компрессионных холодильников.....	32
<i>Лавит И.М.</i> Математическая модель стружкообразования при ортогональном резании..	39

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Галатов К.С., Чертов Ю.Е.</i> Определение параметров рабочего органа узла модификации пера сортировочных машин.....	48
--	----

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Албагачиев А.Ю., Зернов Е.В., Моисеенко А.М.</i> Плоское напряженное и деформированное состояние при осадке высоких поковок.....	52
<i>Неуен Ван Кыонг, Ямников А.С.</i> Методология оптимизации режимов резания.....	56
<i>Щипанов М.В., Кузовкин А.В.</i> Особенности построения технологического процесса импульсно-циклической обработки в контейнерах при высоких давлениях рабочей среды в магистралах.....	64

### Инновации и кадры в машиностроении

<i>Морозова А.В.</i> Методологические основы формирования модели квалиметрического оценивания компетенций специалиста для машиностроительного производства.....	69
---	----

### Приборостроение и биотехнические системы

<i>Подмастерьев К.В., Козюра А.В.</i> К вопросу контроля качества электрокардиографического сигнала.....	82
<i>Винокуров М.В., Лисичкин В.Г., Шведов С.Н.</i> Моделирование процессов резонансного контроля с линейной импульсной частотной модуляцией.....	88
<i>Моисеев С.А.</i> Модель управления техническим состоянием радиоэлектронной аппаратуры в процессе эксплуатации.....	95
<i>Ершов А.Б., Хорольский В.Я., Ефанов А.В.</i> Совместное использование принципов Понселе и Ползунова-Уатта при программном управлении амплитудно-временными параметрами одиночных импульсов тока большой величины.....	100

### Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Кирпичев А.А., Максимова М.А., Шкатов П.Н.</i> Экспериментальная проверка запаса работоспособности подшипников качения и скольжения.....	105
<i>Мишин В.В., Селихов А.В., Семёнов В.В., Родькин Е.И., Тулин С.Н.</i> Результаты экспериментального исследования параметров комплексной оценки технического состояния подшипника качения.....	112
<i>Сычев К.С.</i> Унификация условий контроля природных органических соединений в режиме обращенно-фазовой жидкостной хроматографии. Часть 1. Флавонолы, флавоногликозиды, катехины, гидроксикоричные кислоты.....	121
<i>Абашиш Е.Г.</i> Определение площади поперечного сечения рабочей арматуры при контроле железобетонных балок статическим и динамическим методами.....	129
<i>Беляева Т.П., Зольников В.К.</i> Система управления проектными рисками в микроэлектронике на этапе планирования работ.....	133
<i>Черный К.А.</i> Аэроионные измерения как метод оценки аэрозольного загрязнения воздуха рабочей зоны.....	139

для цитирования трудов на соискание ученых степеней.

UNIVERSITET

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

№ 1 (291) 2012

January - February

# 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

**Korndorf S.F.** 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) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,

41-98-21

www.gu-unpk.ru

E-mail: met\_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency

of supervision in sphere of commun-

ication, information technology and

mass communications. The certificate

of registration PI № FS77-47351 from

03.11.2011

Index on the catalogue of the «Pressa

Rossii» 29504

© State University – ESPC, 2011

## Contents

### Natural science

<i>Romashin S.N., Sedov A.V., Horoshilova M.V., Shorkin V.S.</i> Influence of electrostatic field on dielectric mechanical characteristics.....	3
<i>Varlamov A.V., Muljukin O.P.</i> Methodology of calculation and variation index limits of dynamic system quality “bulk storage bunker – easy collapse mechanism”.....	10
<i>Korostelev D.A., Kharlamov V.F.</i> The electronic phenomena in heterogeneous nanostructures containing quantum antipoints.....	18
<i>Polandov YU.H., Babankov V.A., Trubihina N.YU.</i> About gas-air mixture explosion within open volume of cylindrical form.....	24
<i>Fominova O.V., Buzuev V.S., Chernyshev V.I.</i> Optimal control of vibroprotection system with the frictional actuating mechanism.....	28

### Process modeling

<i>Ruslyakov D.V.</i> Analises of the effectiveness estimation of the compression refrigerators thermodynamic cycles.....	32
<i>Lavit I.M.</i> Mathematical model of chip formation at orthogonal cutting.....	39

### Construction, calculation, material

<i>Galatov K.S., Chertov Ju.E.</i> Definition of parameters of working bodies of sorting machine modification feather unit.....	48
---	----

### Machine building technology and toolware

<i>Albagachiev A.Yu., Zernov E.V., Moiseenko A.M.</i> Plane stress and strain state at high sediment forgings.....	52
<i>Nguyen Van Cuong, Yamnikov A.S.</i> Methodology for optimization of cutting conditions.....	56
<i>Shchipanov M.V., Kuzovkin A.V.</i> Features of technological process'es construction of pulse and cyclic processing with high pressure in working environment in main lines.....	64

### Innovation and frame in machine building

<i>Morozova A.V.</i> Methodological bases of formation of model measurement of quality formation of an estimation the competence of the expert for machine-building manufacture.....	69
--	----

### Instrument making and biotechnological system

<i>Podmasteryev K.V., Kozyura A.V.</i> To the question of electrocardiographic signal quality assessment.....	82
<i>Vinokurov M.V., Lisichkin V.G., Shvedov S.N.</i> Research of the resonant control using linear pulse frequency modulation.....	88
<i>Moiseev S.A.</i> Management model of the technical condition of radioelectronic equipment in the process of exploitation.....	95
<i>Ershov A.B., Khorolskiy V.Y., Yefanov A.V.</i> Joint use of poncele and polzunov-uatt principles in the process of programmed controlling peak-time parameters of single impulses of a current of the big capacity.....	100

### Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Kirpichev A.A., Maksimova M.A., Shkatov P.N.</i> Experimental verification of the safety performance of rolling and plain bearings.....	105
<i>Mishin V.V., Selihov A.V., Semenov V.V., Rod'kin E.I., Tulin S.N.</i> Results of experimental research of parameters of complex assessment of ball bearing's technical state.....	112
<i>Sychov K.S.</i> Unifying the condition for liquid chromatographic separation and screening control of natural organic compounds in rp mode.....	121
<i>Abashin E.G.</i> Definition of cross-section area of principal reinforcement bars at the control of reinforced concrete beams by the static and dynamic methods.....	129
<i>Belyaeva T.P., Zolnicov V.K.</i> Risk management methods in microelectronics in planning the work.....	133
<i>Chernyy K.A.</i> Air ion measurements as a means of estimation of work air aerosol contamination..	139

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

УДК 539.3

С.Н. РОМАШИН, А.В. СЕДОВ, М.В. ХОРОШИЛОВА, В.С. ШОРКИН

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКА**

*В работе показано, что поляризованный под действием однородного электростатического поля диэлектрик при внешнем механическом воздействии на него проявляет механические свойства, описываемые известной в механике деформируемого твердого тела линейной теорией микрополярной упругости. В отличие от известной теории микрополярной упругости, в предлагаемой модели поведения диэлектрика, указан метод вычисления дополнительных к классическим констант, характеризующих механические свойства материала. Они вычисляются через поляризуемость диэлектрика и напряженность электростатического поля, вызвавшего поляризацию.*

***Ключевые слова.** Электростатическое поле, поляризация, дипольный момент, ориентационное влияние, потенциал Штокмайера, упругая микрополярная среда.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Ситуация, когда функционирование того или иного прибора или устройства зависит от характера взаимодействия электрического поля с помещенным в него диэлектриком, широко распространена. Это – прежде всего, относится к конденсаторам различной емкости [1], процессам нанесения керамических покрытий, когда наносимые частицы попадают в поле, созданное основой, и взаимодействуя с ним создают слой с определенной структурой [2, 3-Партенский, 4-ориентационное влияние]. Очевидно, что внешние механические воздействия на прибор или устройство передаются и диэлектрику, поляризованному электростатическим полем. Это, прежде всего, сдвиговые напряжения, перпендикулярные действующему электрическому полю. Его поведение в этой ситуации, с целью возможности предсказать его реакцию, должно быть адекватно отражено в соответствующей математической модели. (Необходимо отметить, что ориентационное воздействие твердой стенки, на механические свойства вязкой жидкости, рассматривалось в работе [5], где установлено, что оно приводит к проявлению микрополярных свойств [6]).

Явление поляризуемости полярных диэлектриков связано с поворотом атомов или молекул, являющихся диполями, от их естественного случайно ориентированного состояния к состоянию с явно выделенным преимущественным направлением ориентации. Механическое воздействие на диэлектрик может вести к изменению этой ориентации. Поэтому влияние электростатического поля, поляризующего диэлектрик, должно проявиться, прежде всего, в активизации при механических воздействиях на него вращательных степеней свободы его частиц.

Явление поляризуемости в электростатике диэлектриков рассматривается феноменологически, в рамках континуального описания его свойств. Поэтому его ориентационное влияние рассматривается в рамках механики сплошных сред.

В реальных условиях ориентационное воздействие электрического поля на полярные частицы диэлектрика является дальнедействующим со стороны источника этого поля, а также со стороны одних частиц на другие. Поэтому в данной работе в основу теоретических построений положен метод, примененный в работах [7, 8]. Метод основан на гипотезе о дальнедействующем потенциальном взаимодействии бесконечно малых частиц упругой среды. При этом для оценки изменения свободной энергии, вызванного внешними причинами, используется информация о ее значении в конечном и начальном состояниях. (Классическая теория упругости применяет для этой цели полинома второй степени или квадратичную

форму с неопределенными коэффициентами, аргументами которых являются заранее выбранные характеристики деформированного состояния изучаемой среды.)

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ

Рассматривается бесконечно протяженная среда  $\Omega$ . Эта среда моделирует полярный диэлектрик, помещенный в однородное электростатическое поле с напряженностью  $\vec{E} = \vec{e} E, |\vec{e}| = 1$ . Предполагается, что вектор поляризации  $\vec{P}$  (поляризованность) единицы объема диэлектрика пропорционален напряженности  $\vec{E}$ , вызвавшей ее:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \kappa_e \vec{E}. \tag{1}$$

Здесь:  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$  – электрическая постоянная в системе СИ;  $\kappa_e$  – диэлектрическая восприимчивость вещества или поляризуемость единицы объема диэлектрика – величина, определяемая экспериментально или вычисляемая по формуле Дебая – Ланжевена [9]:

$$\kappa_e = \frac{n_0 \mu_e^2}{3 \varepsilon_0 k T}, \tag{2}$$

в которой  $n_0$  – число полярных молекул в единице объема  $1/\text{м}^3$ ,  $\mu_e$  – дипольный момент каждой из них  $k \cdot \text{м}$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/}^0 K$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура  $^0 K$ .

Считается, что все элементарные частицы  $dV$  среды  $\Omega$  в отсутствии внешних механических воздействий имеют один и тот же вектор поляризации  $\vec{P} dV = (\varepsilon_0 \kappa_e E) \vec{e} dV = \chi \vec{e} dV$ , пропорциональный объему  $dV$  частицы  $dV$ . В отсчетном состоянии моменты сил, действующие на каждую частицу, уравновешены.

Поскольку среда  $\Omega$  по предположению деформируема, то под действием внешних механических воздействий различные ее частицы  $dV \equiv dV_1$  и  $dV \equiv dV_2$  меняют свое относительное положение и ориентацию. Относительное положение в новом состоянии характеризуется вектором  $\vec{L}_{12}$  вместо  $\vec{l}_{12}$  – вектора относительного положения тех же частиц в отсчетном состоянии (при отсутствии внешних механических воздействий). С точки зрения классического подхода для описания деформирования среды достаточно фиксировать изменения расстояний  $|\vec{L}_{12} - \vec{l}_{12}|$  между центрами масс произвольных пар частиц. С точки зрения анализа вращательной реакции произвольной поляризованной полем  $\vec{E} = \vec{e} E$  частицы на внешние воздействия важен учет ее собственного поворота относительно ее начального положения на угол  $\vec{\varphi} = \vec{\varphi}_j$ , а также группы частиц на угол  $\text{rot } \vec{u} = \nabla \times \vec{u}$  ( $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r})$  – поле перемещений частиц изучаемой сплошной среды). Процесс считаем изотермическим.

Считается, что объемная плотность распределения потенциальной энергии упругих деформаций является суммой двух видов слагаемых. Первое из них является квадратичной формой классических видов малых деформаций, описываемых симметричным тензором напряжений. Второе возникает как следствие учета вращательных степеней свободы. Именно это слагаемое и рассматривается далее.

Предполагается, что подобное утверждение является следствием утверждения о том, что взаимодействие пары реальных диполей-молекул описывается потенциалом Штокмайера [10] (выражение записано в системе СГС) :

$$\phi_{(1,2)} = 4 \varepsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] - \frac{\mu_1 \mu_2}{r^3} g(\Theta_1, \Theta_2, \varphi) \tag{3}$$

$$g(\Theta_1, \Theta_2, \varphi) = 2 \cos \Theta_1 \cos \Theta_2 - \sin \Theta_1 \sin \Theta_2 \cos \varphi. \tag{4}$$

Здесь  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  – параметры потенциала Ленарда – Джонса [11];  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – величины дипольных моментов взаимодействующих частиц;  $r$  – расстояние между их центрами масс;

$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ;  $\Theta_1, \Theta_2, \varphi_1, \varphi_2$  – углы векторов  $\vec{\mu}_1, \vec{\mu}_2$  дипольных моментов первой и второй частиц в сферической системе координат с осью, ориентированной от первой частицы ко второй, проходящей через их центры масс.

Второе слагаемое выражения (3) используется для того, что бы оценить потенциал вращательного взаимодействия двух произвольных частиц  $d B \equiv d B_1$  и  $d B \equiv d B_2$  среды  $\Omega$ , поскольку под влиянием внешнего поля  $\vec{E}$  они стали диполями.

В текущем состоянии (соответствующие характеристики помечены верхним индексом  $(*)$ ) с использованием векторной записи для  $g(\Theta_1, \Theta_2, \varphi)$  для аналога второго слагаемого потенциала (3), относящегося к частицам  $d B \equiv d B_1$  и  $d B \equiv d B_2$ , при условии, что переход в текущее состояние не меняет вида функции  $g$  от ее аргументов, можно получить выражение:

$$\delta F^* = \Phi_{(1,2)} dV_1^* dV_2^* = \frac{(P_1^* dV_1^*)(P_2^* dV_2^*)}{l_{12}^{*3}} g(\vec{e}_1^*, \vec{e}_2^*, \vec{e}_{12}^*) \quad (5)$$

$$g(\vec{e}_1^*, \vec{e}_2^*, \vec{e}_{12}^*) = 3(\vec{e}_1^* \circ \vec{e}_{12}^*)(\vec{e}_2^* \circ \vec{e}_{12}^*) - (\vec{e}_1^* \circ \vec{e}_2^*) \quad (6)$$

Здесь  $\delta F^*$  – значение потенциальной энергии ориентационного взаимодействия частиц  $d B \equiv d B_1$  и  $d B \equiv d B_2$  в текущем состоянии.

В отсчетном состоянии выражение для вычисления той же величины получается из (5) отбрасыванием верхнего индекса  $(*)$ . При этом необходимо учесть, что  $\vec{e}_m = \vec{e}$ ,  $\vec{P}_m = \vec{P}$ .

Далее допускается, что деформации материала диэлектрика настолько малы, что переход из отсчетного состояния не привел к значимым изменениям дипольных моментов и расстояния между ними:

$$P_m^* = P_m = P, \quad dV_m^* = dV_m, \quad m = 1, 2, \quad l_{12}^* = l_{12}. \quad (7)$$

В свою очередь:

$$\vec{e}_p^* = \vec{e}_p + \Delta \vec{e}_p = \vec{e}_p + \vec{\varphi}_p \times \vec{e}_p, \quad p = 1, 2, 12, \quad \vec{e}_1 = \vec{e}_2 = \vec{e}. \quad (8)$$

Пусть  $\vec{r}$  – радиус-вектор произвольной точки области, занимаемой средой  $\Omega$ . Тогда в отсчетном состоянии центры масс частиц  $d B_1$  и  $d B_2$  относительно этой точки имеют радиус-векторы  $\vec{l}_m = \vec{r}_m - \vec{r}$ . При переходе в текущее состояние это выражение приобретает вид:

$$\vec{l}_m^* = \vec{r}_m^* - \vec{r}^* = \vec{l}_m + \Delta \vec{u}(\vec{r}), \quad \Delta \vec{u}_m(\vec{r}) = \vec{u}(\vec{r} + \vec{l}_m) - \vec{u}(\vec{r}), \quad (9)$$

$\vec{u}$  – перемещение точки с соответствующим радиус-вектором.

Получение поля перемещений  $\vec{u}(\vec{r})$  – задача теории упругости, учитывающей как поступательные, так и вращательные степени свободы частиц среды. В данной работе об этом поле допускается, что по отношению к внешнему электрическому полю  $\vec{E} = const$  среда может осуществлять жесткий поворот, характеризуемый вектором  $\frac{1}{2}(\nabla \times \vec{u}) = \frac{1}{2} rot \vec{u}$ . Это означает, что при переходе из отсчетного состояния в текущее вектор, соединяющий центры масс частиц  $d B_1$  и  $d B_2$ , поворачивается от направления  $\vec{e}_{12}$  к направлению  $\vec{e}_m^*$ . При этом вектор  $\vec{e}_{12}$  получает приращение  $\Delta \vec{e}_{12} = \vec{\varphi}_{12} \times \vec{e}_{12} = \frac{1}{2} rot \vec{u} \times \vec{e}_{12}$ , так что  $\vec{\varphi}_{12} = \frac{1}{2} rot \vec{u}$ .

Под влиянием механических воздействий меняется ориентация не только диполей  $d B_1$  и  $d B_2$ , но и частицы  $d B$ , имеющей центр масс в точке  $\vec{r}$ . Поэтому для этой частицы (так же, как и для других частиц) вводится в рассмотрение угол  $\vec{\varphi}$  поворота ее диполя. В отсчетном состоянии все частицы имеют один и тот же вектор ориентации  $\vec{e}$ . В текущем состоянии их векторы ориентации разные. Так что можно говорить о функции  $\vec{\varphi} = \vec{\varphi}(\vec{r})$  и о представлении

$$\vec{\varphi}_m = \vec{\varphi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} (\nabla^n \vec{\varphi}) \circ \dots \circ \vec{l}_m^n. \quad (10)$$

В дальнейших рассуждениях ограничиваемся представлением

$$\vec{\varphi}_m = \vec{\varphi} + (\nabla \vec{\varphi}) \circ \vec{l}_m. \quad (11)$$

В этих выражениях: знак  $(\circ)$  означает свертку, количество этих знаков – количество сверток, отсутствие знака скалярного или векторного произведения между векторами или тензорами означает их внешнее произведение;  $\nabla^n$ ,  $\vec{l}_m^n$  – внешние  $n$ -ые степени векторов  $\nabla$  и  $\vec{l}_m$  соответственно.

С учетом (7) – (11) изменение функции (6) при переходе среды  $\Omega$  из отсчетного состояния в текущее определяется выражением:

$$\begin{aligned} \Delta g = g(\vec{e}_1^*, \vec{e}_2^*, \vec{e}_{12}^*) - g(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_{12}) = A_1 \circ \left[ \vec{\varphi} - \frac{1}{2} (\nabla \times \vec{u}) \right] + A_2 \circ \circ (\nabla \vec{\varphi}) + \\ + \left[ \vec{\varphi} - \frac{1}{2} (\nabla \times \vec{u}) \right] \circ B_{11} \circ \left[ \vec{\varphi} - \frac{1}{2} (\nabla \times \vec{u}) \right] + (\nabla \vec{\varphi}) \circ \circ B_{22} \circ \circ (\nabla \vec{\varphi}) + \\ + \left[ \vec{\varphi} - \frac{1}{2} (\nabla \times \vec{u}) \right] \circ B_{12} \circ \circ (\nabla \vec{\varphi}) + (\nabla \vec{\varphi}) \circ \circ B_{21} \circ \left[ \vec{\varphi} - \frac{1}{2} (\nabla \times \vec{u}) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

В этой записи:

$$\begin{aligned} A_1 = 6(\vec{e} \circ \vec{e}_{12})(\vec{e} \times \vec{e}_{12}), \quad A_2 = 6(\vec{e} \circ \vec{e}_{12})(\vec{e} \times \vec{e}_{12}) \vec{l}_{12}, \\ B_{11} = 3(\vec{e} \times \vec{e}_{12})(\vec{e} \times \vec{e}_{12}), \quad B_{22} = 3 \vec{l}_1 (\vec{e} \times \vec{e}_{12})(\vec{e} \times \vec{e}_{12}) \vec{l}_2 \\ B_{12} = 3(\vec{e} \times \vec{e}_{12})(\vec{e} \times \vec{e}_{12}) \vec{l}_2, \quad B_{21} = 3 \vec{l}_1 (\vec{e} \times \vec{e}_{12})(\vec{e} \times \vec{e}_{12}) \end{aligned} \quad (13)$$

При этом множитель перед функцией (6) в выражении (5) приобретает вид:

$$\frac{(P_1^* dV_1^*)(P_2^* dV_2^*)}{l_{12}^{*3}} = \frac{(P_1 dV_1)(P_2 dV_2)}{l_{12}^3} = \frac{P^2 dV_1 dV_2}{[l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1)]^{3/2}} \quad (14)$$

Здесь  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  – углы между  $\vec{l}_1$ ,  $\vec{l}_2$  – с одной стороны, и  $\vec{e}$  – с другой.

Для того, чтобы узнать вращательную часть объемной плотности энергии упругих деформаций, необходимо вычислить сумму парных вращательных взаимодействий всех частиц  $B_1$  и  $B_2$ , расположенных в единичном объеме  $V$  среды  $\Omega$  с центром в точке  $\vec{r}$ , то есть двойной интеграл

$$w_\varphi = P^2 \iint_V \frac{\Delta g dV_1 dV_2}{[l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1)]^{3/2}}. \quad (15)$$

Интегрирование приводит к выражению:

$$\left[ \vec{\varphi} - \frac{1}{2} (\nabla \times \vec{u}) \right] \circ \beta_{11} \circ \left[ \vec{\varphi} - \frac{1}{2} (\nabla \times \vec{u}) \right] + (\nabla \vec{\varphi}) \circ \circ \beta_{22} \circ \circ (\nabla \vec{\varphi}). \quad (16)$$

В выражении (16) тензорные коэффициенты  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{22}$  вычисляются путем интегрирования выражений (13), (15) по всем допустимым ориентациям и значениям модулей векторов  $\vec{l}_1$ ,  $\vec{l}_2$ ,  $\vec{e}_{12}$  и получают вид:

$$\begin{aligned} \beta_{11} \approx 1,1 \cdot 10^{-1} \varepsilon_0 (\kappa^2 / \varepsilon) E^2 [(\vec{i} \vec{i}) + (\vec{j} \vec{j})], \\ \beta_{22} \approx 1,3 \cdot 10^{-3} \varepsilon_0 (\kappa^2 / \varepsilon) E^2 [(\vec{j} \vec{i}) - (\vec{i} \vec{j})][(\vec{j} \vec{i}) - (\vec{i} \vec{j})]. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  – единичные векторы ортонормированного базиса  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  прямоугольной декартовой системы координат, третий вектор которого  $\vec{k}$  совпадает с вектором  $\vec{e}$ .

Сопоставление квадратичной формы (16) с частью квадратичной формы, выражающей вращательную часть объемной плотности потенциальной энергии упругих деформаций микрополярной теории упругости [12, 13] можно прийти к заключению об их равенстве.

Таким образом, оказывается, что механические воздействия на поляризованный диэлектрик, стремящиеся повернуть его в целом (учет  $rot \vec{u}$ ), а также его отдельные элементы (учет угла  $\vec{\varphi}$ ) приводит к возбуждению в нем механических свойств, описываемых микрополярной теорией упругости. Отличие предложенной модели от микрополярной теории упругости состоит в том, что эта теория не указывает способа экспериментального определения или вычисления соответствующих материальных констант, в то время как предложенная в данной работе модель позволяет проделать необходимые вычисления.

По данным [14] значения рабочей напряженности электрического поля в конденсаторах с оксидным диэлектриком имеет порядок  $kB/мм$ , то есть  $10^6 В/м$ . При этом  $\varepsilon \approx 40$ . С учетом этих данных оказывается, что  $\beta_{11} \approx 39 Дж/м^3$ ,  $\beta_{22} \approx 0,46 Дж/м$ . В конденсаторах с оксидным диэлектриком значение рабочей напряженности электрического поля на два порядка выше. Значит, проявление микрополярных свойств окажется существеннее.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена математическая модель поведения поляризованного внешним однородным электростатическим полем диэлектрика под действием внешних механических воздействий, способных вызвать повороты его частиц, характеризующиеся ротором вектора их перемещений, а также независимыми от него поворотами. Как и следовало ожидать, оказалось, что механическое поведение диэлектрика в этих условиях описывается микрополярной теорией упругости с той лишь разницей с известным ее вариантом, что предложенная математическая модель позволяет вычислить необходимые материальные константы через напряженность электрического поля и характеристики поляризуемости среды. Представленный пример расчета дает основание считать проявление микрополярных свойств материала существенным в диэлектрических прокладках конденсаторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. dvo.sut.ru/libr/eqp/031/22.htm
2. www.tspc.ru/tech/GZ.php
3. Партенский, М. Б., Самосогласованная электронная теория металлической поверхности [Текст] / М. Б. Партенский // Успехи физических наук. – 1979. – Т. 128. – Вып. 1. – С. 69 – 106.
4. Дистлер, Г. И., Электронная микроскопия поверхностных явлений [Текст] / Г. И. Дистлер. // Исследования в области поверхностных сил: Сб. докл. 3 конф. по поверхн. силам. – М.: Наука, 1967. – С. 84 – 96.
5. Shorkin, V.S. On a model of fluid motion near a solid surface // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Volume 22, Issue 3, pp. 349–353.
6. Аэро, Э.П., Асимметричная гидромеханика [Текст] / Э.П. Аэро, А.Н. Булыгин, Е.В. Кувшинский, // ПММ. - т. 29. - № 2. - С. 114 -123.
7. Шоркин, В. С., Модель сплошной упругой среды, основанная на представлении о дальнедействующем потенциальном взаимодействии ее частиц [Текст] // Упругость и неупругость. Под ред. И. А. Кийко, Р.А. Васина, Г. Л. Бровко. – М.: Ленанд, 2006. – С. 271 – 282.
8. Шоркин, В.С., Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел [Текст] / В.С. Шоркин, Л.Ю. Фроленкова, А.С. Азаров // Журнал Материаловедение. - 2011. - № 2, С. 2 – 7.
9. Яворский, Б.М., Справочник по физике [Текст] / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. - М.: Наука, 1977, – 942 С.
10. Гиршфельдер, Дж., Молекулярная теория газов и жидкостей [Текст] / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд, - М.: ИЛ, 1961. – 931С.
11. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела [Текст] / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 792 С.



12. Кувшинский, Е. В., Континуальная теория асимметричной упругости. Учет внутреннего вращения [Текст] / Е.В. Кувшинский, Э.Л. Аэро. - ФТТ. - т. 5. - 1963. - В. 9.-С. 251 -264.

13. Ерофеев В.И. Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой [Текст] / М.: изд-во Моск. ун-та, 1999. – 328 с.

14. <http://www.giricond.ru/production/capacitors/>

**Ромашин Сергей Николаевич**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики

302020, г.Орел, Наугорское шоссе 29

контактный телефон: (0862) 41-98-89

факс: (0862) 41-66-84; 43-26-01

E-mail: Shorkin@ostu.ru

**Седов Александр Викторович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики

302020, г.Орел, Наугорское шоссе 29

контактный телефон: (0862) 41-98-89

факс: (0862) 41-66-84; 43-26-01

E-mail: Shorkin@ostu.ru

**Хорошилова Маргарита Вячеславовна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики

302020, г.Орел, Наугорское шоссе 29

контактный телефон: (0862) 41-98-89

факс: (0862) 41-66-84; 43-26-01

E-mail: Shorkin@ostu.ru

**Шоркин Владимир Сергеевич**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс

Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики

302020, г.Орел, Наугорское шоссе 29

контактный телефон: (0862) 41-98-89

факс: (0862) 41-66-84; 43-26-01

E-mail: Shorkin@ostu.ru

---

S.N. ROMASHIN, A.V. SEDOV, M.V. HOROSHILOVA, V.S. SHORKIN

**INFLUENCE OF ELECTROSTATIC FIELD ON DIELECTRIC MECHANICAL CHARACTERISTICS**

*In work it is shown that polarized under the influence of homogeneous elektrostati-cheskogo weeding a dielectric at external mechanical influence on it shows mehani-cheskie the properties described known in mechanic of a deformable firm body of tenches th by the theory of micropolar elasticity. Unlike the known theory micropolar up-rugosti, in offered model of behavior of a dielectric, the calculation method is specified add-telnyh to classical the constants characterizing mechanical properties of a material. They are calculated through polarizability of a dielectric and intensity elektrostatische-skogo the field which have caused polarization.*

**Keywords:** *an electrostatic field, polarization, the dipolar moment, shout-entatsionnoe influence, potential of Shtokmajera, the elastic micropolar environment.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. [dvo.sut.ru/libr/eqp/031/22.htm](http://dvo.sut.ru/libr/eqp/031/22.htm)
2. [www.tspc.ru/tech/GZ.php](http://www.tspc.ru/tech/GZ.php)
3. Partenskij, M. B., Samosoglasovannaja jelektronnaja teorija metallicheskoj poverhnosti [Tekst] / M. B. Partenskij // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1979. – Т. 128. – Vyp. 1. – С. 69 – 106.

4. Distler, G. I., Jelektronnaja mikroskopija poverhnostnyh javlenij [Tekst] / G. I. Distler. // Issle-dovanija v oblasti poverhnostnyh sil: Sb. dokl. 3 konf. po poverhn. silam. – M.: Nauka, 1967.– S. 84 – 96.
5. Shorkin, V.S. On a model of fluid motion near a solid surface // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Volume 22, Issue 3, pp. 349–353.
6. Ajero, Je.P., Asimmetrichnaja gidromehanika [Tekst] / Je.P. Ajero, A.H. Bulygin, E.V. Kuvshinskii, // PMM. - t. 29. - № 2. - S. 114 -123.
7. Shorkin, V. S., Model' sploshnoj uprugoj sredy, osnovannaja na predstavlenii o dal'nodejstvujuwem potencial'nom vzaimodejstvii ee chastic [Tekst] // Uprugost' i neuprugost'. Pod red. I. A. Kijko, R.A. Vasina, G. L. Brovko. – M.: Lenand, 2006. – S. 271 – 282.
8. Shorkin, V.S., Uchet vlijanija trojnogo vzaimodejstvija chastic sredy na poverhnostnye i adgezion-nye svojstva tverdyh tel [Tekst] / V.S. Shorkin, L.Ju. Frolenkova, A.S. Azarov // Zhurnal Materialovedenie. - 2011. - № 2, S. 2 – 7.
9. Javorskij, B.M., Spravochnik po fizike [Tekst] / B.M. Javorskij, A.A. Detlaf. - M.: Nauka, 1977, – 942 S.
10. Girshfel'der, Dzh., Molekuljarnaja teorija gazov i zhidkostej [Tekst] / Dzh. Girshfel'der, Ch. Kertiss, R. Berd, - M.: IL, 1961. – 931S.
11. Kitel', Ch. Vvedenie v fiziku tverdogo tela [Tekst] / Ch. Kittel'. – M.: Nauka, 1978. – 792 S.
12. Kuvshinskii, E. V., Kontinual'naja teorija asimmetrichnoj uprugosti. Uchet vnutrennego vrawenija [Tekst] / E.V. Kuvshinskii, Je.L. Ajero. - FTT. - t. 5. - 1963. - V. 9.-S. 251 -264.
13. Erofeev V.I. Volnovye processy v tverdyh telah s mikrostrukturaj [Tekst] / M.: izd-vo Mosk. un-ta, 1999. – 328 s.
14. <http://www.giricond.ru/production/capacitors/>

**Romashin Sergey Nikolaevich**

State University-Education-Science-Production Complex

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor, Department of Physics

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-41-98-89

Fax: 4862-41-66-84, 43-26-01

E-mail: Shorkin@ostu.ru

**Sedov Aleksandr Viktorovich**

State University-Education-Science-Production Complex

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor, Department of Physics

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-41-98-89

Fax: 4862-41-66-84, 43-26-01

E-mail: Shorkin@ostu.ru

**Horoshilova Margarita Vyacheslavovna**

State University-Education-Science-Production Complex

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor, Department of Physics

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-41-98-89

Fax: 4862-41-66-84, 43-26-01

E-mail: Shorkin@ostu.ru

**Shorkin Vladimir Sergeevich**

State University-Education-Science-Production Complex

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Physics

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-41-98-89

Fax: 4862-41-66-84, 43-26-01

E-mail: Shorkin@ostu.ru



1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – выходной вал электродвигателя; 3 – жесткая соединительная муфта; 4 – редуктор; 5 – ведущий вал редуктора; 6 – ведомый вал; 7 – подшипник качения; 8, 9 – ведущая и ведомая звездочки, соответственно; 10 – зубчатая цепь; 11 – сводообрушающий орган; 12 – бункер; 13 – щелевое выпускное отверстие; 14 – пластина днища;  $M_{\partial}$ ,  $M_p$  – крутящий момент электродвигателя и редуктора, соответственно;  $d_{\partial}$ ,  $d_{\text{вр}}$  – диаметр выходного вала электродвигателя и редуктора, соответственно;  $d_{3\partial}$ ,  $d'_{3\partial}$  – диаметр ведущей и ведомой звездочек, соответственно;  $Z_{3\partial}$ ,  $Z'_{3\partial}$  – число зубьев ведущей и ведомой звездочек;  $L_{3\partial} = L_6$  – расстояние между центрами звездочек 8 и 9 и осями валов 5 и 6;  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7$  – конструктивные размеры валов, подшипников и сводообрушающего органа;  $h$  – фактическая величина вхождения рабочего органа 11 в полость бункера 12;  $H_p$  – толщина рабочего органа;  $L_6, H_6, B_6$  – длина, ширина и высота бункера ( $B_1, B_2, \dots, B_i$  – высота слоев СМ, соответствующая числу выпусков  $i$  СМ из бункера);  $L_{\text{щ}}$ ,  $H_{\text{щ}}$  – длина и ширина щелевого выпускного отверстия, соответственно;  $H_{\text{пл}}$ ,  $\alpha_{\text{пл}}$  – ширина пластины днища 14 и угол ее наклона, соответственно;  $x_{\text{ц}}$  – направление перемещения сводообрушающего органа

Принцип действия системы «Бункер сыпучих материалов – сводообрушающий механизм» заключается в следующем (рис. 2).

Электродвигатель 1 развивает на выходном валу 2 крутящий момент  $M_{\partial}$ , который через жесткую муфту 3 передается на червячный редуктор 4, выходной вал которого также через жесткую муфту передает крутящий момент  $M_p$  на ведущий вал 5. Вал 5 и параллельно установленный ему ведомый вал 6 сцентрированы на подшипниках качения 7. На валах 5 и 6 жестко закреплены соответственно ведущая 8 и ведомая 9 звездочки, которые совместно с зубчатой цепью 10 образуют зубчатую цепную передачу.

С цепью 10 жестко соединен пластинчатый сводообрушающий орган 11.

Орган 11 введен в щелевое выпускное отверстие 13 бункера 12. При помощи подвижных пластин 14 величина  $H_{\text{щ}}$  ширины выпускного отверстия 13 регулируется путем изменения угла наклона  $\alpha_{\text{пл}}$  под заданную производительность выпуска сыпучего материала из бункера 12 в приемную емкость мобильного транспортного средства (механизм регулирования углового положения пластин 14 на рисунке 2 не приведен).

На рисунке 2 также не приведен действующий в системе механизм вертикального подъема сводообрушающего органа 11 внутрь бункера, позволяющий изменять высоту вхождения  $h$  органа 11 внутрь бункера 12 для разрушения сводообразования в конкретном слое  $B_i$  сыпучего материала, где  $i$  – число принятых условных слоев сыпучего материала, распределенных по высоте  $B_6$  бункера 12.

Задействованные в системе концевые выключатели (на рис. 2 не показаны) обеспечивают рабочий ход сводообрушающего органа 11 из крайнего правого положения на ход  $L_{\text{щ}}$  до крайнего левого положения, а затем обратное движение в крайнее правое положение за счет смены направления крутящего момента  $M_{\partial}$  на выходном валу 2 электродвигателя 1.

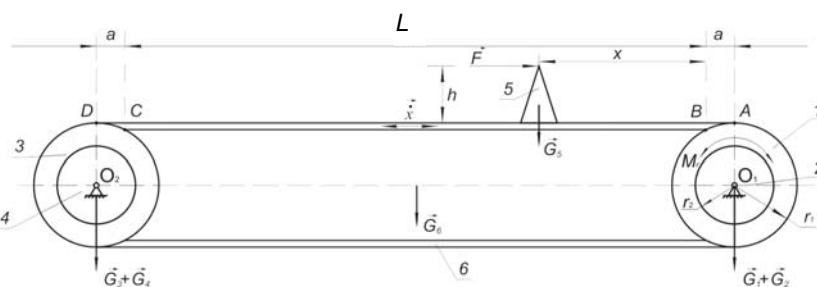


Рисунок 3 – Конструктивно-расчетная схема динамического комплекса на базе звена приведения

1, 3 – соответственно, ведущая и ведомая звездочки, каждая массой  $m_1$  и радиусом  $r_1$  ( $\vec{G}_1, \vec{G}_3$ ); 2, 4 – соответственно, ведущий и ведомый валы, каждый массой  $m_2$  и радиусом  $r_2$  ( $\vec{G}_2, \vec{G}_4$ ); 5 – сводообрушающий орган массой  $m_3$  ( $\vec{G}_5$ ); 6 – зубчатая цепь массой  $m_6$  ( $\vec{G}_6$ );  $\vec{x}, \dot{\vec{x}}$  – соответственно, перемещение и скорость органа 5 при возвратно-поступательном движении;  $L$  – полный рабочий ход органа 5, равный длине выпускного отверстия бункера  $L_{\text{щ}}$  (см. рисунок 2);  $a$  – участки цепи 6, вынесенные из зоны бункера с СМ;  $\vec{F} = f(F_{\text{wi}})$  – сила противодействия движению органа 5 со стороны сводообразования СМ, формируемого силой схватывания  $F_{\text{w}}$  отдельных частиц и слоев в фиксированных массах сыпучего материала с высотой слоев  $B_1, B_2, \dots, B_i$  (см. рисунок 2); АВ, ВС, СД – соответственно, участки разгона, равномерного движения и торможения сводообрушающего органа 5 при полном цикле работы сводообрушающего механизма, – от момента пуска до момента останова.

При создании и доводке в эксплуатации охарактеризованной динамической системы использованы результаты нижеперечисленной методики расчета ее динамических показателей, представляющей практический интерес для проектировщиков такого класса механизмов и обслуживающего их технического персонала.

Исследование проводилось в два этапа:

1. Математическое описание данного динамического комплекса.
2. Определение силы схватывания отдельных частиц и слоев СМ фиксированной массы в бункере для выбора минимально необходимого усилия рабочего органа сводообрушающего механизма, расчётное соотношение для которого затем вводилось в уравнение движения исследуемого комплекса, полученное на первом этапе.

При выводе уравнения движения динамического комплекса для упрощения его решения использован классический способ решения такого рода систем с одной степенью свободы путем исследования динамики звена приведения (рис. 3), за которое принята ведущая звездочка 8 зубчатой цепи 10, испытывающей противонаправленные усилия от крутящего момента  $M_p$  редуктора 4 и от силы схватывания  $F_{wi}$  в сводообразовании  $i$ -го слоя СМ (слои  $B_1, B_2, \dots, B_i$ , где  $i$  в общем случае соответствует числу выпусков из полностью загруженного бункера равномассных порций СМ до полного опорожнения бункера (см. рис. 2).

Выбор протяженности участков АВ, ВС и СД рабочего хода сводообрушающего органа 5 на рисунке 3 согласован с временем их прохождения  $\tau_{AB}, \tau_{BC}, \tau_{CD}$  на циклограмме работы электродвигателя постоянного тока, совмещенной с его механической характеристикой в двухкоординатном отображении по оси X (рис. 4).

Размещение участка АВ (включение электродвигателя и выход на заданный момент

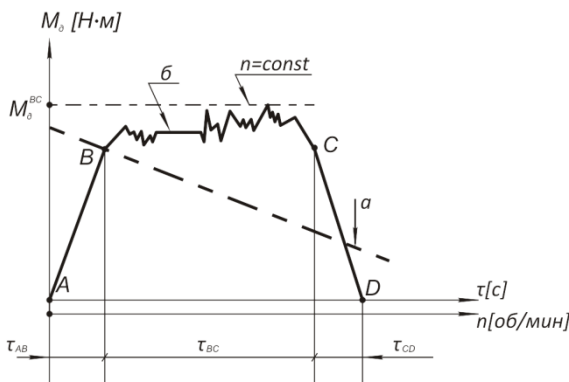


Рисунок 4 – Циклограмма работы электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

$a$  – механическая характеристика:  
 $M_\delta = f(n)$ ;  $b$  – изменение момента  $M_\delta$  на участках АВ, ВС, СД:  $M_\delta = f(\tau)$

$M_\delta^{BC}$  для создания максимально потребного усилия разрушения сводообразования СМ на участке ВС) и участка СД (выключение электродвигателя по завершении процесса сводоразрушения на участке ВС) вне зоны выпускного отверстия  $L_{ш}$  (см. рис. 2) позволило исключить из математического описания оценку влияния инерционности и флуктуации подвижных элементов и электродвигателя на динамику сводообрушающего механизма.

Взаимосвязь между крутящим моментом  $M_\delta^{BC}$  [Н·м] электродвигателя с развиваемым числом оборотов  $n$  [об/мин] с создаваемой мощностью  $N$  [кВт] может быть оценена с помощью известного соотношения:

$$N = \frac{M_\delta^{BC} \cdot n}{9549}$$

При редуцировании оборотов двигателя с передаточным соотношением  $i$  имеем (см. рис. 3):

$$N = \frac{M_p \cdot n}{9549 \cdot i} = \frac{F \cdot r_1 \cdot n_e}{9549}, \quad (1)$$

где  $n_e$  – число оборотов звездочки.

Здесь  $i = \frac{n}{n_e} = \frac{M_p}{M_\delta^{BC}}$ ;  $M_p = F \cdot r_1$  (см. рис. 3).

Потребную мощность  $N$  двигателя как функцию от усилия  $\bar{F}(\bar{x})$  и скорости  $\bar{\dot{x}}$  сводообрушающего органа можно определить по формуле  $N = (\bar{F}, \bar{\dot{x}})$ , где  $\bar{\dot{x}}$  – скорость точки при-

ложения силы. В скалярном виде для прямого или обратного хода сводообрушающего механизма мгновенная мощность  $N_m = \frac{\partial A}{\partial \tau}$ , где  $\partial A = F(x)dx$  или  $N_m = F(x)\dot{x}$ .

Также очевидно, что плотность и, как следствие, твердость СМ в бункере при прохождении рабочим органом 11 (см. рис. 2) хода  $BC = L_{uc}$  (см. рис. 3) различны, что предопределяет количественное изменение силы  $F$  на определенном ходе ВС (прямом или обратном) для процесса сводоразрушения СМ (см. рис. 5).

Очевидно, что распределение твердости (флуктуации) СМ в зоне сводообразования на участке ВС ( $L_{uc}$ ) носит случайный характер и, следовательно, сила сводообрушения  $F$  также носит случайный характер, который можно установить лишь на базе многочисленных экспериментальных данных для конкретных бункеров и типов СМ.

При математическом описании динамики исследуемого комплекса (см. рис. 2) можно не учитывать динамический процесс флуктуации подвижных звеньев редуктора 4, цепи 10, звездочек 8 и 9, валов 5 и 6. Это обусловлено тем, что колебания, создаваемые указанными элементами, эффективно и в полной мере гасятся на участке ВС, где рабочий орган 11 (см. рис. 2) находится в контакте с сыпучей средой в полости бункера 12, являющейся по своей физической сути мощнейшим демпфером сухого трения.

При непостоянстве параметров  $F(x)$  и  $N(x)$  в расчеты довольно часто вводят среднюю мощность  $N_{cp}$  за конечный промежуток времени, в данном случае  $\tau_{BC}$ , в течение которого сила  $F(x)$  совершает работу  $A_{BC}$ :

$$\left. \begin{aligned} A_{BC} &= \int_0^{L_{uc}} F(x)dx = \int_0^{\tau_{BC}} F[x(\tau)]\dot{x}d\tau \\ N_{cp} &= \frac{A_{BC}}{\tau_{BC}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При этом следует отметить, что неизвестность закона случайного распределения  $F(x)$  не позволяет воспользоваться методами статистической механики, причем принятие наиболее употребительных законов распределения случайных величин (Гаусса, Релея и др.) не обеспечивает стопроцентной точности расчетов, так же как и применение в них среднего значения  $N_{cp}$  из (2). Также нецелесообразно управление мощностью, развиваемой электродвигателем в процессе обрушения свода, по причинам производственного и экономического характера.

В исследуемом комплексе с одной степенью свободы в качестве обобщенных координат и скорости принят угол поворота  $\varphi$  и угловая скорость  $\dot{\varphi}$  ведущей звездочки 1. Тогда для этой системы уравнение Лагранжа II рода принимает вид [2, 3]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q, \quad (3)$$

где  $T$  – кинетическая энергия;  $Q$  – обобщенная сила.

Кинетическая энергия всего комплекса представлена в виде суммы кинетических энергий ведущей звездочки 1 с валом 2 ( $T_{1,2}$ ), ведомой звездочки 3 с валом 4 ( $T_{3,4} = T_{1,2}$ ), органа 5 ( $T_5$ ) и цепи 6 с массой  $\gamma$  одного погонного метра ( $T_6$ ):

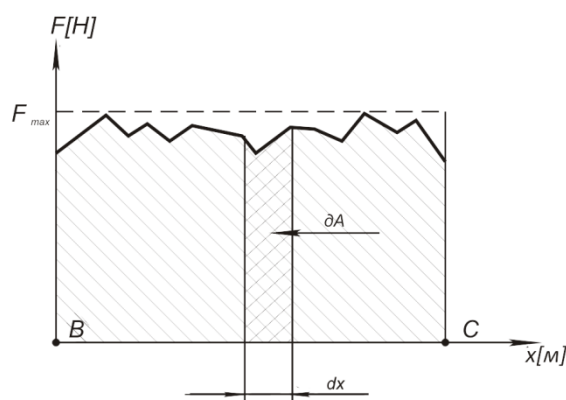


Рисунок 5 – Характерный вид распределения усилия сводообрушения на участке ВС в бункере ( $\partial A$  – элементарная работа, совершаемая сводообрушающим органом при перемещении на малую величину  $dx$ )

$$T = T_{1,2} + T_{3,4} + T_5 + T_6.$$

Здесь:  $T_{1,2} = T_{3,4} = \frac{J_{01} \cdot \dot{\varphi}^2}{2}$ , где  $J_{01} = \frac{(m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot r_2^2)}{2}$  - моменты инерции ведущей звездочки 1 относительно оси вращения  $O_1$  (ведомой звездочки 3 относительно оси вращения  $O_2$ ).

Или: 
$$T_{1,2} = T_{3,4} = \frac{1}{4}(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2) \cdot \dot{\varphi}^2; \quad T_5 = \frac{m_5 \cdot \dot{x}^2}{2}.$$

При расчете  $T_6$  учитывается, что часть цепи  $O_1 O_2$  движется поступательно ( $T_{6n}$ ), а часть цепи длиной  $2\pi r_1$  вращается вокруг оси, проходящей через центр условного кольца, образуемого полукольцами цепи б, расположенными за центрами  $O_1$  и  $O_2$  ( $T_{6e}$ ), то есть:  $T_6 = T_{6n} + T_{6e}$ .

Тогда с учетом: 
$$m_{6n} = 2\gamma(L + 2a),$$

$$m_{6e} = 2\gamma \cdot \pi \cdot r_1; \quad T_{6n} = \gamma(L + 2a) \cdot \dot{x}^2; \quad T_{6e} = \gamma \cdot \pi \cdot r_1^3 \cdot \dot{\varphi}^2.$$

Получим кинетическую энергию всей цепи б:

$$T_6 = \gamma[(L + 2a) \cdot \dot{x}^2 + \pi \cdot r_1^3 \cdot \dot{\varphi}^2].$$

Суммирование найденных ранее кинетических энергий отдельных звеньев комплекса приведено к виду:

$$T = \frac{1}{2}(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2) \cdot \dot{\varphi}^2 + \frac{m_5 \dot{x}^2}{2} + \gamma[(L + 2a) \cdot \dot{x}^2 + \pi \cdot r_1^3 \cdot \dot{\varphi}^2].$$

Или с учетом  $\dot{x} = \dot{\varphi} \cdot r_1$ :

$$T = \frac{\dot{\varphi}^2}{2} \cdot [m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_5 r_1^2 + \gamma \cdot r_1^2 (L + 2a + \pi \cdot r_1)].$$

Введя обозначение приведенного момента  $J_{np}$ :

$$J_{np} = r_1^2 \left[ m_1 + m_5 + m_2 \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot \gamma(L + 2a + \pi \cdot r_1) \right]$$

с приведенной массой системы  $m_{np}$ :

$$m_{np} = m_1 + m_5 + m_2 \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot \gamma(L + 2a + \pi \cdot r_1),$$

получим: 
$$T = \frac{J_{np} \cdot \dot{\varphi}^2}{2}. \tag{4}$$

Дифференцируя (4) по  $\varphi$  и  $\dot{\varphi}$ , получим частные производные в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = J_{np} \cdot \dot{\varphi}. \tag{5}$$

Рассмотрим движение сводообрушающего органа 5 комплекса на отдельных участках полного пути AD (рис. 3):

Участок АВ, – участок набора органом 5 под действием момента  $M_p$  скорости от нуля до  $\dot{x}$  до момента  $t_1$ , когда орган 5 вступает в контакт со сводообразованием СМ в бункере. Так как единственным силовым фактором, способным совершить работу, является момент  $M_p$ , то обобщенная сила  $Q_{AB}$  на участке АВ равна:

$$Q_{AB} = M_p. \tag{6}$$

После подстановки (5) и (6) в (3) дифференциальное уравнение движения комплекса на участке АВ запишется в виде:

$$J_{np} \cdot \ddot{\varphi} = M_p.$$

Проведение в данном уравнении ряда преобразований: разделение переменных, интегрирование с учётом начальных условий:

$$t_0 = 0, \varphi(t_0) = 0, \dot{\varphi}(t_0) = 0, \quad (7)$$

позволяет описать движение исследуемого комплекса на участке АВ:

$$\varphi = \frac{M_p}{2J_{np}} \cdot t^2, \quad (8)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{M_p}{J_{np}} \cdot t. \quad (9)$$

В момент  $t_1$ , когда сводообрушающий орган вступает в контакт со сводом СМ, выполняются условия:

$$t = t_1, \varphi(t_1) = \frac{a}{r_1}, \dot{\varphi}(t_1) = \frac{\dot{x}}{r_1}, \quad (10)$$

а необходимый вращательный момент редуктора  $M_p$  определяется из соотношения:

$$M_p = \frac{\dot{x}^2 \cdot J_{np}}{2r_1 \cdot a}. \quad (11)$$

Участок ВС, - участок равномерного движения органа 5 со скоростью  $\vec{\dot{x}}$  в течение времени  $t_2$  в условиях противодействия этому движению силы  $F_w$  со стороны сводообразования СМ.

При равномерном и прямолинейном движении сводообрушающего органа на участке ВС в момент  $t_2$  (точка С) выполняются условия:

$$t = t_2; x(t_2) = L; \dot{x}(t_2) = \dot{x} = const. \quad (12)$$

На участке ВС, также как и на участке АВ, силы  $\vec{G}_1, \vec{G}_2, \dots, \vec{G}_6$  не совершают работы вследствие их перпендикулярной направленности движению органа 5.

Несложно показать, что обобщенная сила  $Q_{BC}$  на участке ВС равна:

$$Q_{BC} = M_p - F \cdot (r_1 + h).$$

В точке С пути АД контакт органа 5 со сводом СМ прекращается, начинается торможение, а управляющий момент  $M_p$  меняет знак на противоположный, то есть сменяется моментом сопротивления  $M_c$ .

Следовательно, в точке С обобщенная сила  $Q_c$  равна:

$$Q_c = M_c. \quad (13)$$

Дифференциальное уравнение движения исследуемого комплекса на участке ВС имеет вид:

$$J_{np} \cdot \ddot{\varphi} = M_p - F(r_1 + h). \quad (14)$$

С учётом этого при заданных конструктивно  $h, r_1, a$  требуемая скорость на участке ВС равна:

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{2r_1 a}{J_{np}} \cdot F(r_1 + h)}. \quad (15)$$

При наличии фиксированной скорости  $\dot{x}$  из решения (15) несложно определить требуемые для этого параметры  $h$  и  $r_1$ :

$$h = \frac{M_p}{F} - r_1; \quad r_1 = \frac{h}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{2\dot{x}^2 \cdot J_{np}}{F \cdot a \cdot h^2}} - 1 \right).$$

Участок CD, - участок снижения скорости органа 5 в течение времени  $t_3$  до нуля вследствие изменения в точке С момента  $M_p$  на противоположный.



На участке CD движение органа 5 от точки D к точке C происходит с набором скорости от нуля до  $\vec{x}$ . Причем далее процесс движения повторяется полностью (как в ранее рассмотренном движении органа 5 от точки B к точке C), но в обратном направлении: движение органа 5 от точки C до точки B – есть равномерное движение со скоростью  $\vec{x}$ , а от точки B до точки A – происходит процесс торможения.

С учетом изложенного дифференциальное уравнение движения комплекса на участке CD представимо в виде:

$$J_{np} \cdot \ddot{\varphi} = M_c. \quad (16)$$

Интегрируя (16) методом разделения переменных, получим решение в виде:

$$\varphi = \frac{M_c}{2J_{np}} \cdot t^2 + C_3 t + C_4, \quad (17)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{M_c}{J_{np}} \cdot t + c_3. \quad (18)$$

Произвольные постоянные интегрирования  $C_3$  и  $C_4$  найдены из начальных условий, являющихся конечными на участке BC:

$$t_0 = 0; \varphi(t_0) = 0, \dot{\varphi}(t_0) = \frac{\dot{x}}{r_1}. \quad (19)$$

В момент  $t = t_3$  (точка D) выполняются условия:

$$t = t_3; \varphi(t_3) = \frac{\alpha}{r_1}; \dot{\varphi}(t_3) = 0. \quad (20)$$

Последующие преобразования позволяют представить момент инерции  $M_c$  в следующем виде:

$$M_c = -\frac{\dot{x} \cdot J_{np}}{2r_1 \cdot a}. \quad (21)$$

Из сравнения (21) и (11) следует, что моменты, приложенные к ведомому звену 3, на участках AB и CD отличаются только знаками. Следовательно, в точке C направление момента  $M_p$  надо изменить на противоположное. В точке D скорость органа 5 становится равной нулю, а затем растет и в точке C становится равной  $\dot{x}$ . С этой скоростью сводообрушающий орган 5 движется до точки B. Здесь направление момента  $M_p$  следует изменить на противоположное, и в точке A скорость органа 5 становится снова равной нулю. Далее процесс повторяется в обратном направлении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламов, А.В. Конструкция и динамика механизмов предотвращения и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска сыпучих материалов: монография [Текст] / А.В. Варламов – Самара: СамГУПС, 2010. – 231с.:ил.
2. Добронравов, В.В. Курс теоретической механики: учебное пособие [Текст] / В.В. Добронравов, Н.Н. Никитин – М.: Высшая школа, 1983. – 575с.
3. Бухгольц, Н.Н. Основной курс теоретической механики. – Часть II.: учебное пособие [Текст] / Н.Н. Бухгольц. – М.: Наука, 1972. – 331с.

**Варламов Александр Васильевич**

Самарский государственный университет путей сообщения  
 Кандидат технический наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы»  
 443066, Самара, 1-ый Безымянный пер., 19  
 Тел.: 8-963-916-06-34  
 E-mail: om46@mail.ru

**Мулюкин Олег Петрович**

Самарский государственный университет путей сообщения  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная графика»  
Заслуженный изобретатель Российской Федерации, Заслуженный деятель науки Российской Федерации  
443066, Самара, 1-ый Безымянный пер., 19  
Тел.: 8-963-916-06-34  
E-mail: om46@mail.ru

---

A.V. VARLAMOV, O.P. MULJUKIN

**METHODOLOGY OF CALCULATION AND VARIATION INDEX LIMITS OF DYNAMIC SYSTEM QUALITY “BULK STORAGE BUNKER – EASY COLLAPSE MECHANISM”**

*Features of calculation and rational choice of indicators of dynamic quality of system «the Bunker of a loose material - svodo-obrushajushchy the mechanism», the Samara region introduced in agriculture are characterized the constructive decision.*

**Keywords:** *the bunker of storage of a loose material; сводообразование; svodoob-rushajushchy the mechanism; the electric motor; a reducer; chain transfer; kinetic energy; the generalized coordinates; speed and force; the resulted moment of inertia; an angle of rotation and angular speed of leading and conducted shaft.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Varlamov, A.V. Konstrukcija i dinamika mehanizmov predotvraenija i ustranjenja svodoobrazova-nij v bunkerah hranenija i vypuska sypuchih materialov: monografija [Tekst] / A.V. Varlamov – Samara: Sam-GUPS, 2010. – 231s.:il.
2. Dobronravov, V.V. Kurs teoreticheskoj mehaniki: uchebnoe posobie [Tekst] / V.V. Dobronravov, N.N. Nikitin – M.: Vysshaja shkola, 1983. – 575s.
3. Buhgol'c, N.N. Osnovnoj kurs teoreticheskoj mehaniki. – Chast' II.: uchebnoe posobie [Tekst] / N.N. Buhgol'c. – M.: Nauka, 1972. – 331s.

**Varlamov Aleksandr Vasilievich**

Samara state university of communication lines  
Candidate of technical sciences, associated professor, Department “Railway stations and junctions”  
443066, Samara, 1-y Bezymjanny per., 19  
Tel.: 8-963-916-06-34  
E-mail: om46@mail.ru

**Muljukin Oleg Petrovich**

Samara state university of communication lines  
Doctor of technical science, professor, head of department “Engineering graphics”  
Honored inventor of the Russian Federation, honored science worker of the Russian Federation  
443066, Samara, 1<sup>st</sup> Bezymjanny per., 19  
Tel. 8-963-916-06-34  
E-mail: om46@mail.ru

Д.А. КОРОСТЕЛЁВ, В.Ф. ХАРЛАМОВ

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ КВАНТОВЫЕ АНТИТОЧКИ

*Исследованы электрические свойства структуры, состоящей из двух плоских электродов и шарообразных наночастиц металлов Si или Ni в виде монослоя между ними при наличии полупроводниковых структур (квантовых антиточек), расположенных в области контактов наночастиц с электродами. Установлено значительное влияние поверхностных электронных состояний квантовых антиточек на их электропроводность. В случае высокой проводимости антиточек увеличение электрического напряжения приводит к насыщению тока. В случае их меньшей проводимости при увеличении электрического напряжения электрическое сопротивление структуры скачком увеличивается в  $10^4$  раз (обратно).*

**Ключевые слова:** наногетерогенная структура; квантовая антиточка; трехмерный потенциальный барьер; отрицательное дифференциальное сопротивление; «точечный» контакт шарообразных частиц; двойная инжекция электронов и дырок.

В магнитном поле вокруг структуры нанометровых размеров, образующей трехмерный потенциальный барьер для электронов («квантовой антиточки»), возникают дискретные электронные состояния, что используют в квантовых интерферометрах [9,10]. Известны теоретические и экспериментальные работы, посвященные изучению механизмов электропроводности наногетерогенных структур (см., например, [3, 4, 7, 11]).

Цель настоящей работы состояла в изучении механизма электропроводности наногетерогенной структуры (НГС), состоящей из двух плоских электродов и шарообразных частиц металла диаметром  $\sim 100$  нм в виде монослоя между ними при наличии квантовых антиточек, расположенных в области «точечных» контактов шарообразных наночастиц с электродами.

Метод создания квантовых антиточек основан на эффекте распыления оксидов металлов атомарным водородом [2, 6, 8]. Он заключается в выдержке НГС в среде атомов H. При этом происходит восстановление и распыление оксидных плёнок толщиной 1 – 10 нм на поверхности частиц и электрода за исключением недоступных для атомов участков плёнок в области контактов, по оценке, диаметром 3–6 нм. Высота образовавшейся между частицей и электродом цилиндрической структуры, состоящей из остатков двух оксидных плёнок, равна 2-20 нм, а диаметр (различный вдоль оси цилиндра) равен 2-8 нм. В результате происходит образование полупроводниковых цилиндров с концентрацией до  $10^{15} \text{ м}^{-2}$ . При этом каждый цилиндр имеет два электрических контакта: с металлической частицей и электродом. На границах этого цилиндра с электродом и частицей существуют потенциальные барьеры для электронов проводимости металлов. Поэтому созданную цилиндрическую структуру можно рассматривать как квантовую антиточку. При этом длина волны де Бройля электронов проводимости цилиндра (в полупроводниках она 10-100 нм) превышает его линейные размеры.

Вследствие эффекта поля увеличение разности потенциалов между электродами НГС приводит к появлению потенциальных ям для электронов и дырок на границе между оксидными плёнками квантовых антиточек. Их количество (одна или две) и их параметры зависят от толщин плёнок, величины электрического напряжения, ширины запрещенных зон оксидов и положения уровня Ферми в них. Возникновение одной ямы (рис. 1a) и туннелирование электрона в одно из состояний внутри ямы (пунктирная стрелка на рисунке) могут служить причиной подобия электрических свойств антиточки электрическим свойствам квантовой точки. В случае двух ям для электронов и дырок (рис. 1b) могут выполняться условия для двойной инжекции электронов и дырок вследствие туннельных переходов. При этом внутри квантовых антиточек возникает рекомбинация электронов с дырками.

В опытах использовали частицы меди и никеля, содержащие на своей поверхности тонкие оксидные слои ( $\text{CuO}_2$  или, соответственно,  $\text{NiO}$ ). Частицы имели форму шара со средним диаметром 100 нм и удельной поверхностью  $15 \text{ м}^2/\text{г}$ . Доля инородных примесей в

них не более  $5 \times 10^{-4}$ . Electroдами служили плёнки алюминия на поверхности полированных кристаллов кремния. Взвешенные в изопропиловом спирте частицы выдерживали (осадили), затем верхнюю часть взвеси наносили на поверхность электрода и высушивали на воздухе. На слой частиц с максимальным диаметром от 70 до 130 нм сверху помещали второй электрод. Площадь его контакта с частицами составляла  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Поверхность электродов и нанесённые на электрод частицы исследованы с помощью атомно-силового микроскопа *SMM-2000*, оптического микроскопа *Axioscop 2MAT* и электронного микроскопа. Высота выступов (зерен) на поверхности электродов не превышала 80 нм. Частицы, нанесённые на поверхность электрода, образовывали двумерные кластеры, при этом степень покрытия поверхности частицами составляла от 0.7 до 0.95.

НГС помещали в вакуумную камеру и измеряли вольтамперную характеристику (ВАХ) при температуре 295 К и давлении воздуха  $10^5$  Па. Затем воздух откачивали и в среде спектрально чистого водорода при давлении 70 Па с помощью высокочастотного разряда получали атомы *H* с концентрацией  $10^{18}$  м<sup>-3</sup>. Далее НГС выдерживали в среде атомов *H* до 3 ч. В других опытах верхний электрод временно поднимали с помощью электромагнита и электроды с нанесёнными частицами выдерживали в среде атомов *H* до 3 ч, затем электрод опускали. Включая и выключая источник атомов *H*, наблюдали влияние адсорбции или десорбции атомов на поверхности НГС на её электропроводность. После этого в вакуумную камеру напускали воздух с давлением  $10^5$  Па (с целью окисления молекулами *O*<sub>2</sub> избыточного металла на поверхности НГС) и снова измеряли ВАХ при температуре 295 К. Часть опытов выполнена с использованием аналого-цифровых преобразователей, используемых для измерений тока и напряжения, при этом увеличение и уменьшение напряжения на НГС осуществляли с постоянной скоростью  $10^{-2}$  – 1 В/с.

Сопротивление прямого контакта электродов (без нанесённых частиц) равнялось 2.8 Ом, при этом форма ВАХ – линейная. Это означает, что толщины оксидных плёнок на поверхности электродов меньше длины волны де Бройля электронов в металлах (не более 1 нм). До обработки атомарным газом НГС имели электрическое сопротивление  $10^3$  Ом (в случае частиц *Ni*) и  $10^6$  Ом (в случае частиц *Cu*). Для них форма ВАХ – сверхлинейная: при увеличении напряжения дифференциальное сопротивление монотонно уменьшается. Различие приведённых сопротивлений обусловлено разной толщиной оксидных плёнок на поверхности частиц *Ni* и *Cu*. В процессе выдержки НГС или её электродов с нанесёнными частицами в среде атомов водорода сопротивление НГС монотонно уменьшается до 5 - 8 Ом, при этом форма ВАХ изменяется.

Когда сопротивление НГС составляет  $\sim 10^3$  Ом, на ВАХ после начального увеличения силы тока с ростом напряжения наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления, при этом его величина приближается к нулю при увеличении силы тока (обратно). Когда сопротивление НГС составляет  $10 - 10^2$  Ом вначале ток увеличивается при увеличении напряжения по линейному закону, затем при увеличении напряжения до некоторого критического значения величина тока скачком (за время менее 1 с) уменьшается в  $10^4$  раз, при этом одновременно скачком увеличивается напряжение на НГС на 5 - 10 В. В случае НГС с частицами *Cu* последующее уменьшение напряжения приводит к частичному восстановлению электропроводности НГС, при этом наблюдается его запаздывание (рис. 2).

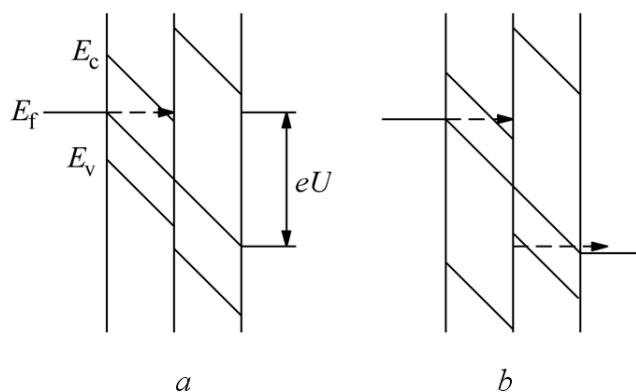
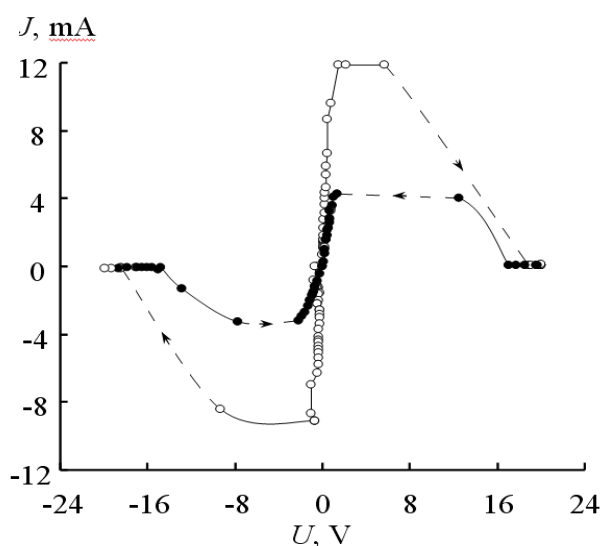


Рисунок 1 – Возможные варианты (а и б) электронных состояний в системе двух тонких полупроводниковых плёнок, контактирующих между собой и металлическими электродами, при разности потенциалов  $U$  между электродами

$E_f$ ,  $E_c$ ,  $E_v$  – уровни Ферми, дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, соответственно.

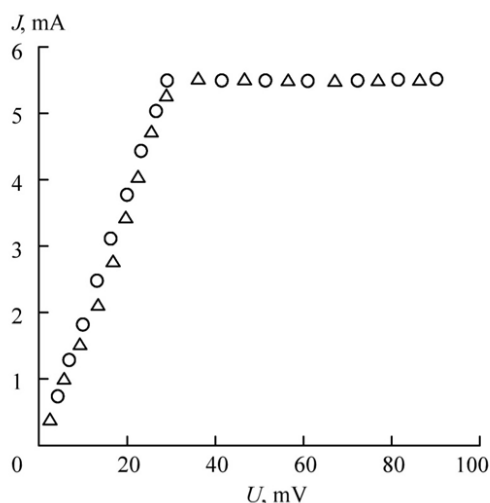
Пунктирные стрелки обозначают туннельные переходы.



**Рисунок 2 – Зависимость силы электрического тока через структуру «алюминий – слой частиц меди – алюминий» от электрического напряжения между алюминиевыми электродами. Светлые и чёрные кружочки – увеличение и уменьшение напряжения, соответственно**

Пунктиром обозначены скачкообразные изменения тока и напряжения. После обработки атомарным водородом алюминиевых электродов с нанесенными частицами Si в течение 0.5 ч.  $T = 295 \text{ K}$ .

частиц с электродами, а также увеличением плотности поверхностных донорных состояний в оксидных полупроводниковых плёнках [5, 6]. Полученные нами результаты отличаются от данных аналогичных экспериментов с тонкими оксидными плёнками, в которых движение



**Рисунок 3 – Зависимость силы электрического тока через структуру «алюминий – слой частиц никеля – алюминий» от электрического напряжения между алюминиевыми электродами**

Кружочки – увеличение напряжения; треугольники – его уменьшение. После обработки атомарным водородом алюминиевых электродов с нанесенными частицами Ni в течение 0.5 ч.  $T = 295 \text{ K}$ .

В случае НГС с частицами Ni уменьшение напряжения не приводит к восстановлению электропроводности, переход из непроводящего в проводящее состояние обеспечивает только смена полярности напряжения. После уменьшения под действием атомов H сопротивления НГС до 5 - 8 Ом на ВАХ наблюдается насыщение тока: вначале с ростом напряжения сила тока увеличивается по линейному закону, затем не зависит от него (рис. 3).

В случае НГС с сопротивлением  $10 - 10^2 \text{ Ом}$  включение и последующее выключение потока атомов H сопровождается значительным плавным увеличением и, соответственно, уменьшением электропроводности НГС в связи с адсорбцией атомов H на её поверхности и последующей их десорбции. Адсорбция молекул кислорода вызывает существенное уменьшение электропроводности НГС.

Изменение сопротивления НГС и формы ВАХ под действием атомов H обусловлено формированием квантовых антиточек в области «точечных» контактов шарообразных носителей тока квантовано в одном направлении (см., например, [4]). Следовательно, трёхмерное квантование движения электронов в антиточках существенно влияет на форму ВАХ.

Электрическая ёмкость квантовой антиточки, по оценке, равна  $10^{-19} \text{ Ф}$ . Поэтому захват одного электрона акцепторным электронным состоянием малого радиуса, расположенным в оксидной плёнке частицы, сопровождается существенным изменением электрического потенциала антиточки (на  $\sim 1 \text{ В}$ ). В результате этого резко меняется величина потенциального барьера для электронов, проходящих сквозь антиточку. При постепенном увеличении напряжения на НГС происходит смещение вниз акцепторного уровня в диаграмме электронных состояний до тех пор, пока его положение не совпадёт с уровнем Ферми катода. После этого, благодаря туннельному эффекту, электроны переходят из катода на акцепторные уровни антиточек. Поэтому эффект скачкообразного перехода НГС в непроводящее состояние, вероятно, вызван кулоновской блокадой, обусловленной захватом электронов акцепторными центрами квантовых антиточек в результате туннельного эффекта. При этом одновременное скачко-

образное увеличение напряжения на НГС (см. рис. 2) на  $\Delta U = R\Delta J = 5 - 10$  В, где  $R$  - сопротивление НГС;  $J$  – сила тока через НГС, обеспечивает сохранение заряда антиточек. Это возможно благодаря тому, что толщина оксидной пленки на поверхности частиц  $Cu$  и  $Ni$  относительно велика, а проводимость антиточек обусловлена прыжками электронов между поверхностными состояниями. При уменьшении напряжения или смене его полярности переход из непроводящего состояния в проводящее состояние антиточек происходит в результате делокализации захваченных электронов. При этом форма гистерезиса на ВАХ зависит от положения акцепторного уровня в запрещенной зоне оксидной плёнки.

В случае макроскопических полупроводников насыщение тока, аналогичное обнаруженному нами эффекту (см. рис. 3), обусловлено возникновением электрического домена в области статистической неоднородности примеси, роль которой может выполнять электрод. Эффект является следствием флуктуационной неустойчивости горячих электронов и заключается в возникновении пространственной неоднородности напряженности электрического поля. При этом всё изменение напряжения на образце приходится на домен, размеры которого изменяются соответственно [1]. Обнаруженный эффект насыщения тока (см. рис 3), вероятно, имеет другую природу.

В этом случае, благодаря увеличению плотности поверхностных донорных состояний в оксидных плёнках под действием атомов  $H$  [5, 6] и увеличению концентрации носителей тока - электронов, уровень Ферми оксидной плёнки частицы расположен в запрещенной зоне вблизи её дна зоны проводимости, при этом её акцепторные уровни заполнены электронами. При увеличении напряжения смещение вниз дна потенциальной ямы, обусловленной эффектом поля, происходит до тех пор, пока его положение не совпадёт с уровнем Ферми катода (см. рис. 1а). Этому напряжению соответствует точка излома на ВАХ (см. рис. 3). После этого, благодаря туннельному эффекту, электроны катода переходят в потенциальные ямы антиточек. При этом из-за малой электрической ёмкости антиточки происходит увеличение энергии электронов: диаграмма электронных состояний антиточки смещается вверх относительно уровня Ферми катода. Это смещение приводит к увеличению вероятности обратного перехода электрона в катод. Из-за малой глубины потенциальной ямы вероятность обнаружить электрон в яме мала. Поэтому увеличение напряжения на НГС на величину  $\Delta U = R\Delta J = RJ = 30$  мВ (см. рис. 3), не обеспечивает сохранение заряда антиточек: потенциальные ямы антиточек остаются в незаряженном состоянии. В результате отрицательной обратной связи при увеличении напряжения на НГС свыше 30 мВ диаграммы электронных состояний антиточек сохраняют постоянное положение относительно уровня Ферми катода. В связи с этим при увеличении напряжения на НГС количество проходящих сквозь антиточки электронов не увеличивается, ток через НГС остаётся постоянным. При этом падение напряжения на квантовых антиточках не изменяется, всё увеличение напряжения приходится на металлические частицы НГС.

ВАХ, содержащая участок отрицательного дифференциального сопротивления, приближающегося к нулю при увеличении силы тока, наблюдается у структуры «металл- диэлектрик-металл» с шарообразными наночастицами  $Al_2O_3$  или  $ZrO_2$  в качестве диэлектрика [7]. Эффект, вероятно, обусловлен двойной инжекцией электронов и дырок, благодаря которой уменьшается дебаевский радиус экранирования и, следовательно, ширина туннельного барьера для электронов [7]. В случае НГС такое же явление, вероятно, также является следствием двойной инжекции электронов и дырок в антиточки. Механизм этого явления иллюстрирует пример квантовых антиточек, в которых при наложении поля возникают две потенциальные ямы для электронов и дырок (см. рис. 1b). В случае захвата электрона антиточкой увеличивается вероятность туннелирования дырки в антиточку. В случае захвата дырки антиточкой увеличивается вероятность туннелирования электрона в антиточку. Следовательно, при увеличении силы тока через структуру туннельные барьеры для электронов и дырок становятся более прозрачными, что соответствует уменьшению отрицательного дифференциального сопротивления НГС.

Таким образом, установлены уникальные электрические свойства НГС.

Авторы благодарны Богоразу И. Г. и Миловидовой О. А. за помощь в работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. – М: Наука, 1990. – С. 551.
2. Измайлов, Ш.Л. Кинетика и катализ / Ш.Л. Измайлов, В.Ф. Харламов // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 23. – № 5. – С. 1179-1182.
3. Рожанский, И.В. ФТП / И.В. Рожанский, Д.А. Закгейм // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 39. – № 5. – С. 608-615.
4. Семёнов, А.А. Вольтамперные характеристики структур металл-окисел-окисел-металл с несколькими участками отрицательного дифференциального сопротивления / А.А. Семёнов, Д.Ф. Усанов // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – № 18. – С. 9-13.
5. Харламов, В.Ф. Поверхность / В.Ф. Харламов. – 1990. – №11. – С. 151-154.
6. Харламов, В.Ф. Рекомбинация атомов на поверхности твердых тел и сопутствующие эффекты / В.Ф. Харламов. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 207 с.
7. Харламов, В.Ф. Электропроводность структуры металл-диэлектрик-металл со слоем наночастиц оксидов металла в качестве диэлектриков / В.Ф. Харламов, Д.А. Коростелев, И.Г. Богораз, О.И. Марков, Ю.В. Хрипунов // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 11. – С. 43-50.
8. Харламов, В.Ф. Рекомбинация преадсорбированных радикалов на поверхности твердых тел в среде диссоциированного углекислого газа и сопутствующие эффекты / В.Ф. Харламов, Л.Ю. Фроленкова, Т.С. Рогожина // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – № 10. – С. 90-94.
9. Camino, F.E. Experimental realization of Laughlin quasiparticle interferometers / F.E. Camino, Wei Zhou, V.J. Goldman // Physica. – 2008. – E 40. – P. 949-953.
10. Goldman, V.J. Resonant Tunneling in Quantum Hall Effect: Measurement of Fractional Charge / V.J. Goldman, B. Su // Science. – 1995. – Vol. 267. – P. 1010-1012.
11. Ioselevich, A.S. Percolation with excluded small clusters and Coulomb blockade in a granular system / A.S. Ioselevich, D.S. Lyubshin // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 90. – С. 746-752

**Коростелев Дмитрий Александрович**  
ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Аспирант кафедры «Физика»  
Тел. 8-920-286-72-93  
E-mail: dimedrol85@list.ru

**Харламов Владимир Фёдорович**  
ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
доктор физико-математических наук, профессор  
Тел. (4862) 41-98-44  
E-mail: kharl@ostu.ru

D.A. KOROSTELEV, V.F. KHARLAMOV

## THE ELECTRONIC PHENOMENA IN HETEROGENEOUS NANOSTRUCTURES CONTAINING QUANTUM ANTIPOINTS

*Electric properties of the structure consisting of two flat electrodes and sharoob-different nanoparticles of metals Cu or Ni in the form of a monolayer between them in the presence of semiconductor structures (quantum antipoints), located in the field of contacts nanoparticles with electrodes are investigated. The considerable influence of the superficial electronic conditions of quantum antipoints on their electrical conductivity is established. In case of high conductivity of antipoints the increase in electric pressure leads to current saturation. In case of their smaller conductivity at increase in electric pressure electric sopro-tivlenie structures jump increases in  $10^4$  (times reversible).*

**Keywords:** heterogeneous nanostructures; a quantum antipoint; a three-dimensional potential hill; the negative differential resistance; "pointwise" contact of conglobate particles; dvojt injection of electrons and holes.

## BIBLIOGRAPHY

1. Bonch-Bruevich, V.L. Fizika poluprovodnikov / V.L. Bonch-Bruevich, S.G. Kalashnikov. – M: Nauka, 1990. – S. 551.

2. Izmajlov, Sh.L. Kinetika i kataliz / Sh.L. Izmajlov, V.F. Harlamov // Pis'ma v ZhTF. – 1982. – T. 23. – № 5. – S. 1179-1182.
3. Rozhanskij, I.V. FTP / I.V. Rozhanskij, D.A. Zakgejm // Pis'ma v ZhTF. – 2005. – T. 39. – № 5. – S. 608-615.
4. Semjonov, A.A. Vol'tampernye karakteristiki struktur metall-okisel-okisel-metall s neskol'ki-mi uchastkami otricateľnogo differencial'nogo soprotivlenija / A.A. Semjonov, D.F. Usanov // Pis'ma v ZhTF. – 2008. – T. 34. – № 18. – S. 9-13.
5. Harlamov, V.F. Poverhnost' / V.F. Harlamov. – 1990. – №11. – S. 151-154.
6. Harlamov, V.F. Rekombinacija atomov na poverhnosti tverdyh tel i soputstvujuwie jeffekty / V.F. Harlamov. – Tomsk: Izd-vo TGU, 1994. – 207 s.
7. Harlamov, V.F. Jelektroprovodnost' struktury metall-dijelektrik-metall so sloem nanochastic ok-sidov metalla v kachestve dijelektrikov / V.F. Harlamov, D.A. Korostel'ov, I.G. Bogoraz, O.I. Markov, Ju.V. Hripunov // Pis'ma v ZhTF. – 2011. – T. 37. – № 11. – S. 43-50.
8. Harlamov, V.F. Rekombinacija predadsorbirovannyh radikalov na poverhnosti tverdyh tel v srede dissociirovannogo uglekislogo gaza i soputstvujuwie jeffekty / V.F. Harlamov, L.Ju. Frolenkova, T.S. Ro-gozhina // ZhTF. – 2001. – T. 71. – № 10. – S. 90-94.
9. Camino, F.E. Experimental realization of Laughlin quasiparticle interferometers / F.E. Camino, Wei Zhou, V.J. Goldman // Physica. – 2008. – E 40. – P. 949-953.
10. Goldman, V.J. Resonant Tunneling in Quantum Hall Effect: Measurement of Fractional Charge / V.J. Goldman, B. Su // Science. – 1995. – Vol. 267. – P. 1010-1012.
11. Ioselevich, A.S. Percolation with excluded small clusters and Coulomb blockade in a granular system / A.S. Ioselevich, D.S. Lyubshin // Pis'ma v ZhJeTF. – 2009. – T. 90. – S. 746-752

**Korostelev Dmitry Aleksandrovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Postgraduate student of department «Physics»  
Tel.: 8-920-286-72-93  
e-mail: dimedrol85@list.ru

**Kharlamov Vladimir Fedorovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Doctor of physico-mathematical science, professor  
Tel.: 4862-41-98-44  
e-mail: kharl@ostu.ru



Ю.Х. ПОЛАНДОВ, В.А. БАБАНКОВ, Н.Ю. ТРУБИХИНА

## О ВЗРЫВЕ ГАЗО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В НЕЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

*Показано, что развитие взрыва газо-воздушной смеси в объеме в значительной степени определяется его не замкнутостью. Исследование проводилось методом компьютерного моделирования взрыва в объеме цилиндрической формы, в котором окно, соединяющее объем и атмосферу, расположено на правом торце, противоположном месту зажигания смеси. Было установлено, что время процесса сокращается в 5 раз, давление снижается приблизительно в 10 раз. Доля выброшенной через окно смеси может достигать 90%.*

**Ключевые слова:** незамкнутый объем, окно, взрыв, газо-воздушная смесь.

### 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались характеристики физического процесса взрыва однородной стехиометрической смеси газов пропан-бутан-воздух, помещённой в цилиндрический объём длиной  $L=1500$  и диаметром  $d=200$  мм. Зажигание смеси производилось с левого торца; на правом торце располагалось окно, диаметр которого увеличивался в каждом опыте от 0 до 0,2 м.

Исследование проводилось методом компьютерного моделирования с использованием программного средства «Вулкан М» [1], который показал свою эффективность и приемлемую адекватность моделирования подобных физических процессов. Вулкан-М основан на решении известной системы уравнений, описывающих фундаментальные законы сохранения в дифференциальной форме применительно к газодинамическим процессам, эта система замкнута уравнением состояния. При численном решении системы использовался отечественный метод крупных частиц [2]. Особенность модели заключена в механизме распространения пламени по смеси [1] использующего известные данные по скоростям нормального горения. Эксперимент состоял из 6 опытов, и он имел целью исследование влияния размеров окна на три характеристики процесса: на время выгорания газо-воздушной смеси, на давление взрыва и на долю смеси, выброшенной через окно в несгоревшем виде.

В модели на расчетную область накладывается регулярная ортогональная сетка, формирующая частицы (ячейки), имеющих форму куба со сторонами  $10 \times 10 \times 10$  мм. Счёт осуществлялся с шагом по времени  $0,5 \times 10^{-7}$  с, так как это необходимо для устойчивости процесса счёта согласно критерию Куранта.

### 2. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОКНА НА ВРЕМЯ ВЫГОРАНИЯ СМЕСИ

Это исследование проведено в связи с предположением, что при наличии окна в стороне противоположной от места зажигания через него появляется расход несгоревшей смеси. За счёт этого в объёме появляется осевая компонента скорости движения смеси, по направлению совпадающая с двумя другими компонентами, нормальной скоростью горения и скоростью движения смеси за счёт роста давления в зоне горения. Совпадение всех трёх компонент скорости должно привести к росту видимой скорости движения фронта горения и уменьшению времени выгорания смеси внутри объёма.

Проверка этой гипотезы осуществлялась при последовательном изменении диаметра окна 0; 0,02; 0,06; 0,1; 0,14 и 0,2 м. Развитие взрыва демонстрируется на визуализированной картине процесса (рис.1) при разных диаметрах окна: 28 и 200 мм. Заметно, что начальной стадии взрыва фронт пламени развивается одинаково независимо от диаметра отверстия.

Это можно объяснить тем, что на начальном этапе избыточное давление в объёме ещё мало и малы скорости истечения через окно, и потому осевые компоненты скорости в обоих случаях ещё сравнимы. Это толкование хорошо согласуется с данными, полученными Моль-

ковым В.В.[3] Однако со временем разница становится существенной из-за роста давления и роста расхода через окно, в случае окна с большим размером фронт пламени продвигается по объёму намного активнее. Кроме того, оказывается, что при этом возрастает и площадь фронта горения, что, опять же, приводит к сокращению времени выгорания.

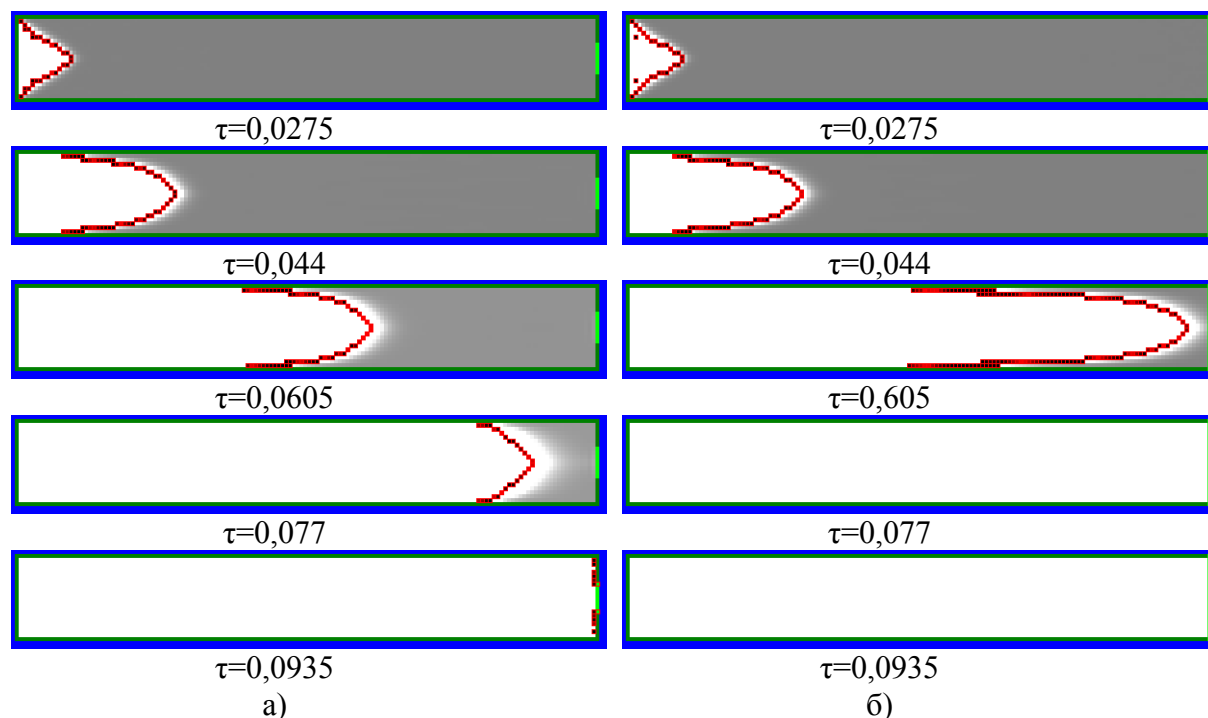


Рисунок 1 – Распространение фронта пламени в незамкнутом цилиндрическом объеме  
а) окно диаметром 28 мм, б) окно диаметром 200 мм

Результаты опытов изображены на графике (рис.2) зависимости времени выгорания от диаметра отверстия в объеме. Как видно из него, результаты эксперимента подтвердили выдвинутую гипотезу и демонстрируют количественную зависимость: в нашем случае время процесса можно сократить в 5 раз, причём влияние наиболее сильно на интервале изменения диаметра окна от 0 до 0,06 м, дальнейшее увеличение размеров окна не приводит к существенному изменению времени выгорания.

Влияние размеров окна на время выгорания, хоть и значительное, но ограниченное.

### 3. ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ОКНА НА ДАВЛЕНИЕ В ОБЪЕМЕ

В соответствии с известными результатами исследований Водяника В.И. увеличение размеров окна приводит к снижению давления взрыва. Данные, полученные в ходе проведения предыдущего эксперимента, подтвердили это предположение. Впрочем, это вполне естественно. Заметим, что давление измерялось в зоне зажигания смеси, то есть у левого торца. Видно, что снижение давления происходит, несмотря на тот факт, что с увеличением окна, как видно из визуализированной картины (рис. 1), увеличивается площадь фронта горения.

Зависимость давления в объёме от диаметра окна изображены на графике (рис. 3). Как и в предыдущем случае, влияние наиболее интенсивно при небольших размерах окна. На

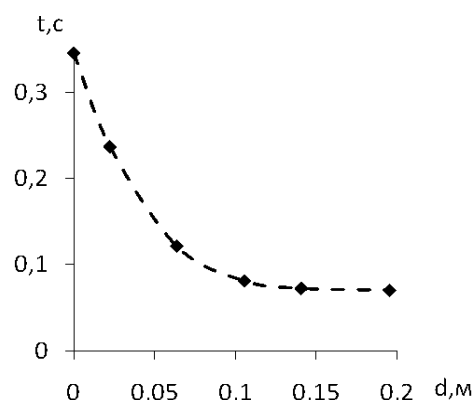


Рисунок 2 – Зависимость времени выгорания газовой смеси от диаметра отверстия.

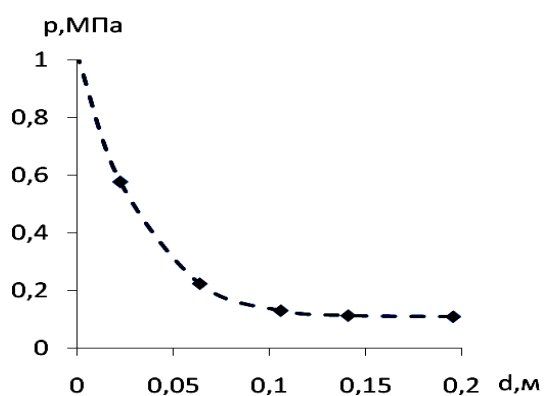


Рисунок 3 – Зависимость давления газовой смеси от диаметра отверстия

ие справедливо только для окон диаметром меньше 65 мм. Дальнейшее увеличение размеров окна не влияет на количество выброшенной смеси, оно практически неизменным, при этом доля выброшенной смеси относительно её массы, находившейся в объёме, около 90%.

Влияние размеров окна на количество выброшенной несгоревшей хоть и значительное, но ограниченное.

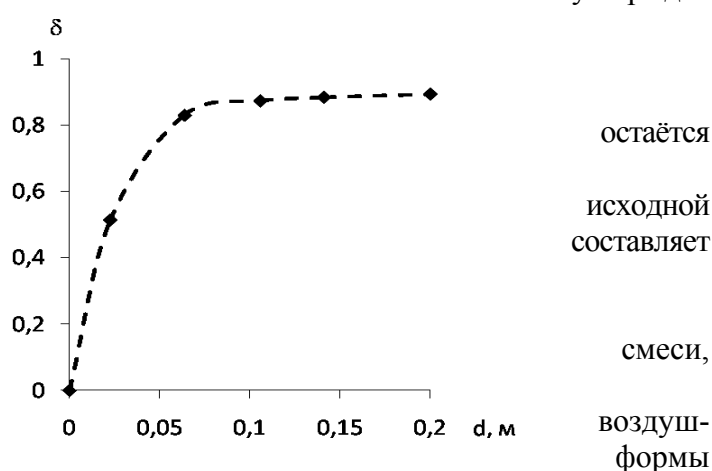
**ВЫВОД.** При взрывах газовой смеси в объёмах цилиндрической формы размеры окна влияют на важнейшие характеристики процесса, такие как время выгорания смеси, давление взрыва и доля выброшенной смеси.

Наиболее заметно влияние при небольших размерах окна.

опытах с диаметром более 65 мм это влияние едва заметно. Давление взрыва в результате полного раскрытия окна, когда его диаметр равен диаметру объёма, снижается в 10 раз.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ОКНА НА ДОЛЮ ВЫБРОШЕННОЙ СМЕСИ

Представляет интерес количество смеси, готовой к горению, но не сгоревшей и выброшенной через окно в результате взрыва. Программное средство позволило решить и эту задачу. На рис. 3 приведены результаты: как и ожидалось, увеличение размеров окна приводит к увеличению выброса несгоревшей смеси в атмосферу (рис. 4). Однако, это утверждено



остаётся  
исходной  
составляет  
смеси,

воздуш-  
формы

Рисунок 4 – Зависимость массы выброшенной смеси от диаметра отверстия

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поландов, Ю.Х. Моделирование процесса горения газо-воздушной смеси методом крупных частиц / Ю.Х. Поландов // Пожаро-взрывобезопасность: Научно-технический журнал ООО «Издательство «Пожнаука», 2007. – № 3.
2. Davydov, Yu. M. Large-particle method // In: Encyclopaedia of Mathematics. Vol. 5. – Dordrecht / Boston / London: Kluwer academic publishers, 1990. – P. 358–360
3. Мольков, В.В. Динамика сгорания газа в постоянном объёме при наличии истечения / В.В. Мольков, Ю.П. Некрасов. – Физика горения и взрыва, 1981. - №4
4. Водяник, В.И. Динамика развития взрывов в замкнутых объёмах / В.И. Водяник. – М.: НИИТЭХИМ, 1982. – 33 с.

#### Поландов Юрий Христофорович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая математика»  
e-mail: polandov@yandex.ru

#### Бабанков Виталий Александрович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Аспирант при кафедре «Высшая математика»  
e-mail: xenos1987@mail.ru

#### Трубихина Надежда Юрьевна

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Ассистент кафедры «Высшая математика»  
e-mail: trubihina.nadejda@yandex.ru

YU.H. POLANDOV, V.A. BABANKOV, N.YU. TRUBIHINA

## ABOUT GAS-AIR MIXTURE EXPLOSION WITHIN OPEN VOLUME OF CYLINDRICAL FORM

*It is shown that development of explosion of a gazo-air compound in volume is substantially defined it not by closure. Research was led by a method komp-juternogo explosion simulations in volume of the cylindrical form in which the window, about volume and atmosphere, is allocated at the right end face opposite to a place of ignition of a compound. It has been installed that process time is reduced in 5 times, pressure decreases approximately in 10 times. The share of the compound thrown out through a window can a dosti-corduoy road of 90 %.*

**Keywords:** not closed volume, a window, explosion, a gazo-air compound

### BIBLIOGRAPHY

1. Polandov, Ju.H. Modelirovanie processa gorenija gazo-vozdushnoj smesi metodom krupnyh chastic / Ju.H. Polandov // Pozharo-vzryvobezopasnost': Nauchno-tehnicheskij zhurnal OOO «Izdateľstvo «Pozhnauka», 2007. – № 3.
2. Davydov, Yu. M. Large-particle method // In: Encyclopaedia of Mathematics. Vol. 5. – Dordrecht / Boston / London: Kluwer academic publishers, 1990. – P. 358–360
3. Mol'kov, V.V. Dinamika sgoranija gaza v postojannom ob#jome pri nalichii istechenija / V.V. Mol'kov, Ju.P.Nekrasov. – Fizika gorenija i vzryva, 1981. - №4
4. Vodjanik, V.I. Dinamika razvitija vzryvov v zamknutyh ob#jomah / V.I. Vodjanik. – M.: NIITJeHIM, 1982. – 33 s.

#### **Polandov Yury Khristoforovich**

State University – Education-Science-Production Complex  
Doctor of technical sciences, professor, Department “High Mathematics”  
302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,  
Tel.: 4862-41-32-95  
e-mail: polandov@yandex.ru

#### **Babankov Vitaly Aleksandrovich**

State University – Education-Science-Production Complex  
Post-graduate student, Department “High Mathematics”  
302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,  
Tel.: 4862-41-32-95  
e-mail: xenos1987@mail.ru

#### **Trubihina Nadezhda Yurievna**

State University – Education-Science-Production Complex  
Assistant, Department “High Mathematics”  
302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,  
e-mail: trubihina.nadejda@yandex.ru

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ С ФРИКЦИОННЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

*Решается оптимизационная задача виброзащиты. Канонические уравнения Гамильтона интегрируются в среде MathCAD с использованием стандартных процедур, применяемых для нахождения функций удовлетворяющих краевым условиям.*

**Ключевые слова:** виброзащитная система, оптимальное управление, фрикционный исполнительный механизм.

При работе машин неизбежно возникает вибрация, которая увеличивает их износ и оказывает неблагоприятное воздействие на оператора. Наиболее распространенным источником нежелательной вибрации являются внешние периодические возмущения, имеющие силовой, либо кинематический характер [1,3].

Для снижения уровня интенсивности вынужденных колебаний наиболее эффективными являются методы активной виброзащиты. Эти методы основаны на формировании компенсационных воздействий, прилагаемых к одному из звеньев машины или её отдельным механизмам [2].

В результате анализа существующих конструкций активных систем виброзащиты была предложена управляемая система (рис. 1), которая состоит из двух оснований, несущего упругого элемента, датчика скорости, блока управления и фрикционного исполнительного механизма. Фрикционный исполнительный механизм позволяет формировать кусочно-постоянное компенсационное воздействие сингулярного типа[5].

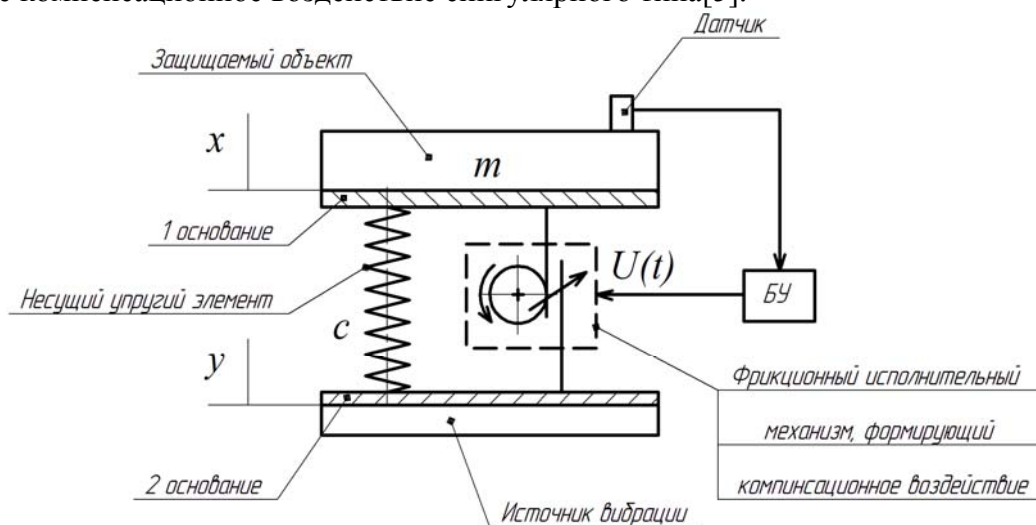


Рисунок 1 – Виброзащитная система с фрикционным исполнительным механизмом.

Исходная математическая модель, которая имитирует работу управляемой системы виброзащиты с фрикционным исполнительным механизмом ограниченной мощности при кинематическом возмущении, записывается в следующем виде:

$$m\ddot{x} + c(x - y) = U(t), \quad (1)$$

где  $|U(t)| \leq U_0$  – компенсационное воздействие;

$x, \ddot{x}$  – координата и ускорение защищаемого объекта;

$y = y_0 \sin \omega t$  – кинематическое возмущение с частотой  $\omega$  и амплитудой  $y_0$ .

Представим уравнение (1) в форме Каши

$$\dot{x}_0 = x_1; \quad (2)$$

$$\dot{x}_1 = u(t) - k^2(x_0 - y).$$

и принимаем интегральный критерий качества, определяющий вибрационную безопасность системы:

$$J = \int_0^T (x_1)^2 dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

Здесь  $k = \sqrt{c \cdot m^{-1}}$  – собственная частота системы;

$u(t) = U(t)/m$  – управление, причем  $|u(t)| \leq u_0 = U_0/m$ ;

$x_0$  и  $x_1$  – фазовые координаты (перемещение и скорость защищаемого объекта).

Ставим следующую оптимизационную задачу – определить оптимальное управление для системы (2), при котором функционал (3) достигает минимального значения на интервале  $0..t..T = 2\pi/\omega$ . Причем, краевые условия  $x(0)$  и  $x(T)$  неизвестны (подлежат определению).

Составим гамильтониан [1]:

$$H = -x_1^2 + p_0 x_1 + p_1 [u(t) - k^2(x_0 - y)], \quad (4)$$

где  $p_0$  и  $p_1$  – присоединенные переменные.

Используя принцип максимума [6]

$$\max_u H = \max_u (p_1 \cdot u), \quad (5)$$

находим структуру оптимального управления:

$$\tilde{u} = \begin{cases} u_0, & p_1 > 0; \\ -u_0, & p_1 < 0. \end{cases} \quad (6)$$

Оптимальное управление (6) можно записать в более компактном виде:

$$u(t) = u_0 \text{sign}(p_1). \quad (7)$$

Для определения фазовых координат и присоединенных переменных, используем канонические уравнения Гамильтона  $\dot{x} = \partial H / \partial p$ ,  $\dot{p} = -\partial H / \partial x$ , которые с учетом подстановки (7) принимают следующий вид [6]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= x_1, \\ \dot{x}_1 &= u_0 \text{sign}(p_1) - k^2(x_0 - y), \\ \dot{p}_0 &= p_1 k^2, \\ \dot{p}_1 &= -p_0 + 2x_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Особенностью данной оптимизационной задачей является то, что краевые условия для фазовых координат не заданы. Поэтому должны выполняться следующие естественные условия трансверсальности [6]:

$$p_0(0) = 0, \quad p_1(0) = 0; \quad p_0(T) = 0, \quad p_1(T) = 0. \quad (9)$$

Как следствие, исходная оптимизационная задача виброзащиты сводится к интегрированию системы уравнений (8) и выполнению условий трансверсальности (9), т.е. к решению краевой задачи.

Для нахождения фазовых координат и присоединенных переменных, обращающих в тождество систему (8), можно воспользоваться стандартными алгоритмами решения соответствующих краевых задач в среде MathCAD [4].

Недостающие условия  $x_0(0) \Rightarrow Vd_0$  и  $x_1(0) \Rightarrow Vd_1$ , необходимые для проведения интегрирование системы (8), можно определить, используя функцию sbvol (см. текст программы на рис. 2). Это позволит сформировать вектор начальных условий  $h(Vd_0, Vd_1, 0, 0)$  и осуществить интегрирование системы уравнений (8), правая часть которой представлена в векторе D.

Исходные данные:  $\omega := 10$   $t1 := 0$   $t2 := 7 \cdot \frac{\pi}{\omega}$   $u0 := 0.5$   $k := 10$   $y0 := 0.03$   $n := 500$

$$v := \begin{pmatrix} 0.001 \\ -0.010 \end{pmatrix} \quad y1(t) := y0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad y2(t) := y0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$D(t, x) := \begin{bmatrix} x_1 \\ -k^2 \cdot (x_0 - y1(t)) + u0 \cdot \text{sign}(x_3) \\ k^2 \cdot x_3 \\ 2 \cdot x_1 - x_2 \end{bmatrix}$$

$$Ld(t1, v) := \begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad sd(t2, x) := \begin{pmatrix} x_2 - 0 \\ x_3 - 0 \end{pmatrix}$$

$$Vd := \text{sbval}(v, t1, t2, D, Ld, sd)$$

$$h := \begin{pmatrix} Vd_0 \\ Vd_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad h = \begin{pmatrix} 0.13 \\ 0.065 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(h, t1, t2, 100, D) \quad u := u0 \cdot \text{sign}(Z^{(4)})$$

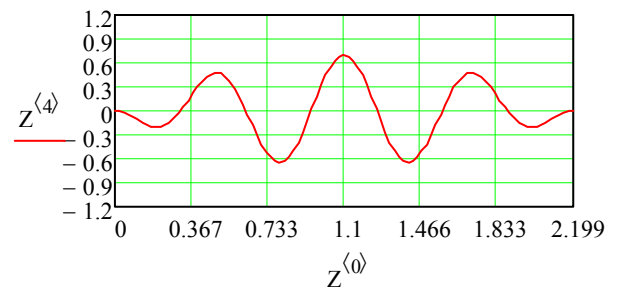
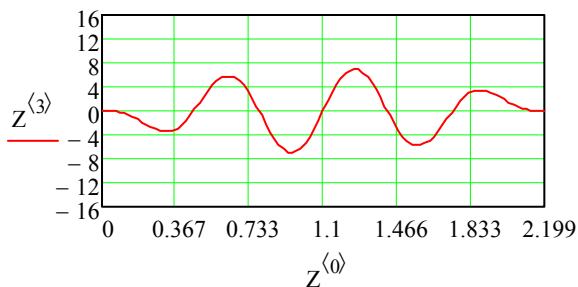
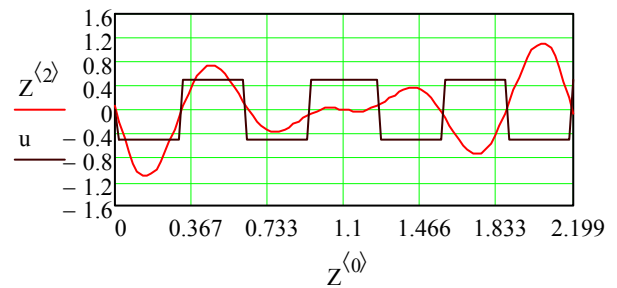
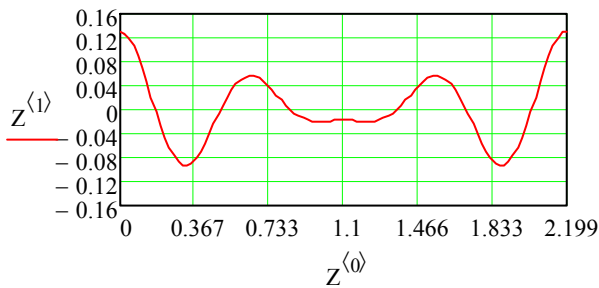


Рисунок 2 – Программа для решения краевой задачи.

$$Z^{(1)} \leftrightarrow x_0; Z^{(2)} \leftrightarrow x_1; Z^{(3)} \leftrightarrow p_0; Z^{(4)} \leftrightarrow p_1; Z^{(0)} \leftrightarrow t; u \leftrightarrow u_0 \cdot \text{sign } p_1.$$

Признаком оптимальности найденных решений является то, что присоединенные переменные в начальной точке и в конечной точке интервала интегрирования равны нулю.

Из сопоставления графиков  $Z^{(2)}$  и  $Z^{(4)} \Rightarrow u = u_0 \cdot \text{sign}(Z^{(4)})$  следует, что оптимальное управление

$$u(t) = u_0 \text{sign}(x_1),$$

т.е. является кусочно-постоянной функцией сингулярного типа с переключениями в момент смены знака скорости защищаемого объекта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаков, И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков – М.: Дрофа, 2004. – 593 с.
2. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман – М.: Высшая школа, 1980. – 406 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – 456 с.

4. Охорзин, В.А. Прикладная математика в системе MathCAD / В.А. Охорзин, учебное пособие. 3-е изд. стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 352 с.

5. Патент РФ № 2429394 Амортизатор / Чернышев В.И., Бузуев В.С., Фомина О.В., Ванин В.С. // Бюл. изобр. – 2011.

6. Фомина, О.В. Экстремальные задачи и оптимизация: введение в теория непрямого импульсного управления процессами колебаний / О.В. Фомина, В.И. Чернышев, Ю.С. Степанов. – М.: Издательский дом «СПЕКТР», 2011 – 218 с.

**Фомина Ольга Владимировна**

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика».

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

**Бузуев Виктор Сергеевич**

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

Аспирант, кафедры «Динамика и прочность машин».

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

E-mail: Victor2821@yandex.ru

**Чернышев Владимир Иванович**

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин».

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

---

O.V. FOMINOVA, V.S. BUZUEV, V.I. CHERNYSHEV

**OPTIMAL CONTROL OF VIBROPROTECTION SYSTEM WITH  
THE FRICTIONAL ACTUATING MECHANISM**

*Optimization problem of vibroprotection is solved. Canonical equations of Hamilton are integrated into MathCAD environment with the use of standard procedures applicable for finding of functions satisfied by edge conditions.*

**Keywords:** vibration isolation system, optimal control, frictional actuator.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Babakov, I.M. Teorija kolebanij / I.M. Babakov – M.: Drofa, 2004. – 593 s.

2. Biderman, V.L. Teorija mehanicheskikh kolebanij / V.L. Biderman – M.: Vysshaja shkola, 1980. – 406 s.

3. Vibracii v tehnikе: Spravochnik. T.2. Kolebanija nelinejnyh mehanicheskikh sistem / Pod red. I.I. Blehmana. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 456 s.

4. Ohorzin, V.A. Prikladnaja matematika v sisteme MathCAD / V.A. Ohorzin, uchebnoe posobie. 3-e izd. ster. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2009. – 352 s.

5. Patent RF № 2429394 Amortizator / Chernyshev V.I., Buzuev V.S., Fominova O.V., Vanin V.S. // Bjul. izobr. – 2011.

6. Fominova, O.V. Jekstremal'nye zadachi i optimizacija: vvedenie v teorija neprjamoogo impul'snogo upravlenija processami kolebanij / O.V. Fominova, V.I. Chernyshev, Ju.S. Stepanov. – M.: Izdatel'skij dom «SPEKTR», 2011 – 218 s.

**Fominova Olga Vladimirovna**

State University – ESPC

Candidate of technical science, associate professor of department «Theoretical and applied mechanics».

302020, Orel, Naugorskoe sh., 29

**Buzuev Viktor Sergeevich**

State University – ESPC

Post-graduate student of department «Dynamics and machine resistance».

302020, Orel, Naugorskoe sh., 29

E-mail: Victor2821@yandex.ru

**Chernyshev Vladimir Ivanovich**

State University – ESPC

Doctor of technical science, professor of department «Dynamics and machine resistance».

302020, Orel, Naugorskoe sh., 29





В работе [2] И.М. Калнина и К.Н. Фадекова также дается оценка эффективности термодинамических циклов. В качестве одного из способов оценки эффективности базового холодильного цикла они предлагают исследовать коэффициент обратимости  $\eta_{T1}$ . Он определяется путем сопоставления холодильного коэффициента  $\varepsilon_{T1}$  (или коэффициента преобразования теплового насоса  $\mu_{T1}$ ) с таким же коэффициентом эквивалентного обратимого цикла:

$$\eta_{T1} = \frac{\varepsilon_{T1}}{\varepsilon_{i\dot{a}\dot{o}}}; \quad \eta_{T1} = \frac{\mu_{T1}}{\mu_{i\dot{a}\dot{o}}},$$

где  $\varepsilon_{T1} = \frac{q_{0T1}}{l_{T1}}; \quad \mu_{T1} = \frac{q_{0T1}}{l_{T1}} = \varepsilon_{T1} + 1,$

где  $q_{0T1}$  - удельная массовая холодопроизводительность, кДж/кг.

$$q_{0T1} = i_{1.3} - i_{1.4} \cong r_0 \left[ 1 - \bar{C}'_x (T_k - T_0) \right],$$

где  $i$  – энтальпия, кДж/кг;

$r_0$  – теплота парообразования рабочего вещества при давлении кипения, кДж/кг;

$\bar{C}'_x$  – приведенная удельная теплоемкость насыщенной жидкости, 1/К;

$T_k$  – температура конденсации, К;

$T_0$  – температура кипения, К;

$q_{T1}$  - удельная массовая теплопроизводительность, кДж/кг;

$$q_{T1} = i_{2.2} - i_{2.6} = q_{0T1} + l_{T1};$$

$l_{T1}$  - удельная работа сжатия цикла, кДж/кг.

$$l_{T1} = i_{2.2} - i_{1.1} \cong \frac{k}{k-1} z_{1.1} RT_{1.1} \left( \pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right),$$

где  $k$  показатель адиабаты (может быть использован показатель конечных параметров процесса по изоэнтропе,

$$\bar{k}_v = \lg \pi_k / \lg \frac{v_{1.1}}{v_{2.2}},$$

где  $\pi_k$  – отношение давлений  $p_k/p_0$ ;

$v$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг);

$z_{1.1}$  – коэффициент сжимаемости.

$$z_{1.1} = \frac{p_{1.1} v_{1.1}}{RT_{1.1}}$$

где  $R$  – газовая постоянная, кДж/(кгК).

Эквивалентный обратимый цикл состоит из двух процессов, совпадающих с изменением температуры источников низкопотенциального и высокопотенциального тепла при теплообмене с рабочим веществом, и двух изоэнтроп – сжатия и расширения рабочего вещества. В общем случае это цикл Лоренса, лишь в частном случае – цикл Карно.

Оценка эффективности реальных циклов базового холодильных циклов проводится в сопоставлении с характеристиками базовых циклов, так как это дает больше возможностей для анализа получаемых соотношений.

Холодильный коэффициент реального цикла

$$\varepsilon_{T2} = \frac{q_{0T2}}{l_{T2}} = \varepsilon_{T1} \psi_{T2};$$

$$\psi_{T2} = \frac{\varepsilon_{T2}}{\varepsilon_{T1}}; \psi_{T2} = \varphi_{T2} \chi_{T2},$$

где  $\varphi_{T2} = \frac{q_{0T2}}{q_{0T1}}; \chi_{T2} = \frac{l_{T1}}{l_{T2}}.$

А коэффициент обратимости для реальных циклов холодильных машин

$$\eta_{T2} = \eta_{T1} \psi_{T2}.$$

В свою очередь профессор А.М. Архаров и др. [3] степень термодинамического совершенства генераторов холода определяют соотношением

$$\left(\zeta_{\text{терм}}\right)_x = \frac{(\varphi_{\min})_x}{(\varphi_D)_x} = \frac{(\varepsilon_D)_x}{(\varepsilon_{\max})_x},$$

где  $(\varphi_D)_x$  и  $(\varepsilon_D)_x$  действительные значения коэффициента удельных затрат мощности  $\varphi$  и холодильного коэффициента  $\varepsilon$  для реальных криогенераторов. Производные величины коэффициентов преобразования по температуре показывают, в каких диапазонах температур они изменяются наиболее сильно, а где – несущественно.

Мартыновский В.С. в труде [4, 5, 6] предлагает сравнивать циклы следующими методами.

**Первый метод.** Циклы сравниваются в одном и том же интервале температур; сопоставляются значения термических к. п. д. и интервалов давлений, получаемых при условии, что все сравниваемые циклы выбираются габаритными. В этом случае сравнение циклов сводится к следующим операциям:

- 1) циклы рассматриваются в одном и том же интервале температур;
- 2) в данном интервале температур выделяются габаритные циклы, т. е. циклы, удовлетворяющие условию получения наибольшей удельной объемной работы;
- 3) сопоставляются значения термических к. п. д. габаритных циклов;
- 4) сопоставляются интервалы давлений в выделенных габаритных циклах.

**Второй метод.** Циклы сравниваются в одном и том же интервале температур и при одном и том же значении удельной объемной работы; при этом сопоставляются значения термических к. п. д. и интервалы давлений в циклах. Сравнение сводится к следующим этапам:

- 1) циклы рассматриваются в одном и том же интервале температур;
- 2) в данном интервале температур определяются габаритные циклы;
- 3) выбирается тот габаритный цикл, который приводит к наименьшей удельной объемной работе по сравнению с другими габаритными циклами, причем в дальнейшем все сравниваемые циклы рассматриваются при этом значении удельной объемной работы;
- 4) сопоставляются значения термических к. п. д. циклов, имеющих одни и те же величины удельной объемной работы;

5) сравниваются интервалы давлений в этих циклах. Чаще всего, используя эти два метода сравнения циклов, можно достаточно полно охарактеризовать циклы и сделать необходимые заключения. Но в некоторых случаях для получения более наглядных результатов целесообразно пользоваться третьим методом.

**Третий метод.** Циклы сравниваются в одном и том же интервале температур и при одинаковых термических к. п. д. Однако цикл Карно в данном случае должен быть исключен из рассмотрения, так как его термический к. п. д. будет выше, чем к. п. д. любого другого цикла, взятого при тех же температурных интервалах. При этом сопоставляются значения интервалов давлений и удельных объемных работ.

В работе [7] автором предлагается производить расчет параметров холодильного агрегата, выделяя рабочую и нерабочую части цикла, исследуя их по отдельности.

Так изменение, например, температуры испарителя, происходит в течение нерабочей части цикла вследствие нагрева его теплом, притекающим от охлаждаемого объекта. Затратой тепла на парообразование можно пренебречь. В течение рабочей части цикла в испарителе понижается температура за счет поглощения тепла кипящим хладагентом.

В нерабочей части цикла в течение промежутка времени  $d_\tau$  к испарителю притекает тепло, расходуемое на его нагрев. Соответственно, длительность нерабочей части цикла (в с) есть:

$$\Delta \tau_H = \frac{1}{\alpha_H} \ln \frac{t_{об} - t_2}{t_{об} - t_1}.$$

Для расчета рабочей части цикла автором предлагается аналитически выразить зависимость холодопроизводительности агрегата от температуры кипения в виде  $Q_0 = \psi(t_0)$ .

В свою очередь длительность рабочей части цикла

$$\Delta \tau_P = \frac{1}{\alpha_P} \ln \frac{t_1 - t_{опв}}{t_2 - t_{опв}}.$$

Температура конденсатора во время рабочего и нерабочего периодов холодильного прибора не равномерна. Следовательно, и температура конденсации тоже изменяется. Характер изменения температуры конденсации  $t_k$  по времени определяется через известные величины  $\Delta \tau_P$  и  $\Delta \tau_H$ , которые определяются по известным зависимостям:

$$\Delta \tau_P = \frac{1}{\alpha_P} \ln \frac{t_{к.пв} - t_{к1}}{t_{к.пв} - t_{к2}}; \Delta \tau_H = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{t_{к2} - t_{окр}}{t_{к1} - t_{окр}},$$

где  $t_{\varepsilon 1}$  и  $t_{\varepsilon 2}$  – температуры конденсации, соответствующие началу и концу рабочей части цикла. Их значения определяются ниже;

$\alpha$  — постоянная, включающая параметры конденсатора  $B$  и  $kF$ , а для рабочей части цикла еще и, параметры, определяющие взаимосвязь тепловой нагрузки с температурой конденсации.

При этом автор заостряет внимание, что не следует забывать и о влиянии вторичных процессов в холодильной машине, вносящих возмущения в начальные периоды рабочей и нерабочей частей циклов. К таким процессам он относит, например, выравнивание давлений в машине с капиллярной трубкой, затопление конденсатора или прорыв пара из конденсатора в испаритель при несбалансированной капиллярной трубке, усиленное поглощение тепла нагревательным трубопроводом в начале рабочей части цикла, влияние воздуха в системе и др. По мнению автора, эти процессы обычно не поддаются расчету, и поэтому на начальных этапах расчета ими пренебрегают.

Что касается исследования колебаний температуры камеры, то в стационарном процессе при непрерывной работе такой холодильной машины, которая в состоянии поддерживать средние температуры  $t_{об.ср}$  и  $t_{u.ср}$ , все тепло, передаваемое от стенок к камере, передается далее от камеры к испарителю.

Тепловой баланс камеры:

$$\alpha_{cm} F_{cm} = (t_{cm} - t_{об.ср}) = \alpha_u F_u (t_{об.ср} - t_{u.ср}).$$

В действительности устанавливают циклично работающую холодильную машину с избыточной производительностью, причем  $t_{uc}$  колеблется вокруг значения  $t_{u.ср}$ , создавая тепло-

вую волну с частотой  $\frac{\lambda}{\Delta \tau} = (0,5 \div 3) 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , быстро затухающую с переходом от одного элемента к другому. Так, обычно амплитуда колебаний  $t_\varepsilon$  составляет 5 – 15, редко до 25° С, а  $t_{об}$  – в 5 – 10 раз меньше. Значение  $t_{cm}$  может быть вообще принято неизменным, так как при разности  $t_{i\delta\delta} - t_{i\delta}$  порядка 30—50° С и амплитуде колебаний  $t_{об}$  порядка 1—2° тепловой поток в изоляции практически является стационарным.

Однако же в нестационарном процессе при циклической работе холодильной машины тепловой баланс камеры составляется в дифференциальной форме:

$$\alpha_{cm} F_{cm} = (t_{cm} - t_{об}) d\tau = B_{об} dt_{об} + \alpha_u F_u (t_{об} - t_u) d\tau$$

отсюда

$$B_{об} \frac{dt_{об}}{d\tau} = \alpha_{cm} F_{cm} = (t_{cm} - t_u) - (\alpha_{cm} F_{cm} + \alpha_u F_u)(t_{об} - t_u).$$

По знаку второй производной было определено, что в рабочую часть цикла, когда  $\frac{dt_u}{d\tau} < 0$ , температура  $t_{об}$  проходит через максимум, а в нерабочую часть цикла, в которой  $\frac{dt_u}{d\tau} \geq 0$  – через минимум.

Также автор отметил, что для улучшения методов расчета необходимо создание общей математической модели холодильника, которая должна включать в себя описание элементов, недостаточно исследованных в настоящее время, например, циклично работающего компрессора, нестационарной теплопроводности ограждений шкафа.

При исследовании термодинамических процессов, связанных с нагревом и охлаждением тела, применяется теория регулярного режима, разработанная Г.М. Кондратьевым [8].

Опираясь на теорию регулярного режима, можно отразить следующее: при охлаждении (нагреве) неограниченной пластины в среде с постоянной температурой  $t_c$  и постоянным коэффициентом теплоотдачи, а (для стадии регулярного режима) установлено, что  $\ln \mathcal{G} = -m\tau + c$

где  $\mathcal{G} = \frac{t - t_c}{t_0 - t_c}$  – избыточная температура тела, равная отношению разности температур тела  $t$  и окружающей среды  $t_c$ , к разности известных температур (например, начальной и окружающей среды);

$m$  – положительное число, характеризующее скорость охлаждения тела, называемое темпом охлаждения,  $1/c$ ;

$\tau$  – длительность процесса;

$c$  – постоянная.

После дифференцирования функции по времени при  $m = const$  получим:

$$\frac{1d\mathcal{G}}{\mathcal{G}d\tau} = -m = const.$$

Из этого следует, что относительная скорость изменения температуры равна темпу охлаждения  $m$ . Темп охлаждения (нагрева) определяется размерами, формой тела, его физическими параметрами и условиями теплообмена на поверхности.

Значение  $m$  можно определить из опыта, установив значение  $V$  для двух моментов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

Величину  $m$  можно найти и из уравнения теплового баланса для системы, состоящей из охлаждаемого тела и среды с постоянной температурой  $t_c$ :

$$-c\rho V \frac{d\bar{\mathcal{G}}_V}{d\tau} d\tau = \bar{\alpha} \bar{\mathcal{G}}_F F d\tau$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;

$V$  – объем тела;

$\rho$  – плотность;

$\bar{\mathcal{G}}$  – средняя по объему избыточная температура;

$\bar{\alpha}$  – средний коэффициент теплоотдачи;

$F$  – площадь поверхности тела;

$\tau$  – время;

$\bar{\mathcal{G}}_F$  – средняя интегральная избыточная температура поверхности тела.

После определенных преобразований получается  $m = \psi \frac{\bar{\alpha}F}{C}$

где  $\psi$  – коэффициент неравномерности распределения температуры в теле.

Откуда следует, что темп охлаждения (нагрева) однородного и изотропного тела пропорционален коэффициенту теплоотдачи, площади поверхности тела и обратно пропорционален его теплоемкости (первая теорема Кондратьева).

Коэффициент  $\psi$  представляет собой отношение средней избыточной температуры по поверхности тела к средней избыточной температуре по объему в данный момент времени,

т.е.  $\psi = \frac{\bar{\mathcal{G}}_F}{\bar{\mathcal{G}}_V}$ . Он характеризует неравномерность температурного поля, зависит от условий теплообмена, а поверхности тела и может изменяться от 1 до 0. Если температура тела во всех точках одинакова, то  $\psi = 1$ , при наиболее неравномерном распределении температуры  $\psi = 0$ .

Значение  $\psi$  определяется размерами тела  $l$ , коэффициентом теплопроводности материала  $\lambda$  и коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ . Безразмерный комплекс этих величин является числом Био, следовательно,  $\psi = f(Bi)$ .

Учитывая вышеизложенное, ясно, что основные положения теории регулярного режима можно использовать при определении длительности нагрева или охлаждения тел. Для этого необходимо знать, насколько изменится температура в какой-либо точке системы за данный промежуток времени и величину темпа охлаждения.

Длительность процесса вычисляется по формуле  $\tau = \frac{1}{m} \ln \left( \frac{\mathcal{G}_1}{\mathcal{G}_2} \right)$ .

Однако данная теория не применялась в условиях циклической работы бытовых компрессионных холодильников, где термодинамические процессы в одной подсистеме (например, кипение хладагента в испарителе) влияют и взаимосвязаны с другой подсистемой (например, конденсацией того же хладагента в конденсаторе), где эксплуатационные изменения системы влияют на протекания термодинамических процессов в различных участках и подсистемах.

Как уже было выше отмечено, все эти методики определяют зачастую частный характер термодинамического процесса и цикла в целом. Также только в [7, 8] отчасти затрагивается понятие изменение параметров в рабочей и нерабочей частях цикла. Как показывает практика, целесообразно сформулировать обобщенную математическую модель, отражающую все параметры, входящие в понятие «теплоперенос». Причем модель должна быть неотрывно связана с циклической работой холодильного прибора. Только в этом случае можно будет отследить термодинамические изменения во всех подсистемах холодильного прибора и сформулировать адекватную оценку эффективности термодинамического цикла бытового компрессионного холодильника.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нимич, Г.В. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха / Г.В. Нимич, В.А. Михайлов, Е.С. Бондарь. – К.: Аванпост Прим, 2003. – 626 с.

2. Калнинь, И.М. Оценка эффективности термодинамических циклов парокомпрессионных холодильных машин и тепловых насосов / И.М. Калнинь, К.Н. Фадеков // Наука и техника. – 2006. -№3. – С. 16-19
3. Архаров, А.М. Основы энтропийно-статистического анализа реальных энергетических потерь в низкотемпературных и высокотемпературных машинах и установках / А.М. Архаров, В.М. Сычев // Холодильная техника. – 2005. – № 12. – С.14-23.
4. Мартыновский, В.С. Анализ действительных термодинамических циклов / В.С. Мартыновский. – М.: Энергия, 1972.
5. Мартыновский, В. С. Термодинамические характеристики циклов тепловых и холодильных машин / В.С. Мартыновский – М.: Госэнергоиздат, 1952.
6. Мартыновский, В.С. Холодильные машины (Термодинамические процессы) / В.С. Мартыновский – М.: Пищепромиздат, 1950.
7. Вейнберг, Б.С. Бытовые компрессионные холодильники / Б.С. Вейнберг, Л.Н. Вайн.- изд-во Пищевая пром-ть, 1974г.
8. Теплотехника. Учебник для вузов / Гуляев В.А., Вороненко Б.А., Корнюшко Л.М. и др. – СПб.: Издательство «РАПП», 2009 – 352 с.

**Русляков Дмитрий Викторович**

ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», г. Шахты

аспирант, преподаватель кафедры «Машины и аппараты бытового назначения»

Тел. 8-908-50-65-574

E-mail: ruslyakof@yandex.ru

D.V. RUSLYAKOV

**ANALISES OF THE EFFECTIVENESS ESTIMATION OF THE  
COMPRESSION REFRIGERATORS THERMODYNAMIC CYCLES**

*The analyses of the effectiveness estimation of the compression refrigerators thermodynamic cycles is stated in the article. The means of estimation as per diagram is given. The methods of such classics as Martynovsky V. S., Vain L. N. Veinberg B. S., Kondratiev T. N. are described in the article. The modern approach to the thermodynamic cycles estimation is also indicated (scientists Kalnin I. M., Arharov A. M.). The general disadvantages in the application of the stated methods are highlighted and the new approach to the problems of the thermodynamic cycles estimation.*

**Keywords:** *thermodynamic cycle, effectiveness, refrigerator device, temperature, time, non-stationary process, heat transfer, mathematic model.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Nimich, G.V. Sovremennye sistemy ventiljaccii i kondicionirovanija vozduha / G.V. Nimich, V.A. Mihajlov, E.S. Bondar'. – К.: Avanpost Prim, 2003. – 626 s.
2. Kalnin', I.M. Ocenka jeffektivnosti termodinamicheskikh ciklov parokompressionnyh holodil'-nyh mashin i teplovyh nasosov / I.M. Kalnin', K.N. Fadekov // Nauka i tehnika. – 2006. -№3. – S. 16-19
3. Arharov, A.M. Osnovy jentropijnostatisticheskogo analiza real'nyh jenergeticheskikh poter' v nizkotemperaturnykh i vysokotemperaturnykh mashinah i ustanovkah / A.M. Arharov, V.M. Sychev // Holodil'naja tehnika. – 2005. – № 12. – S.14-23.
4. Martynovskij, V.S. Analiz dejstvitel'nyh termodinamicheskikh ciklov / V.S. Martynovskij. – М.: Jenergija, 1972.
5. Martynovskij, V. S. Termodinamicheskie harakteristiki ciklov teplovyh i holodil'nyh mashin / V.S. Martynovskij – М.: Gosjenergoizdat, 1952.
6. Martynovskij, V.S. Holodil'nye mashiny (Termodinamicheskie processy) / V.S. Martynovskij – М.: Piwepromizdat, 1950.
7. Vejnbjerg, B.S. Bytovye kompressionnye holodil'niki / B.S. Vejnbjerg, L.N. Vajn.- izd-vo Piwevaja prom-t', 1974g.
8. Teplotehnika. Uchebnik dlja vuzov / Guljaev V.A., Voronenko B.A., Kornjushko L.M. i dr. – SPb.: Izdatel'stvo «RAPP», 2009 – 352 s.

**Ruslyakov Dmitriy Viktorovich**

«South Russian State university of economics and service», s. Shakhty

Post-graduate student, teacher of the chair «Machines and devices for the domestic use»

Tel. 8-908-50-65-574

E-mail: ruslyakof@yandex.ru

И.М. ЛАВИТ

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ РЕЗАНИИ

*Разработана математическая модель образования стружки при ортогональном резании металлов. Основой модели является предположение об образовании в процессе резания трещины поперечного сдвига. Соотношения между силовыми и кинематическими характеристиками процесса формулируются на основе интегральных соотношений механики сплошной среды. Приведены примеры расчета, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** математическая модель, ортогональное резание металлов, поперечный сдвиг, механика сплошной среды.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что процесс образования стружки сопровождается большими деформациями (порядка 100%). Наряду с этим, как свидетельствуют данные экспериментов [1], пластическое деформирование сильно локализовано и сконцентрировано вдоль отрезка прямой линии. Это дает основание попытаться получить асимптотическое решение задачи, считая, что вся пластическая зона сводится к одной линии скольжения – прямолинейному отрезку [2]. Не следует, однако, забывать, что резание – это не просто пластическое деформирование, как, например, штамповка, а пластическое деформирование, сопровождающееся разрушением – образованием новой поверхности. Поэтому упомянутая линия скольжения является одновременно трещиной поперечного сдвига [3]. Такая трещина характеризуется отсутствием раскрытия берегов и, следовательно, при снятии нагрузки она, в отличие от трещины нормального разрыва, залечивается (исчезает).

Линия трещины – это линия разрыва поля скоростей, и то, что она существует, объясняет неудачи при попытке построить математическую модель процесса резания, используя методы, в том числе и самые современные, как, например, метод конечных элементов, которые предполагают непрерывность поля скоростей. Настоящее исследование отличается от предыдущих именно тем, что в нем учитывается существование трещины.

Рассматривается стационарный процесс резания. Задача решается в плоской постановке. Используется эйлерова система координат. Деформированная поверхность стружки представляется приближенно, в виде отрезков прямых. Нагрузки, как действующие на стружку со стороны резца, так и моделирующее действие одних частей стружки на другие, заменяются своими средними значениями. Рассматривается процесс резания со сравнительно большой скоростью ( $> 70$  м/мин). При таких скоростях, как показывают эксперименты [1], нарост не образуется.

### 1. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Будем считать, что заготовка перемещается относительно покоящегося резца со скоростью  $v$ , в результате чего резец срезает с заготовки слой толщиной  $h$ , преобразующийся в стружку. Известно также значение переднего угла  $\gamma$  (рис. 2). Эксперименты показывают [1,4], что процессы пластического деформирования и разрушения протекают, в основном, в пределах области  $ABCDE$  (рис.1,2). Предполагается, что внутри нее находится линия скольжения, трансформировавшаяся в трещину поперечного сдвига – линия  $BE$  (отрезок прямой).



Рассмотрим условия деформирования области с учетом существования внутри нее трещины сдвига. Принимаются следующие допущения: в пределах треугольника  $ABE$  скорость постоянна, равна по модулю  $v$  и направлена вдоль оси абсцисс; в пределах области  $BCDE$  скорость постоянна, равна по модулю  $u$  (эту величину необходимо определить в процессе решения задачи) и направлена параллельно отрезку  $DE$ . При этом, очевидно,  $BC \parallel DE$ . На линии  $BE$  скорость претерпевает скачок. Угол  $\varphi$  неизвестен и также должен быть определен в процессе решения задачи. Таким образом, рассматриваемая задача относится к классу задач с неизвестной границей.

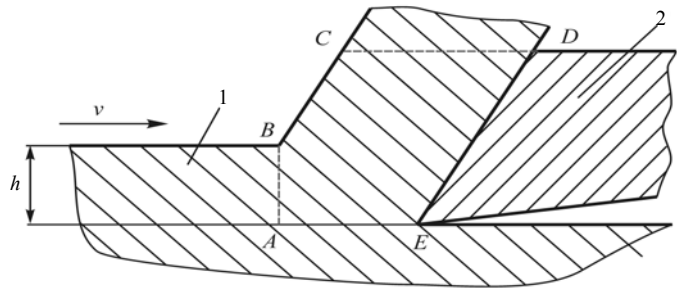


Рисунок 1 – Взаимодействие реза и срезаемого слоя: 1 – срезаемый слой; 2 – резец

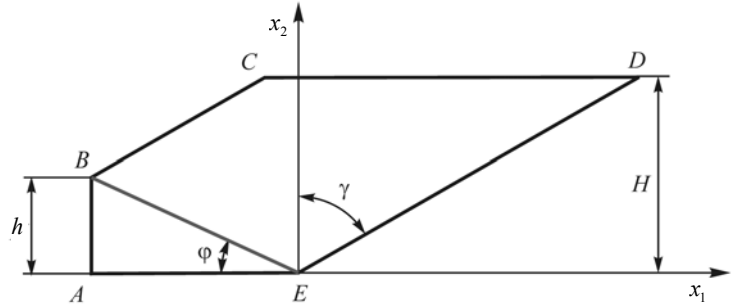


Рисунок 2 – Область образования стружки.  $BE$  – линия трещины

Из геометрических соображений легко устанавливаются следующие соотношения:

отрезок  $AB$ :

$$l_{AB} = h; \quad x_1 = -h \operatorname{ctg} \varphi; \quad x_2 \in [0; h]; \quad \mathbf{n} = \{-1; 0\}; \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = -v \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{n}$  – единичная внешняя нормаль,

$\mathbf{v}$  – вектор скорости; точкой обозначается скалярное произведение.

отрезок  $BC$ :

$$l_{BC} = \frac{H-h}{\cos \gamma}; \quad x_1 = x_2 \operatorname{tg} \gamma - h(\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{ctg} \varphi); \quad x_2 \in [h; H];$$

$$\mathbf{n} = \{-\cos \gamma; \sin \gamma\}; \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1.2)$$

отрезок  $CD$ :

$$l_{CD} = h(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \gamma); \quad x_2 = H; \quad x_1 \in [-h \operatorname{ctg} \varphi + (H-h) \operatorname{tg} \gamma; H \operatorname{tg} \gamma]$$

$$\mathbf{n} = \{0; 1\}; \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = u \cos \gamma \quad (1.3)$$

отрезок  $DE$ :

$$l_{DE} = \frac{H}{\cos \gamma}; \quad x_1 = x_2 \operatorname{tg} \gamma; \quad x_2 \in [0; H]; \quad \mathbf{n} = \{\cos \gamma; -\sin \gamma\}; \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1.4)$$

отрезок  $EA$ :

$$l_{EA} = h \operatorname{ctg} \varphi; \quad x_2 = 0; \quad x_1 \in [-h \operatorname{ctg} \varphi; 0]; \quad \mathbf{n} = \{0; -1\}; \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1.5)$$

## 2. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МАССЫ

Для нахождения величин, определяющих процесс резания, используются уравнения механики сплошной среды в интегральной форме. При данной постановке задачи это необходимо, так как рассматриваемая область содержит линию разрыва. Первое из упомянутых уравнений выражает закон сохранения массы. Будем предполагать плотность неизменной. Уравнение неразрывности в интегральной форме, выражающее собой закон сохранения массы, формулируется в виде

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0 \quad (2.1)$$

где  $t$  – время,  $\rho$  – плотность,  $V$  – некоторый материальный объем. В условиях плоской деформации  $V = bS$ , где  $b$  – ширина стружки (размер в направлении, перпендикулярном чертежу),  $S$  – площадь сечения материального объема. Будем далее везде под  $S$  понимать площадь фигуры, ограниченной контуром  $ABCDEA$ . В этом случае уравнение (2.1) с учетом теоремы Рейнольдса [5] записывается в виде

$$\int_S \frac{\partial \rho}{\partial t} dS + \int_l \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} \rho dl = 0 \quad (2.2)$$

где контурный интеграл берется вдоль граничного контура  $ABCDEA$ . Так как рассматривается стационарный процесс, то  $\partial \rho / \partial t = 0$ . В результате интегрирования вдоль контура  $l$  найдем

$$u = \frac{v \sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma)} = \frac{v}{\xi} \quad (2.3)$$

где величина  $\xi$  – отношение толщины стружки к толщине срезаемого слоя  $h$  – называется усадкой стружки [4]. Отметим, что формула (2.3) была ранее получена другими исследователями.

### 3. БАЛАНС ИМПУЛЬСА

Уравнение, выражающее баланс импульса, в данном случае плоской деформации имеет вид

$$\frac{d}{dt} \int_S \rho \mathbf{v} dS = \int_l \mathbf{p} dl \quad (3.1)$$

где  $\mathbf{p}$  – распределенная нагрузка, приложенная к контуру  $l$ . Преобразуем левую часть уравнения (3.1) по формуле Рейнольдса

$$\frac{d}{dt} \int_S \rho \mathbf{v} dS = \int_S \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) dS + \int_l (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) \rho \mathbf{v} dl \quad (3.2)$$

Так как процесс стационарный, первое слагаемое правой части равенства (3.2) равно нулю. С учетом формул (1.5) получаем

$$\frac{d}{dt} \int_S \rho \mathbf{v} dS = \rho v h (\mathbf{v}|_{CD} - \mathbf{v}|_{AB}); \quad \mathbf{v}|_{CD} = \{u \sin \gamma; u \cos \gamma\}; \quad \mathbf{v}|_{AB} = \{v; 0\} \quad (3.3)$$

Рассмотрим правую часть уравнения (3.1). Будем считать, что так же, как и скорость, поверхностная нагрузка неизменна вдоль соответствующих участков контура. С учетом того, что участки контура  $BC$  и  $CD$  не нагружены, получим

$$\int_l \mathbf{p} dl = \mathbf{p}_{AE} h \operatorname{ctg} \varphi + \mathbf{p}_{AB} h + \mathbf{p}_{DE} \frac{H}{\cos \gamma} \quad (3.4)$$

Нагрузка  $\mathbf{p}_{DE}$ , приложенная к стружке со стороны резца, представляется в виде суммы нормальной и касательной составляющих, причем, касательная составляющая – это сила трения. Приходим к выражению

$$\mathbf{p}_{DE} = \{-q(\cos \gamma + k \sin \gamma); -q(k \cos \gamma - \sin \gamma)\} \quad (3.5)$$

где  $q$  – давление, действующее на стружку со стороны резца,  $k$  – коэффициент трения. Определение нагрузки на участках граничного контура  $AE$  и  $AB$  не столь очевидно. Чтобы ее найти, предположим, что, во-первых, напряженное состояние в области  $ABE$  однородно, и, во-вторых, что из компонентов тензора напряжений ненулевыми в этой области являются  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  (плоская деформация). Связь между напряжениями и распределенной нагрузкой устанавливается формулой Коши

$$p_j = \sigma_{jm} n_m; \quad j, m = 1, 2 \quad (3.6)$$

Подставим выражения (3.3)-(3.6) в уравнение (3.2), используя при этом формулы (1.1), (1.5). Приходим к системе двух уравнений

$$\begin{cases} \sigma_{12} h \operatorname{ctg} \varphi + qH (1 + k \operatorname{tg} \gamma) = \frac{\rho v^2 h}{1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \varphi} \\ h (\sigma_{22} \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_{12}) + qH (k - \operatorname{tg} \gamma) = - \frac{\rho v^2 h \operatorname{tg} \varphi}{1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \varphi} \end{cases} \quad (3.7)$$

#### 4. БАЛАНС МОМЕНТА ИМПУЛЬСА

Исходное соотношение с учетом предположения о плоской деформации имеет вид

$$\frac{d}{dt} \int_S [\mathbf{x}, \rho \mathbf{v}] dS = \int_l [\mathbf{x}, \mathbf{p}] dl \quad (4.1)$$

где выражение  $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$  обозначает векторное произведение векторов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$ . В уравнении (4.1)  $\mathbf{x}$  – радиус-вектор некоторой точки сплошной среды. Преобразуя левую часть, пользуясь формулой Рейнольдса и учитывая, что  $\rho = \operatorname{const}$ , получим в результате громоздких, но несложных выкладок, что левая часть уравнения (4.1) равна нулю. Преобразование правой части этого уравнения приводит к равенству

$$\sigma_{22} h^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi + 2\sigma_{12} h^2 \operatorname{ctg} \varphi + \frac{qH^2}{\cos^2 \gamma} = 0 \quad (4.2)$$

#### 5. УРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА (первый закон термодинамики)

Исходное соотношение для рассматриваемого случая плоской деформации имеет вид

$$\int_l \mathbf{p} \cdot \mathbf{v} dl = \frac{d}{dt} \int_S \rho w dS + \frac{d}{dt} \int_S \frac{\rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})}{2} dS + \int_l \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} dl \quad (5.1)$$

где в левой части равенства стоит мощность внешних сил;  $w$  – внутренняя энергия, отнесенная к единице массы;  $\mathbf{q}$  – тепловой поток. Для рассматриваемого диапазона скоростей резания можно предполагать верным допущение об адиабатичности процесса

$$\mathbf{q} = 0 \quad (5.2)$$

Будем считать, что в области  $ABE$  удельная внутренняя энергия постоянна и равна  $w_1$ , а области  $BCDE$  она также постоянна и равна  $w_2$ . Таким образом, на линии  $BE$  внутренняя энергия испытывает скачок. Пренебрегая зависимостью внутренней энергии от упругих деформаций, запишем

$$w = cT \quad (5.3)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость (теплоемкость единицы массы),  $T$  – абсолютная температура. При сделанных допущениях уравнение (5.1) преобразуется к виду

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{1}{\rho c} \left\{ -\sigma_{12} \operatorname{ctg} \varphi - \frac{kqH \operatorname{tg} \varphi}{h(1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \varphi) \cos^2 \gamma} + \frac{\rho v^2}{2} \left[ 1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\cos^2 (\varphi - \gamma)} \right] \right\} \quad (5.4)$$

Полученная формула позволяет определить приращение температуры стружки, обусловленное пластическим деформированием и разрушением по линии  $BE$ . Отметим, что работа сил трения переходит в теплоту, которая частично поглощается резцом, частично уносится стружкой, что приводит к дополнительному увеличению температуры стружки. Но эта

теплота поступает в стружку уже после того, как последняя сформируется, то есть пройдет область  $ABCDE$ .

## 6. УСЛОВИЕ ПРОЧНОСТИ

Принимается условие прочности Кулона-Мора [6]: на площадке, где происходит разрушение, выполняется условие

$$\tau - \mu p = c_* \quad (6.1)$$

где  $\tau$  – модуль касательной распределенной нагрузки на площадке, а  $p$  – давление на этой же площадке;  $c_*$ ,  $\mu$  – экспериментально определяемые характеристики материала. Отметим, что  $\mu$  имеет смысл коэффициента трения. В зависимости от ориентации площадки разрушения величина разрушающей нагрузки различна. Поэтому равенство (6.1) дополняется следующим условием: ориентация площадки разрушения такова, что разрушающая нагрузка имеет минимально возможное значение. В данном случае площадка разрушения проходит через линию  $BE$  (линия  $BE$  – это линия пересечения плоскости разрушения с плоскостью  $x_3 = 0$ ), и ее положение полностью определяется углом  $\varphi$ .

Определим величины, входящие в формулу (6.1). Единичная нормаль к линии разрушения записывается в виде (один из двух возможных вариантов, отличающихся знаком)

$$\mathbf{n} = \{\sin \varphi; \cos \varphi\} \quad (6.2)$$

Найдем нагрузку на площадке с нормалью, определенной формулой (6.2). Используется формула Коши (3.6). Нормальная компонента нагрузки равна

$$p_{(n)} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{n} = \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \cos^2 \varphi \quad (6.3)$$

Из формулы (6.3) следует, что при замене  $\mathbf{n}$  на минус  $\mathbf{n}$  величина  $p_{(n)}$  остается неизменной. Касательная нагрузка определяется выражением

$$\mathbf{p}_{(\tau)} = \mathbf{p} - p_{(n)} \mathbf{n} \quad (6.4)$$

Ее модуль равен

$$|\mathbf{p}_{(\tau)}| = \left| \sigma_{12} \cos 2\varphi - \frac{\sigma_{22}}{2} \sin 2\varphi \right| \quad (6.5)$$

Отметим, что  $|\mathbf{p}_{(\tau)}|$  представляет собой величину  $\tau$  в формуле (6.1), а  $p_{(n)}$  – величину давления с обратным знаком. Равенство (6.1) принимает вид

$$\left| \sigma_{12} \cos 2\varphi - \frac{\sigma_{22}}{2} \sin 2\varphi \right| + \mu (\sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \cos^2 \varphi) = c_* \quad (6.6)$$

Можно показать, что постоянная  $c_*$  связана с истинным напряжением при разрыве  $\sigma_f$  формулой

$$c_* = \frac{\sigma_f}{2} (\mu + \sqrt{1 + \mu^2}) \quad (6.7)$$

Величина  $\sigma_f$  зависит от температуры. С достаточной степенью точности можно принять

$$\sigma_f = \sigma_{f0} \Psi(\Delta T) \quad (6.8)$$

где  $\sigma_{f0}$  – постоянная материала, определяемая при нормальных условиях, а  $\Psi(\Delta T)$  – безразмерная функция, одинаковая для всех материалов одной группы (например, сталей). Отметим, что экспериментальное определение константы  $\sigma_{f0}$  очень сложно; для результатов экспериментов характерен большой разброс. Поэтому предпочтительно пользоваться при-

ближенной зависимостью  $\sigma_{f0} \approx 2\sigma_Y$ , где  $\sigma_Y$  – условный предел текучести материала (при нормальных условиях).

Коэффициент трения зависит от температуры трущихся поверхностей, а сама эта температура зависит от скорости скольжения одной поверхности относительно другой, причем, настолько, что можно в первом приближении пренебречь другими источниками тепла. Поэтому ниже предполагается, что коэффициент трения зависит только от скорости; эта зависимость, установленная экспериментально для рассматриваемого диапазона скоростей, имеет вид [7]

$$k = \frac{k_0}{1 + ev_*} \quad (6.9)$$

где  $v_*$  – относительная скорость трущихся поверхностей (в данном случае  $v_* = u$ ),  $k_0, e$  – постоянные материала. Отметим, что размерная постоянная  $e$  для многих материалов одна и та же:  $e = 0,23 \text{ с/м} = 0,00383 \text{ мин/м}$ . Величина  $k_0$  изменяется, в зависимости от материалов трущейся пары, в пределах  $0.4 \dots 0.6$ .

### 7. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Введем в рассмотрение безразмерные параметры подобия

$$H_* = \frac{H}{h}; \quad q_* = \frac{q}{\sigma_{f0}}; \quad \omega = \frac{\rho v^2}{\sigma_{f0}}; \quad \sigma_{*12} = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{f0}}; \quad \sigma_{*22} = \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{f0}} \quad (7.1)$$

Уравнения (3.7) принимают вид

$$\sigma_{*12} \text{ctg}\varphi + q_* H_* (1 + k \text{tg}\gamma) = \frac{\omega}{1 + \text{tg}\gamma \text{tg}\varphi}; \quad (7.2)$$

$$\sigma_{*22} \text{ctg}\varphi + \sigma_{*12} + q_* H_* (k - \text{tg}\gamma) = -\frac{\omega \text{tg}\varphi}{1 + \text{tg}\gamma \text{tg}\varphi}$$

а уравнение (4.2) записывается как

$$\sigma_{*22} \text{ctg}^2\varphi + 2\sigma_{*12} \text{ctg}\varphi + \frac{q_* H_*^2}{\cos^2 \gamma} = 0 \quad (7.3)$$

Формула (5.4) преобразуется следующим образом:

$$\Delta T = \frac{\sigma_{f0}}{\rho c} \left\{ -\sigma_{*12} \text{ctg}\varphi - \frac{kq_* H_* \text{tg}\varphi}{(1 + \text{tg}\gamma \text{tg}\varphi) \cos^2 \gamma} + \frac{\omega}{2} \left[ 1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\cos^2 (\varphi - \gamma)} \right] \right\} \quad (7.4)$$

Последнее из выведенных соотношений – равенство (6.6) преобразуется к форме

$$\left| \sigma_{*12} \cos 2\varphi - \frac{\sigma_{*22}}{2} \sin 2\varphi \right| + \mu (\sigma_{*12} \sin 2\varphi + \sigma_{*22} \cos^2 \varphi) = \frac{\Psi(\Delta T)}{2} (\mu + \sqrt{1 + \mu^2}) \quad (7.5)$$

Из формулы (7.5) следует, что порядок величин  $\sigma_{*12}, \sigma_{*22}$  равен единице. Такой же порядок имеет величина  $q_*$ . Оценим порядок величины  $\omega$ . Для сталей:  $\rho \approx 10^4 \text{ кг/м}^3; \sigma_{f0} \approx 10^3 \text{ Н/мм}^2 = 10^9 \text{ Па}$ . Порядок скорости резания  $v \approx 60 \text{ м/мин} = 1 \text{ м/с}$ . При этом  $\omega \approx 10^{-5}$ . Поэтому слагаемыми, содержащими  $\omega$  (иными словами, инерционными эффектами), можно пренебречь. Уравнения (7.3) и (7.5) останутся при этом неизменными, а формулы (7.2) и (7.4) упростятся

$$\sigma_{*12} = -q_* H_* (1 + k \operatorname{tg} \gamma) \operatorname{tg} \varphi; \quad \sigma_{*22} \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_{*12} = -q_* H_* (k - \operatorname{tg} \gamma);$$

$$\Delta T = -\frac{\sigma_{f0}}{\rho c} \left[ \sigma_{*12} \operatorname{ctg} \varphi + \frac{k q_* H_* \operatorname{tg} \varphi}{(1 + \operatorname{tg} \gamma \operatorname{tg} \varphi) \cos^2 \gamma} \right] \quad (7.6)$$

Исключим напряжения из равенств (7.3), (7.5) и формулы для приращения температуры с помощью первых двух выражений (7.6). Получим

$$H_* = \frac{\cos \gamma}{\sin \varphi} [\sin(\varphi - \gamma) + k \cos(\varphi - \gamma)] \quad (7.7)$$

$$\Delta T = \frac{\sigma_{f0}}{\rho c} q_* H_* [1 - k \operatorname{tg}(\varphi - \gamma)]$$

Равенство (7.5) принимает вид

$$\frac{q_* H_* \sin \varphi}{\cos \gamma} \{ |\cos(\varphi - \gamma) - k \sin(\varphi - \gamma)| - \mu [\sin(\varphi - \gamma) + k \cos(\varphi - \gamma)] \} =$$

$$= \frac{\psi(\Delta T)}{2} (\mu + \sqrt{1 + \mu^2}) \quad (7.8)$$

Так как разность углов  $\varphi - \gamma$  не превышает  $50^\circ$ , можно раскрыть абсолютную величину в уравнении (7.8)

$$\frac{q_* H_* \sin \varphi}{\cos \gamma} [(1 - \mu k) \cos(\varphi - \gamma) - (\mu + k) \sin(\varphi - \gamma)] = \frac{\psi(\Delta T)}{2} (\mu + \sqrt{1 + \mu^2}) \quad (7.9)$$

Исключив с помощью выражения (7.9) произведение  $q_* H_*$  из второй формулы (7.7), получим

$$\Delta T = \frac{\sigma_{f0} (\mu + \sqrt{1 + \mu^2}) \psi(\Delta T) \cos \gamma [1 - k \operatorname{tg}(\varphi - \gamma)]}{2 \rho c [(1 - \mu k) \cos(\varphi - \gamma) - (\mu + k) \sin(\varphi - \gamma)] \sin \varphi} \quad (7.10)$$

При заданной функции  $\psi(\Delta T)$  равенство (7.10) представляет собой трансцендентное уравнение относительно величины  $\Delta T$ .

Сила резания, отнесенная к ширине срезаемого слоя, записывается, с использованием формул (3.5) и (1.4), в виде

$$\mathbf{P} = \mathbf{p}_{DE} l_{DE}; \quad |\mathbf{P}| = \frac{Hq}{\cos \gamma} \sqrt{1 + k^2} \quad (7.11)$$

Введем в рассмотрение безразмерную величину  $Q$  – удельную силу резания

$$Q = \frac{|\mathbf{P}|}{h \sigma_{f0}} = \frac{q_* H_* \sqrt{1 + k^2}}{\cos \gamma} \quad (7.12)$$

С учетом формулы (7.12) уравнение (7.9) принимает вид

$$Q = \frac{(\mu + \sqrt{1 + \mu^2}) \psi(\Delta T) \sqrt{1 + k^2}}{2 [(1 - \mu k) \cos(\varphi - \gamma) - (k + \mu) \sin(\varphi - \gamma)] \sin \varphi} \quad (7.13)$$

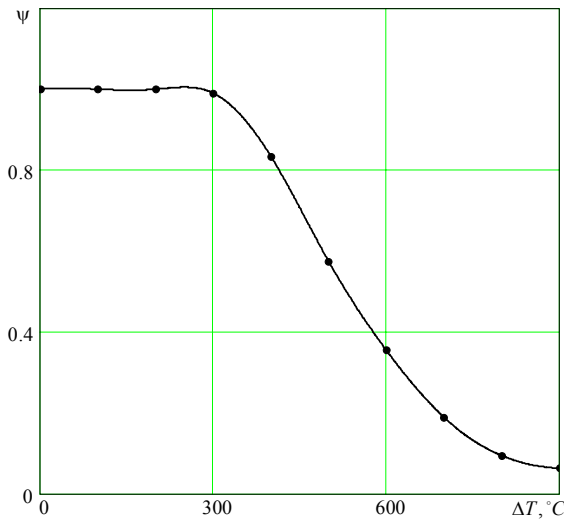


Рисунок 3 – Зависимость истинного напряжения при разрыве (относительного) от температуры

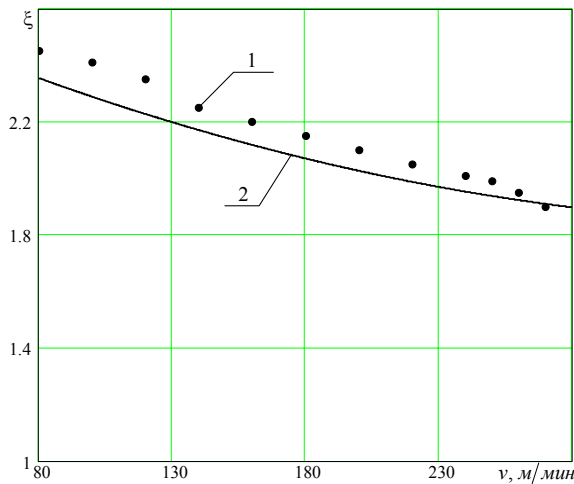


Рисунок 4 – Зависимость усадки от скорости резания  
1 – экспериментальные данные; 2 – результаты расчета

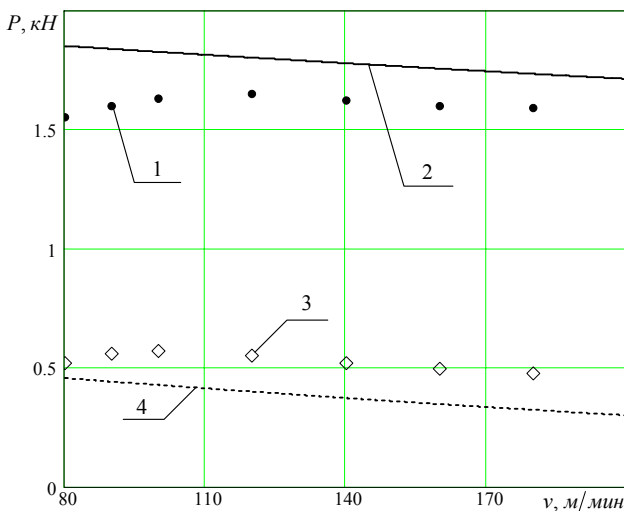


Рисунок 5 – Зависимости абсолютных величин проекций силы резания от скорости резания

1 – экспериментальные значения  $P_1$ ; 2 – рассчитанные значения  $P_1$ ;  
3 – экспериментальные значения  $P_2$ ; 4 – рассчитанные значения  $P_2$ .

Таким образом, удельная сила резания при заданных значениях  $\mu, \gamma, k_0$  и известной функции  $\psi(\Delta T)$  является функцией угла  $\varphi$  (см. формулы (2.3), (6.9), (7.10)). Его значение определяется, в соответствии с условием Кулона-Мора, требованием, что величина угла  $\varphi$  такова, что модуль силы резания из всех возможных значений минимален. После определения значения угла  $\varphi$  и, следовательно, величины  $Q$ , легко вычисляются все величины, характеризующие процесс резания.

Найдем количество теплоты  $\Omega$ , отнесенное к ширине срезаемого слоя, которое выделяется в единицу времени за счет трения стружки о резец. С использованием формулы (5.1) получим

$$\Omega = v h \sigma_{f0} \frac{Q k \sin \varphi}{\sqrt{1 + k^2 \cos(\varphi - \gamma)}} \quad (7.14)$$

Эта теплота частично поглощается резцом, оставшаяся часть уносится стружкой, что приводит к увеличению ее температуры.

### 8. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим расчет параметров процесса резания при следующих исходных данных [1]:

$h = 0.195 \text{ мм}; b = 4 \text{ мм}; \gamma = 10^\circ$ . Обрабатываемый материал – сталь 40 с механическими характеристиками  $\sigma_Y = 350 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_{f0} = 2\sigma_Y = 700 \text{ Н/мм}^2$ .

Экспериментально полученная [1] зависимость  $\psi(\Delta T)$  представлена на рисунке 3.

Удельная теплоемкость (объемная) принималась равной [4]:

$$c_V = \rho c = 5 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} = 5 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2 \cdot \text{К}}, \text{ а коэффициенты трения: } \mu = k_0 = 0.5.$$

Результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными Н.Н. Зорева [1]. На рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные значения усадки в зависимости от скорости резания. На рисунке 5 изображены графики зависимо-

стей абсолютных величин проекций силы резания на оси  $x_1$  и  $x_2$  от скорости резания

$$P_1 = \frac{bh\sigma_{f0}Q}{\sqrt{1+k^2}}(\cos\gamma + k\sin\gamma); \quad P_2 = \frac{bh\sigma_{f0}Q}{\sqrt{1+k^2}}(k\cos\gamma - \sin\gamma) \quad (8.1)$$

Можно отметить, что для рассмотренной математической модели, не претендующей на детальное описание напряженно-деформированного состояния и использующей в качестве исходных данных ряд достаточно грубых эмпирических зависимостей, согласование расчетных и экспериментальных результатов весьма удовлетворительное. Этот вывод можно отнести не только к функциям  $\xi(v)$  и  $P_1(v)$ , но и к  $P_2(v)$ , если учесть, что экспериментальное значение этой силы обусловлено не только собственно сопротивлением резанию, но и усилием, с которым резец прижимается к обрабатываемой детали.

Автор благодарен М.В. Ушакову и С.Я. Хлудову за плодотворные дискуссии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорев, Н.Н. Вопросы механики процесса резания металла / Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.
2. Тиме, И.А. Сопротивление металлов и дерева резанию / И.А. Тиме. – 1870.
3. Хеллан, К. Введение в механику разрушения / К. Хеллан. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
4. Васин, С.А. Резание материалов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 448 с.
5. Прагер, В. Введение в механику сплошных сред / В. Прагер. – М.: Иниздат, 1963. – 311с.
6. Поль, Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения / Б.Поль // Разрушение. Т.2. М.: Мир, 1975. – С. 336-520.
7. Крагельский, И.В. Основы расчета на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

#### Лавит Игорь Михайлович

Тульский гос. у-тет, каф. матем. моделирования,  
300012, Тула, просп. Ленина, 92.  
тел.: +7-953-4-22-22-81  
e-mail: IgorLavit@yandex.ru

I.M. LAVIT

### MATHEMATICAL MODEL OF CHIP FORMATION AT ORTHOGONAL CUTTING

*The mathematical model of formation of a shaving is developed at orthogonal re-zanii metals. A model basis is the assumption of formation in the course of cutting of a crack of cross-section shift. Parities between power and kinematic characteristics of process are formulated on the basis of integrated parities of mechanics of the continuous environment. Calculation examples, well consistent with experimental data are resulted.*

**Keywords:** mathematical model, orthogonal cutting of metals, to the priest-rechnyj shift, mechanics of the continuous environment.

### BIBLIOGRAPHY

1. Zorev, N.N. Voprosy mehaniki processa rezanija metalla / N.N. Zorev. – M.: Mashgiz, 1956. – 368 s.
2. Time, I.A. Soprotivlenie metallov i dereva rezaniju / I.A. Time. – 1870.
3. Hellan, K. Vvedenie v mehaniku razrusheniya / K. Hellan. – M.: Mir, 1988. – 364 s.
4. Vasin, S.A. Rezanie materialov / S.A. Vasin, A.S. Verewaka, V.S. Kushner. – M.: Izd-vo MGTU im. Bau-mana, 2001. – 448 s.
5. Prager, V. Vvedenie v mehaniku sploshnyh sred / V. Prager. – M.: Inizdat, 1963. – 311s.
6. Pol', B. Makroskopicheskie kriterii plasticheskogo techeniya i hrupkogo razrusheniya / B.Pol' // Raz-rushenie. T.2. M.: Mir, 1975. – S. 336-520.
7. Kragel'skij, I.V. Osnovy rascheta na trenie i iznos / I.V. Kragel'skij, M.N. Dobychin, V.S. Kom-balov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 526 s.

#### Lavit Igor Mihailovich

Tula state university, Department of Mathematic Modeling,  
300012, Tula, prospect Lenina, 92.  
Tel.: +7-953-422-22-81  
e-mail: IgorLavit@yandex.ru



# **КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ**

УДК 637.631.002.64(075)

К.С. ГАЛАТОВ, Ю.Е. ЧЕРТОВ

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ОРГАНА УЗЛА МОДИФИКАЦИИ ПЕРА СОРТИРОВОЧНЫХ МАШИН**

*В статье предложена расчетная схема для определения диаметра и высоты рифли рабочего вала узлов модификации пера. Результаты технологических экспериментов обрабатывались методами регрессионного анализа и крутого восхождения. Проведенные исследования могут быть использованы для конструирования рабочих органов модифицирующих узлов сортировочных машин.*

*Ключевые слова:* перо, модификация, промин, рифля, диаметр вала.

Разработка машин для переработки перо-пухового сырья объединяющих процессы модификации и сортировки в одном устройстве для экономии производственных площадей и уменьшения затрат на модификацию ставит следующую задачу: расчет параметров рабочего органа узлов модификации.

Перо-пуховое сырье является натуральным, побочным, восполняемым продуктом птицеводства, переработка или утилизация которого является актуальной задачей. Перо водоплавающей птицы находит более широкое применение в перо-пуховых изделиях в сравнении с пером сухопутных пород птиц, что объясняется его лучшими физико-механическими характеристиками. Куриное перо находит применение в постельных принадлежностях в составе наполнителя и не рекомендуется для изготовления верхней одежды. В смеси с пером водоплавающей птицы его применяют только в перовых изделиях второй категории, а как самостоятельный наполнитель только в изделиях третьей категории.

Расширение ассортимента швейных изделий с куриным пером требует повышения его качественных характеристик. Одним из показателей качества наполнителя является показатель «Fill Power», который характеризует его наполнительную способность.

Известны способы модификации стержней перьев с целью повышения его наполнительной способности, заключающиеся в нанесении проминов на их вогнутую поверхность [1,2]. Для снижения затрат на модификацию предложено осуществлять этот процесс в устройстве для разделения пера на фракции [3,4]. Кроме того, такой подход позволяет получать широкий ассортимент наполнителей швейных изделий требуемого качества в зависимости от исходного сырья.

Анализ исследований в области модификации стержня пера позволяет говорить о недостаточном обосновании конструктивных параметров рабочих органов. Рабочим органом узла модификации является валок с рифленой насечкой, расположенный над приводным барабаном ленточного транспортера в последней камере сортировочной машины. Под действием воздушного потока перья из вертикального канала опускаются на ленту транспортёра очинном вперёд. Ленточный транспортёр обеспечивает перемещение к валку, основными конструктивными параметрами которого являются: окружной шаг рифленой насечки, радиус скругления рабочей кромки рифлей, диаметр окружности рабочих кромок рифлей и др.

Величина шага нарезки рифли должна обеспечивать максимальное увеличение наполнительной способности. Этот параметр зависит от радиуса скругления рабочей кромки рифлей. При модификации зоны деформации стержня пера рифлями не должны образовывать единого очага разрушения.

Известно, что наиболее высокое значение показателя Fill Power обеспечивается при следующих параметрах:

– радиус скругления рабочей кромки рифли  $r = 0,5$  мм;

– шаг рифленой насечки  $p = 3$  мм [5].

Высота рифли в первом приближении должна быть не меньше диаметра очин перьев подлежащих модификации. Митрофанов Н.С. исследовал морфологические показатели перьев различных пород птиц [6]. По его данным стержень пера имеет диаметр  $d_c$ , который уменьшается в зависимости от расстояния до конца очина, при этом максимальное значение  $d_c$  не определялось (см. табл. 1).

Таблица 1 – Морфологические показатели перьев различных пород птиц

Расстояние от конца очина, выраженное в частях длины пера	Диаметр стержня куриного пера, мм
1/4	0,8
1/2	0,36
3/4	0,18

Для определения максимального значения диаметра стержня куриного пера средней фракции (длина пера от 3 до 8 см), были проведены исследования выборки, составленной из перьев средней фракции 5-ти партий поставки. Из каждой партии случайным образом выбирался мешок для отбора проб. Из каждого мешка отбираем 3 – 4 пробы, которые объединяли в одну общим весом 100 г. Десять перьев с наибольшим диаметром ствола, отобранных на основе визуальных наблюдений из каждой объединенной партии составили выборку  $N = 50$ . Пятикратные измерения каждого очина (штангенциркуль ГОСТ 166 – 89) позволили определить среднее значение максимального диаметра пера –  $1,7 \pm 0,08$  мм. Проведенные измерения позволили выбрать с запасом значение высоты рифли – 2,5 мм.

Диаметр вала должен обеспечивать подвод очина пера в зону захвата рифлями для образования проминов на вогнутой поверхности стержня при прокатке. Необходимую величину давления на стержень обеспечивает упругое покрытие ленты транспортера (см. рис. 1а).

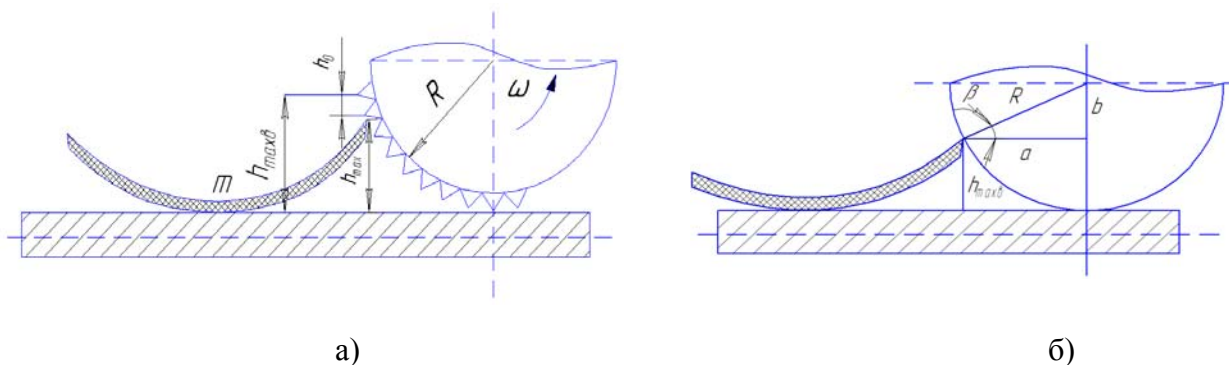


Рисунок 1 – Схема подвода пера валком (а) и определения диаметра окружности рабочих кромок рифлей (б)

Очевидно, что гарантированный подвод рифлями стержня пера в зону захвата обеспечивается при диаметре модифицирующего вала больше, чем размеры пера. Вместе с тем, необоснованное увеличение этого размера приведет к дополнительным затратам на материал и механическую обработку резанием работы.

Основным технологическим параметром, определяющим диаметр модифицирующего вала, является высота расположения конца очина пера относительно ленты транспортера, величина которой зависит от множества факторов. Для определения максимально возможного значения этой высоты был проведен технологический эксперимент, основанный на регрессионном анализе. Задача заключалась в проведении полного факторного эксперимента (ПФЭ) для получения уравнения регрессии и поиске максимума функции методом крутого восхождения [6,7].

На основании априорной информации выделено три основных фактора, влияющих на высоту расположения конца очина пера относительно горизонтальной поверхности после его

свободного падения: радиус кривизны стержня пера –  $R_{кр}$ ; длина пуховой части опахала пера –  $L_0$ ; высота падения пера –  $h_{пао}$ . Объектом регрессионного анализа было выбрана средняя фракция пера. Серия предварительных параллельных экспериментов позволила установить интервалы и уровни варьирования факторов. Для реализации ПФЭ при варьировании всех факторов на двух уровнях было выполнено  $2^3 = 8$  опытов, в соответствии с составленной матрицей планирования эксперимента. Математическая обработка экспериментальных данных заключалась в нахождении функции отклика  $y = f(x_1, x_2, x_3)$ .

Окончательное уравнение регрессии после исключения незначительных коэффициентов имеет следующий вид:

$$Y = 10,32 - 6,775 x_1 + 0,7 x_2 + 0,55 x_3.$$

Проведенный статистический анализ полученного уравнения показал, что дисперсия адекватности ( $S_{ад}^2$ ) составляет 2,21, расчетное значение критерия Фишера – 1,75, что позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели.

Анализ величин коэффициентов регрессии показывает, что наибольшее влияние на высоту расположения конца очина пера относительно горизонтальной поверхности после его свободного падения оказывает радиус кривизны стержня пера. Знак (-) перед коэффициентом  $x_1$  уравнения регрессии, свидетельствует о том, что уменьшение радиуса кривизны пера приводит к повышению отклика.

Определение максимума высоты расположения конца очина пера относительно горизонтальной поверхности после свободного падения осуществлялось по полученной регрессивной модели методом крутого восхождения. Для движения по градиенту был выбран шаг варьирования фактора  $x_1$ , который оказывает наибольшее влияние на отклик –  $h_1 = 10$  мм. При этом округленные шаги величин варьирования двух других факторов составили  $h_2 = 25$ ;  $h_3 = 0$ . Крутое восхождение прекращено после проведения четырнадцати опытов, полученное максимальное значение отклика составляет 26 мм.

При контакте пера с валком происходит дополнительное поднятие очина пера над лентой транспортера, которое в первом приближении можно принять равным величине шага нарезки рифлей  $h_0$ , мм. Поэтому максимально возможное расположение очина пера над лентой транспортера  $h_{max в.}$ , мм, будет составлять 31,5 мм. Минимально допустимое значение диаметра окружности рабочих кромок рифлей модифицирующего вала определим в соответствии с расчетной схемой, представленной на рисунке 1(б), в которой для упрощения расчета рассматривается модифицирующий валок с гладкой поверхностью. Искомая величина диаметра определяется по формуле:

$$D = \frac{2h_{max в.}}{(\sin \beta + 1)}.$$

Гарантированный подвод пера в зону захвата обеспечивается при условии – величина угла  $\beta$  должна быть не меньше угла трения пера по рабочей поверхности рифлей  $\phi$ .

Результаты проведенных исследований по обоснованию диаметра окружности рабочих кромок рифлей могут быть использованы при расчете параметров и прочности рабочих органов модифицирующих узлов сортировочных машин. Для повышения качества модификации необходимы исследования модели разрушения стержня пера при прокатке валком с рифленой насечкой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МПК<sup>8</sup> В68G 3/08. Устройство механической модификации куриного пера / Бринк И. Ю., Соприкина Т.Н., Чертов Ю. Е.; № 2007108628/12; заявл. 21.05.2007; Оpubл. 20.02.2009.- Бюл. №5. 2 с.
2. МПК8 В68G 3/08. Способ увеличения наполнительной способности куриного пера и устройство для его осуществления / Ю.Е.Чертов, И.Ю. Бринк, Т.Н. Соприкина; № 2009125854/21(036020); заявл. 06.07.2009; Оpubл. 27.11.2010. Бюл. № 33. 2 с.
3. В68G 3/08. Устройство для сортировки куриного пера / Четов Ю. Е., Галатов К.С. № 2008113670/12; заявл. 07.04.2008; Оpubл. 10.09.2009.- Бюл. №25. 2 с.
4. В68G 3/08. Устройство сортировки перо-пухового сырья на фракции / Чертов Ю. Е., Галатов К.С. № 2010102611/05; заявл. 26.01.2011; Оpubл. 20.07.2011. Бюл. №20. 2 с.:ил.

5. Соприкина, Т.Н. Перспективы применения куриного пера в изделиях швейной промышленности / Т.Н. Соприкина, И.Ю. Бринк, Ю.Е.Чертов // Швейная промышленность. - 2007. - №4. – С.53–54.
6. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Мн.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
7. Прохоров, В.Т. Планирование эксперимента: учеб. пособие / В.Т. Прохоров. – М.: МТИ, 1988. – 64 с.
8. Митрофанов, Н.С. Сбор и обработка перо-пухового сырья на предприятиях птицеперерабатывающей промышленности и птицефабриках: обзорная информация / Н.С. Митрофанов, Н.Ф.Макарова, С.В.Синюхина, Ю.В.Цуркан, Г.В.Чунина. – М.: АгроНИИТЭИММП, 1989. 44с.

### **Галатов Кирилл Станиславович**

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский университет экономики и сервиса», г. Шахты  
Аспирант кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»  
346530, г. Шахты, пер. Спортивный, 19  
Тел. моб. 8-950-843-69-33, дом. 28-98-27  
E-mail: galatov\_kira@mail.ru

### **Чертов Юрий Евгеньевич**

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский университет экономики и сервиса», г. Шахты  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»  
346519, г. Шахты, Ростовская обл., пер. Морской, 70, кв. 1.  
Тел. моб 8-928-776-38-17, 88636289827  
E-mail: chertov\_yura@mail.ru

---

K.S. GALATOV, JU.E. CHERTOV

## **DEFINITION OF PARAMETERS OF WORKING BODIES OF SORTING MACHINE MODIFICATION FEATHER UNIT**

*The computational scheme for determining a diameter and height of the working roll flute of feather modification units is proposed in the paper . The results of technological experiments were processed by methods of regression analysis and steep ascension. The studies can be used for the construction of working bodies of sorting machine modification units.*

**Keywords:** feather, modification, promin, flute, diameter of a roll.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. МПК8 V68G 3/08. Ustrojstvo mehanicheskoj modifikacii kurinogo pera / Brink I. Ju., Soprikina T.N., Chertov Ju. E.; № 2007108628/12; zajavl. 21.05.2007; Opubl. 20.02.2009.- Bjul. №5. 2 s.
2. МПК8 V68G 3/08. Sposob uvelichenija napolnitel'noj sposobnosti kurinogo pera i ustrojstvo dlja ego osuwestvlenija / Ju.E.Chertov, I.Ju. Brink, T.N. Soprikina; № 2009125854/21(036020); zajavl. 06.07.2009; Opubl. 27.11.2010. Bjul. № 33. 2 s.
3. V68G 3/08. Ustrojstvo dlja sortirovki kurinogo pera / Chetov Ju. E., Galatov K.S. № 2008113670/12; zajavl. 07.04.2008; Opubl. 10.09.2009.- Bjul. №25. 2 s.
4. V68G 3/08. Ustrojstvo sortirovki pero-puhovogo syr'ja na frakcii / Chertov Ju. E., Galatov K.S. № 2010102611/05; zajavl. 26.01.2011; Opubl. 20.07.2011. Bjul. №20. 2 s.:il.
5. Soprikina, T.N. Perspektivy primeneniya kurinogo pera v izdelijah shvejnoj promyshlennosti / T.N. Soprikina, I.Ju. Brink, Ju.E.Chertov // Shvejnaja promyshlennost'. - 2007. - №4. – С.53–54.
6. Krasovskij, G.I. Planirovanie jeksperimenta / G.I. Krasovskij, G.F. Filaretov. – Мн.: Izd-vo BГУ, 1982. – 302 s.
7. Prohorov, V.T. Planirovanie jeksperimenta: ucheb. posobie / V.T. Prohorov. – М.: МТИ, 1988. – 64 s.
8. Mitrofanov, N.S. Sbor i obrabotka pero-puhovogo syr'ja na predpriyatijah pticepererabatyvajuwej promyshlennosti i pticefabrikah: obzornaja informacija / N.S. Mitrofanov, N.F.Makarova, S.V.Sinjuhina, Ju.V.Curkan, G.V.Chunina. – М.: АгроНИИТЭИММП, 1989. 44с.

### **Galatov Kiril Stanislavovich**

The South Russia State University of Economy and Service  
Post-graduate student of department «The applied mechanics and designing of machines»  
346530, Shakhty, Lane Sportivny,19  
Tel., 8-950-843-69-33, 88636289827  
E-mail: chertov\_yura@mail.ru

### **Chertov Jury Evgenovich**

The South Russia State University of Economy and Service»  
Candidate of technical science, associate professor of department «The applied mechanics and designing of machines»  
346530, Shakhty, Lane Morskoy, 70  
Tel. 8-928-776-38-17  
E-mail: chertov\_yura@mail.ru

# МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.735.043

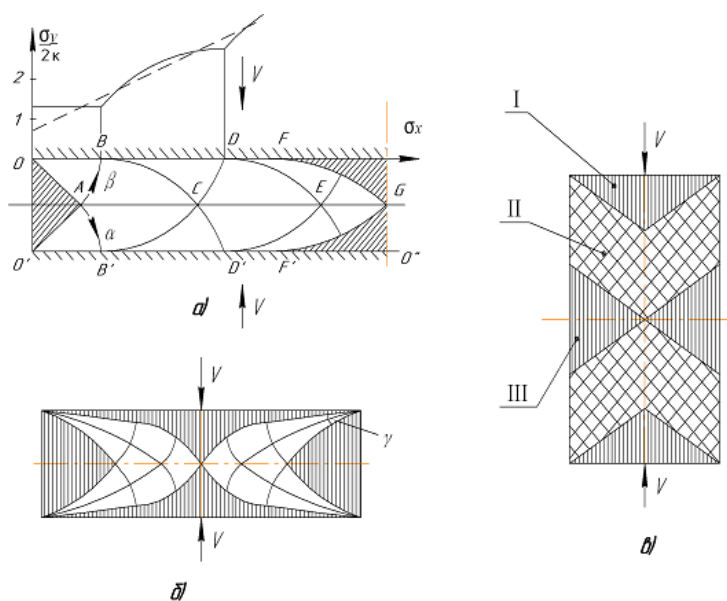
А.Ю. АЛБАГАЧИЕВ, Е.В. ЗЕРНОВ, А.М. МОЙСЕЕНКО

## ПЛОСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ОСАДКЕ ВЫСОКИХ ПОКОВОК

*Описывается плоское напряженное и деформированное состояние при осадке высоких поковок, построено поле линий скольжения и определено в нем напряжения и скорости в момент внедрения штампа в заготовку.*

**Ключевые слова:** напряженное состояние, линии скольжения, скорость скольжения, пластическая деформация.

Исследованию напряжённого и деформированного состояния при осадке жёсткопластического плоского слоя между двумя шероховатыми плитами посвящено немало работ. Пусть указанный слой осаживается двумя шероховатыми плитами, движущимися навстречу друг другу со скоростью  $V$  каждая. Задача по определению поля линий скольжения и распределению скоростей в материале была решена для случая, когда начальная толщина слоя  $2H$  значительно меньше его длины  $2\ell$ . В работах [2,3] построены поля напряжений и скоростей для случаев, когда  $\ell/H > 3,64$ . В работах [2,4] эта же задача решена для случая, когда  $1 \leq \ell/H \leq 3,64$ . На рис. 1 а и б, показаны поля линий скольжения для этих случаев. Авторы указывают, что при  $\ell \rightarrow H$  угол  $\gamma \rightarrow 0$  и точка С неограниченно приближается к точке А (рис. 1б). Так же отмечается [4], что при  $\ell/H < 1$  поле будет состоять из ортогональных прямых. Нашей задачей было построить поле линий скольжения для случаев  $\ell/H < 1$  и определить в нём напряжения и скорости в момент внедрения штампа в заготовку. На рис. 1в это поле показано. В области II наблюдается равномерное напряжённое состояние. Так как края слоя свободны от напряжений, следовательно, линии скольжения подходят к ним под углом  $45^\circ$ . Вертикальная ось симметрии слоя является главной, т.к. касательные напряжения в площадках перпендикулярных к ней равны нулю и значит, линии скольжения подходят к ней так же под углом



**Рисунок 1** – Поля линий скольжения при осадке жёсткопластического плоского слоя  
а – для случая  $\ell/H > 3,64$ ; б – для случая  $1 \leq \ell/H \leq 3,64$ ; в – для случая  $\ell/H < 1$   
I, III – шероховатые плиты; II – жёсткопластический плоский слой

Область I движется как жёсткое тело (рис.2), находясь под действием всестороннего сжатия и сил трения [2]. Область III так же движется, как жёсткое тело [2,4]. Подсчитаем предельную нагрузку для случая  $\ell/H < 1$ .

(Снизу – это отношение считаем ограниченным числом  $1/4$ , т.к. ниже этого значения заготовка теряет устойчивость, и указанный метод не применим).

Из работы [2] известно, что в частном случае, когда граница AE (рис.2), свободна от напряжений, параметры напряжённого состояния на AE вычисляются по формулам:

$$\theta = \varphi \pm \frac{\pi}{4} + m\pi,$$

$$\sigma = \pm k,$$

где  $\varphi$  – угол наклона нормали AE к оси OX;

$\theta$  – угол наклона линий скольжения в области II к оси OX;

$\sigma$  – среднее напряжение;

$k$  – пластическая постоянная.

В нашем случае  $\varphi = 0$ ,  $\theta = -\frac{\pi}{4}$ .

Тогда по формулам преобразования

$$\sigma_x = \sigma - k \sin 2\theta$$

$$\sigma_y = \sigma + k \sin 2\theta$$

получим:  $\sigma_x = 0$ ,  $\sigma_y = -2k$ . Предельная нагрузка  $P = 4k\ell$ .

Рассмотрим распределение скоростей. Область I движется как твёрдое тело вдоль отрицательной оси  $y$  со скоростью  $-V$  (скорость плиты). Обозначим составляющие скорости вдоль линий скольжения  $\alpha$  и  $\beta$  (рис.2) за  $U$  и  $v$  соответственно. На AC нормальная составляющая скорости равна  $-\frac{V}{\sqrt{2}}$ .

Нормальная составляющая скорости в области II не может быть разрывной, по этому,

в области II  $v = -\frac{V}{\sqrt{2}}$ .

Найдём  $U$  в области II. Обозначим горизонтальные скорости на AE и ED соответственно  $V_{x2}$  и  $V_{x3}$ . Из условия постоянства расхода следует:

$$V\ell = V_{x2}(H - \ell) + V_{x3}\ell \quad (1)$$

С другой стороны, из условия равенства работ:

$$A = A_{тр}, \quad (2)$$

где  $A$  – работа активных сил, действующих на образец;

$A_{тр}$  – работа сил сопротивления.

Ввиду симметрии образца относительно осей  $Ox$  и  $Oy$ , а так же симметрии нагрузки относительно этих осей, будем рассматривать отношение этих работ только в одной четверти (рис.2).

Тогда  $A = \rho \cdot \ell \cdot V \cdot t$ ,

где  $\rho = 2k$  – предельное давление;

$t$  – время.

$$A_{тр} = A_{тр2} + A_{тр3},$$

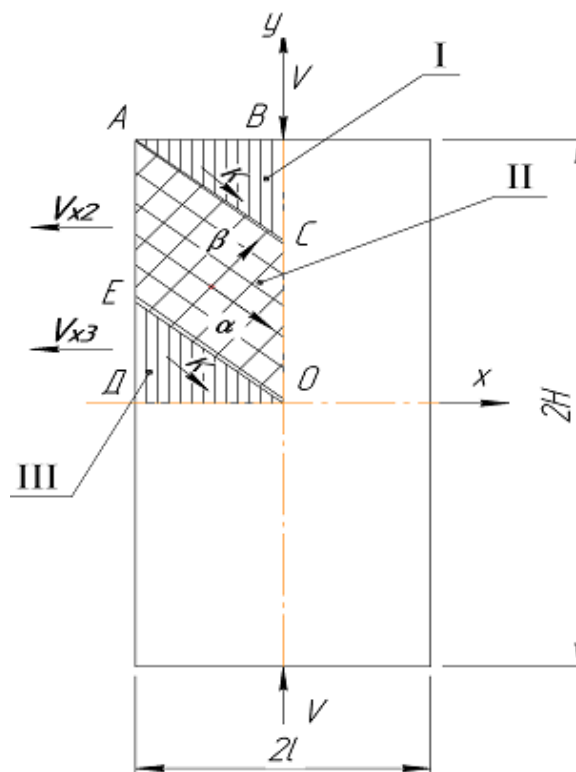


Рисунок 2 – Распределение скоростей скольжения

где  $A_{тр2}$  – работа сил трения на АС;  
 $A_{тр3}$  – работа сил трения на ОЕ.

$$A_{тр2} = K \cdot \ell \sqrt{2} \cdot V_{ск2} \cdot t$$

$$A_{тр3} = K \cdot \ell \sqrt{2} \cdot V_{ск3} \cdot t,$$

где  $V_{ск2}$  – скорость скольжения (скачок) области II относительно области I;  
 $V_{ск3}$  – скорость скольжения (скачок) области III относительно области II.

Значение  $V_{ск2} = U + \frac{V}{\sqrt{2}}$  (так как слагаемые имеют противоположные знаки),

где  $U = V_{x2} / \sqrt{2}$  (рис. 2).

Тогда

$$A_{тр2} = (V_{x2} / \sqrt{2} + \frac{V}{\sqrt{2}}) \cdot K \cdot \ell \sqrt{2} \cdot t$$

Значение  $V_{ск3} = V_{x3} / \sqrt{2} - U$  может быть различным, в зависимости от величины скоростей. Сначала предположим, что  $V_{ск3} = V_{x3} / \sqrt{2} - U > 0$ , т.е. область III обгоняет область II. Тогда

$$A_{тр3} = (V_{x3} / \sqrt{2} - V_{x2} / \sqrt{2}) \cdot K \cdot \ell \sqrt{2} \cdot t$$

Подставляя выражения для  $A$ ,  $A_{тр2}$ ,  $A_{тр3}$  в (2), получим  $2V = V_{x3} + V$ , т.е.  $V_{x3} = V$ . Тогда из выражения (1) следует, что  $V_{x2} = 0$ , что в реальных условиях не имеет места.

Положим теперь  $V_{x3} = U - V_{x3} / \sqrt{2} > 0$ , т.е. область II скользит быстрее, чем III.

Подставляя снова  $V_{x2}$  и  $V_{x3}$  в условие (2), получим:

$$V_{x3} = 2V_{x2} - V \tag{3}$$

Подставляя  $V_{x2}$  и  $V_{x3}$  в условие (1), получим:

$$V_{x2} = \frac{2V\ell}{H + \ell} \tag{4}$$

$$\text{и, следовательно, } U = \frac{\sqrt{2}V\ell}{H + \ell}.$$

Подсчитаем  $V_{x2}$  и  $V_{x3}$  по формулам (4), (3) для различных отношений  $\ell/H$ .

$$H = \frac{3}{2}\ell$$

Тогда  $V_{x2} = \frac{4V}{5}$ ;  $V_{x3} = \frac{3V}{5}$ , т.е. область II начинает двигаться с большей горизонтальной скоростью, чем область III.

$$H = 2\ell$$

Таким образом,  $V_{x2} = \frac{2}{3}V$ ;  $V_{x3} = \frac{1}{3}V$ , т.е.

для более высоких образцов скорость горизонтального перемещения области II возрастает, по сравнению с той же скоростью III, значит, возможность двойного бочкообразования для таких же образцов увеличивается.

$$H = 3\ell$$

Тогда  $V_{x2} = \frac{2V\ell}{3\ell + \ell} = \frac{V}{2}$ ;  $V_{x3} = 2V_{x2} - V = 0$ , т.е. тело III останавливается.

Если  $H > 3\ell$ , то формулы (3), (4) не работают, т.к. по ним получается, что  $V_{x3} < 0$ , что невозможно. В этом случае нужно предположить, что тело III остаётся неподвижным ( $V_{x3} = 0$ ) жёстким телом и имеет вид, показанный на рисунке 3 (очаг пластической деформации II смещается вверх).

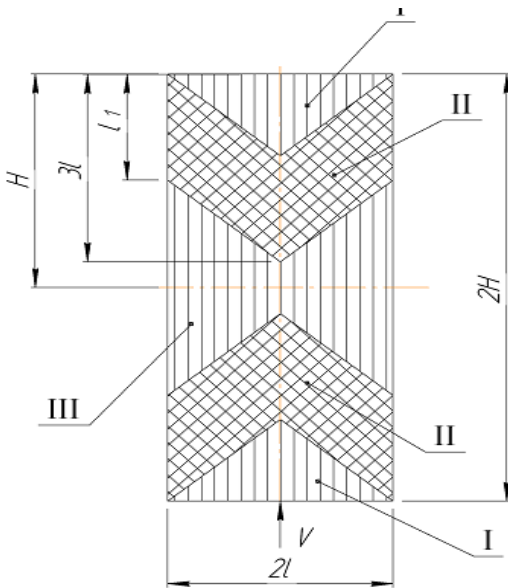


Рисунок 3 Смещение очага деформации

Условие постоянства расходов тогда имеет вид:

$$V \cdot \ell = V_{x2} \cdot \ell, \text{ где } \ell = 3\ell - \ell = 2\ell, \text{ тогда } V_{x2} = \frac{V\ell}{2\ell} = \frac{V}{2}.$$

Итак, при  $H > 3\ell$  горизонтальная скорость тела II  $V_{x2} = \frac{V}{2}$ .

В работе [1] механизм бочкообразования рассмотрен с помощью другого метода, там же изучается изменение напряжённого и деформированного состояния заготовки по времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов, А.Л. Технологические задачи теории пластичности. – М.: Машиностроение, 2006.-475с.
2. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности М.: Наука, 1969.- 420 с.
3. Соколовский, В.В. Теория пластичности М.: Высшая школа, 1969.-608 с.
4. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов.–М.: Metallurgia, 1972.- 408 с.

#### **Албагачиев Али Юсупович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики

Доктор технических наук., проф. Зав. кафедрой “Технологическая информатика и технология машиностроения”

Тел.:8(495) .:+7(495) 2694588

E-mail: Albagachiev@yandex

#### **Зернов Евгений Владимирович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика»

Тел.:8(495) 4696759

#### **Моисеенко Анатолий Михайлович**

Орловский государственный аграрный университет, г. Орел

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Математика»

Тел.:8(4862) 70-18-87

E-mail: puare54@rambler.ru

---

A.Yu. ALBAGACHIEV, E.V. ZERNOV , A.M. MOISEENKO

## PLANE STRESS AND STRAIN STATE AT HIGH SEDIMENT FORGINGS

*Described by plane stress and strain state at high sediment forgings, built the slip line field and define the voltage and speed at the moment of stamp introduction in preparation.*

**Key words:** stress condition, sliding lines, sliding velocity, plastic deformation.

### BIBLIOGRAPHY

1. Vorontsov, A.L. Technological Problems of Plasticity Theory, M., *Mechanical Engineering*, 2006, 475 p.
2. Kachanov, L.M. Fundamentals for Plasticity Theory, M., *Science*, 1969, 420 p.
3. Sockolovsky, V.V. Plasticity Theory, M., *Higher School*, 1969, 608 p.
4. Tomlenov, A.D. Theory for Plastic Deformation of Metals, M., *Metallurgy*, 1972, 408 p.

#### **Albagachiev Ali**

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science

Doctor of Technical Sciences

Тел.:+7(495) 2694588

E-mail: Albagachiev@yandex.ru

#### **Zernov Evgeny**

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science

Candidate of Technical Sciences

#### **Moiseenko Anatoly**

Orel State Agrarian University

Doctor of Technical Sciences

Тел.:+7(4862) 70-18-87

E-mail: puare54@rambler.ru



## МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

*Описаны методы оптимизации режимов резания по параметру производительности процесса при ограничениях по точности обработки, шероховатости обработанной поверхности, мощности станка и прочности его силовых узлов.*

**Ключевые слова:** стойкость, фасонный контур, подача, износ, точность, производительность.

Целью оптимизации процесса обработки является определение рациональных режимов резания с помощью математической функции, которая основана на учете связи между себестоимостью и режимом резания. Обобщенная методология оптимизации режимов резания была предложена проф. Бобровым В.Ф [1]. Им предлагался следующий порядок назначения оптимальных режимов резания:

- задаемся функцией цели процесса обработки,
- исследуем влияние факторов, чтобы определить математические и технологические ограничения,
- проводим исследование, чтобы определить рациональные режимы резания.

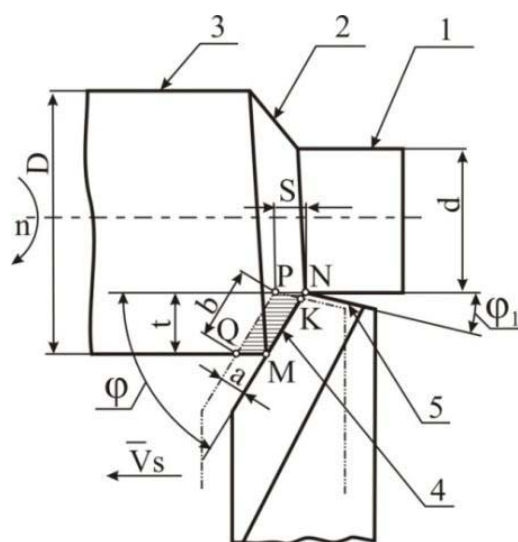
Общий вид целевой функции оптимизации процесса точения:

$$Y = f(x), \quad (1)$$

где  $Y$  - оптимальные цели - выходные величины;

$x$  - технологические параметры - входные величины.

Ограничительные условия параметров режима резания  $(t, v, s)$ : глубина резания  $t_{\min} \leq t_{\text{оп}} \leq t_{\max}$ ; скорость резания  $v_{\min} \leq v_{\text{оп}} \leq v_{\max}$  (или частота вращения шпинделя  $n_{\min} \leq n_{\text{оп}} \leq n_{\max}$ ); подача  $s_{\min} \leq s_{\text{оп}} \leq s_{\max}$ . Ограничения по требуемой шероховатости поверхности  $R_z \leq R_{z\text{доп}}$  и мощности станка  $N_s \leq N_{\text{эст}}$ .



**Рисунок 1 - Элементы срезаемого слоя при несвободном одностороннем резании:**

- 1 – обработанная поверхность;
- 2 – поверхность резания;
- 3 – обрабатываемая поверхность;
- 4 – главная режущая кромка;
- 5 – вспомогательная режущая кромка

дов: черновых и чистовых. При этом глубина резания на черновых ходах должна быть большей, а на чистовой ход следует оставлять такой минимальный припуск, который обеспечит изготовление детали с заданным допуском (рис. 1).

Выходными величинами оптимизации являются качество обрабатываемой детали  $\Rightarrow \max$ ; себестоимости  $\Rightarrow \min$ ; производительность  $\Rightarrow \max$ . Геометрическими параметрами качества являются точность формы и размера, а также высота шероховатостей обработанной поверхности. Часто к геометрическим параметрам добавляют требования по глубине поверхностно-деформированного слоя и величине остаточных напряжений. Если геометрические параметры обеспечивают правильным выбором геометрии инструмента в плане и подачи, то для достижения допустимых или желаемых величин остаточных напряжений требуется выбор вида окончательной обработки поверхности и её режимов в сочетании с геометрией инструмента.

Максимально возможная глубина резания равна припуску, оставленному на обработку. Если нет ограничений по точности обработки, то весь припуск срезают за один проход. В противном случае, припуск снимается за несколько рабочих ходов:

Максимально допустимая подача, как правило, ограничивается эффективной мощностью или крутящим моментом станка, прочностью слабого звена механизма подачи станка, жесткостью обрабатываемой заготовки, прочностью и жесткостью инструмента, шероховатостью обработанной поверхности.

Для осуществления процесса резания необходимо, чтобы эффективная мощность резания была бы меньше или равна эффективной мощности на шпинделе станка  $N_э \leq N_{эст}$ , причем

$$N_э = \frac{P_z v}{6120} = \frac{C_{p_z} \cdot t^{x_{p_z}} \cdot s^{y_{p_z}} \cdot \pi D n}{6120 \cdot 1000}, \text{ кВт},$$

где  $P_z$  – сила резания (кГс);

$s$  – подача (мм/об);

$v$  – скорость резания (мм/мин);

$n$  – частота вращения шпинделя;

$C_{p_z}$  – коэффициент, характеризующий обрабатываемый металл и условия его обработки;

$x_{p_z}, y_{p_z}$  – показатели степеней;

$D$  – диаметр обрабатываемой заготовки (мм).

Подставляя  $N_{эст}$  и решая относительно  $s$ , получим

$$s_{\max} = \left( \frac{6120 \cdot 1000 \cdot N_{эст}}{D n t^{x_{p_z}}} \right)^{\frac{1}{y_{p_z}}}, \quad (2)$$

где  $N_э$  – эффективная мощность резания;

$N_{эст}$  – эффективная мощность станка.

Для безаварийной работы станка необходимо, чтобы  $2M \leq 2M_{ст}$ , решая это неравенство относительно  $s$ , получим предельно допустимую подачу из условия достаточности крутящего момента на шпинделе станка

$$s_{\max} = \left( \frac{2000 \cdot M_{ст}}{C_{p_z} \cdot D \cdot t^{x_{p_z}}} \right)^{\frac{1}{y_{p_z}}} \text{ (мм/об)}. \quad (3)$$

Для того чтобы не произошла поломка или преждевременный износ слабого звена механизма подачи станка, необходимо, чтобы при точении максимально допустимая механизмом подачи станка сила  $P_{мп} \geq P_x$ . Тогда получаем значение предельной подачи из условия неперевышения максимально допустимой механизмом подачи станка силы

$$s_{\max} = \left( \frac{P_{мп}}{C_{p_x} \cdot t^{x_{p_x}}} \right)^{\frac{1}{y_{p_x}}}, \quad (4)$$

где  $x_{p_z}, y_{p_z}$  – показатели степеней.

Под действием реакций сил  $P_z$  и  $P_y$  обрабатываемая заготовка упруго изгибается. Тогда максимальная стрела прогиба в направлении оси  $y$ :

$$y_{\max} = \frac{P_y \cdot l^3}{K_3 \cdot EJ},$$

где  $l$  – длина детали;

$E$  – модуль упругости;

$J$  – полярный момент инерции;

$K_3$  – коэффициент, зависящий от способа закрепления детали [2].

Различные схемы крепления заготовок при обработке и соответствующие им значения упругих прогибов приведены в таблице. Выражая  $P_y$  через  $t$  и  $s$ , получим:

$$y_{\max} = \frac{C_{P_y} \cdot t^{x_{P_y}} \cdot s^{y_{P_y}} \cdot l^3}{0,05K_3 \cdot d^4},$$

где  $C_{P_y}$  – коэффициент, характеризующий обрабатываемый металл;

$x_{P_y}, y_{P_y}$  – показатели степеней;

$D$  – диаметр детали

Тогда

$$s_{\max} = \left( \frac{0,05K_3 \cdot d^4 \cdot y_{\text{доп}}}{C_{P_y} \cdot t^{x_{P_y}} \cdot l^3} \right)^{\frac{1}{y_{P_y}}} \text{ (мм/об)}. \quad (5)$$

Шероховатость обработанной поверхности

$$R_z = \frac{C_R \cdot t^{x_R} \cdot s^{y_R} \cdot \varphi^{z_R} \cdot \varphi_1^{z_R}}{r^{q_R}},$$

тогда

$$s_{\max} = \left( \frac{R_{z\text{доп}} \cdot r^{q_R}}{C_R \cdot t^{x_R} \cdot \varphi^{z_R} \cdot \varphi_1^{z_R} \cdot l^3} \right)^{\frac{1}{y_R}} \text{ (мм/об)}, \quad (6)$$

где  $R_{z\text{доп}}$  – допускаемая высота шероховатостей обработанной поверхности;

$C_R$  – коэффициент, характеризующий обрабатываемый металл;

$x_R, y_R, z_R, q_R$  – показатели степеней;

$R$  – радиус закругления при вершине резца в плане.

При точении фасонных поверхностей принципиальная кинематическая схема определяется сочетанием двух движений: равномерного вращательного движения детали и равномерного поступательного движения резца вдоль профиля детали (рис. 2).

В работе [3] обеспечение постоянства шероховатости вдоль криволинейной образующей при точении фасонных поверхностей деталей достигается путем стабилизации кинематического главного угла в плане при введении в технологическую систему дополнительной круговой координаты.

Авторами показано, что при точении деталей с криволинейной образующей радиус кривизны определяет вид доминирующих ограничений, накладываемых технологической системой на положение центра поворота резца; в частности, при малых радиусах (менее 10 мм) это динамические ограничения, например скорости перемещения суппортов станка, при больших радиусах (более 100 мм) – максимально допустимые перемещения суппортов станка. На наш взгляд такое решение требует серьезной модернизации станка или создания специализированных станков с ЧПУ и программируемым поворотным суппортом, поэтому в настоящей работе исследуется точение на станке с традиционной компоновкой. Если деталь имеет форму сферы (рис. 3), то в процессе резания мгновенные значения углов инструмента в плане становятся переменными и подчиняющимися следующим зависимостям:

$$\varphi_i = \varphi - \theta > 0 \text{ и } \varphi_{1i} = \varphi_1 - \theta > 0,$$

где  $\varphi_i$  – мгновенный главный угол в плане;

$\varphi$  – статический главный угол в плане резца;

$\varphi_1$  – вспомогательный угол в плане,

$\theta$  – угол между касательной в каждой точке обрабатываемого профиля и осью центров станка.

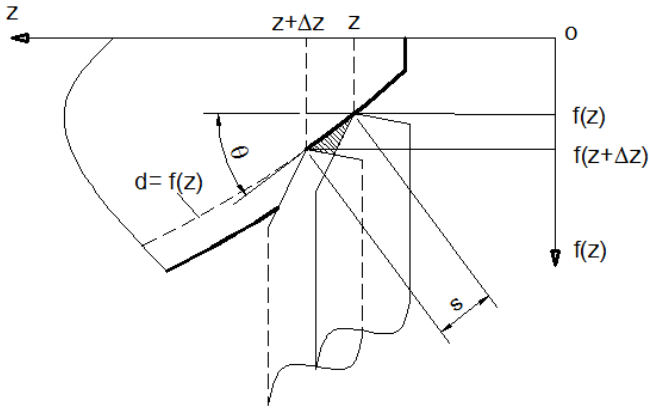


Рисунок 2 - Сечение срезаемого слоя

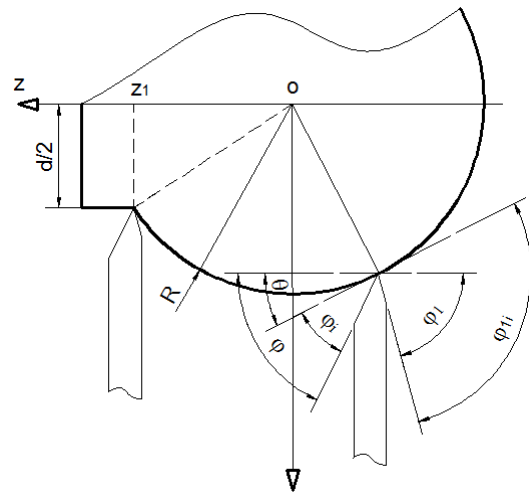


Рисунок 3 - Точение сферы

Когда  $z = -R$ , то  $\theta_{\max} = 90^\circ$ , и  $\varphi > 90^\circ$ . Если  $z = z_1$ , то  $\operatorname{tg}\theta = \frac{2z_1}{d}$ , и  $\varphi_1 > \operatorname{arctg} \frac{2z_1}{d}$ .

Главный угол в плане и радиус при вершине – параметры, обеспечивающие геометрическое условие возможности обработки фасонной поверхности данным резцом. Наиболее подходящие значения углов определяются исходя из профиля обрабатываемой детали. Однако, для достижения удовлетворительных качества поверхности и стойкости инструмента, рекомендуется обеспечивать угол в  $7^\circ$  [4].

В случае детали произвольной формы контура учитывать мгновенные значения углов в плане инструмента: мгновенного главного угла в плане  $\varphi_i = \varphi - \theta$  и мгновенного вспомогательного угла в плане  $\varphi_{1i} = \varphi_1 + \theta$ .

Тогда

$$R_z = \frac{C_R \cdot t^{x_R} \cdot s^{y_R} \cdot (\varphi - \theta)^{z_R} \cdot (\varphi_1 + \theta)^{z_R}}{r^{q_R}}.$$

Допускаемая высота шероховатостей обработанной поверхности

$$R_z = \frac{C_R \cdot t^{x_R} \cdot s^{y_R} \cdot (\varphi - \theta)^{z_R} \cdot (\varphi_1 + \theta)^{z_R}}{r^{q_R}} \leq R_{z\text{доп}}.$$

Отсюда

$$s^{y_R} [(\varphi - \theta)(\varphi_1 + \theta)]^{z_R} \leq \frac{R_{z\text{доп}} \cdot r^{q_R}}{C_R \cdot t^{x_R}}.$$

Тогда

$$y_R \ln s + z_R \ln [ -\theta^2 + \theta(\varphi - \varphi_1) + \varphi\varphi_1 ] \leq \ln \frac{R_{z\text{доп}} \cdot r^{q_R}}{C_R \cdot t^{x_R}}.$$

Обозначив

$$\ln s = x_1, \ln [ -\theta^2 + \theta(\varphi - \varphi_1) + \varphi\varphi_1 ] = x_2, \ln \frac{R_{z\text{доп}} \cdot r^{q_R}}{C_R \cdot t^{x_R}} = b,$$

где

$$0 < x_2 \leq \ln \frac{(\varphi + \varphi_1)}{2}, \tag{7}$$

получим математическую модель подачи для  $R_z \leq R_{z\text{доп}}$ :

$$y_R \cdot x_1 + z_R \cdot x_2 \leq b. \tag{8}$$

Подача  $s$  определяется из ограничивающих зависимостей (7) и (8). С увеличением величины  $x_2$ , величина  $x_1$  уменьшается. Чтобы неравенство (8) удовлетворялось при любом

значении  $x_2 \in \left(0, \ln \frac{\varphi + \varphi_1}{2}\right]$  нужно, чтобы  $x_1 \leq x_{1\text{доп}}$ ,  $x_{1\text{доп}} = \frac{b - z_R \ln \frac{\varphi + \varphi_1}{2}}{y_R}$ ,

так как

$$s_{\text{доп}} = e^{x_{1\text{доп}}}. \quad (9)$$

В общем случае значение предельно допустимой подачи выбираем как меньшее из множества, определяемого по формулам [(2), (3), (4), (5), (6)].

Описанный метод не может считаться оптимальным, так как он предназначен в основном для максимального использования только режущих свойств инструмента. При работе за один проход, когда глубина резания равна припуску на обработку, режим резания будет оптимальным при такой комбинации подачи и числа оборотов шпинделя, при которой принятый критерий оптимальности достигнет минимума или максимума. Оптимальный режим резания находят с учетом известных физических связей между отдельными параметрами режима и заданных ограничений, определяемых станком и технологическими требованиями к обработке. В качестве критерия оптимальности принимают основное технологическое время обработки, которое должно быть минимальным.

Это справедливо в большинстве случаев, однако в реальных производственных условиях нужно оперировать не только основным временем обработки поверхности, но штучным. Потому что завышенные режимы резания приводят к большему расходу инструмента, более частым его сменам и подналадкам, что в свою очередь вызывает непроизводительные простои оборудования и увеличение в себестоимости доли затрат на инструмент, амортизацию оборудования и зарплату рабочего.

Скорость резания определяется по известной формуле Тейлора [5]:

$$v = \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot s^{y_v}} = \frac{\pi D n}{1000}, \quad (10)$$

где  $C_v$  – коэффициент, характеризующие обрабатываемый металл и условия его обработки;

$K_v$  – общий поправочный коэффициент на измененные условия обработки по отношению к эталонным;

$T$  – стойкость в мин, соответствующая данной скорости резания;

$m$  – показатель относительной стойкости, характеризующий влияние стойкости на скорость резания;

$x_v, y_v$  – показатели степеней.

На период стойкости  $T$  в формуле (10) для определения скорости резания влияет время на переналадку оборудования и его цена. Так для работы автоматических линий период стойкости  $T$  принимают равным продолжительности смены или её половины. В современных станках с ЧПУ, обладающих магазином или револьверной головкой для быстрой смены инструмента, подход должен быть ближе к варианту, рекомендуемому инструментальными фирмами [4].

На современных станках с ЧПУ для того, чтобы сохранить постоянную скорость резания, предусмотрена возможность соответственного изменения частоты вращения шпинделя. Но при обработке очень маленьких диаметров и при максимальном приближении к оси заготовки, это компенсация будет неосуществима, так как диапазон скоростей станка ограничен. В том случае, если заготовка имеет перепады диаметров, конусную или криволинейную поверхность, скорость резания необходимо назначать с учетом этих изменений.

Методика назначения режимов резания при продольном точении поясняется следующим примером. Пусть имеется некоторый параметр, являющийся линейной функцией ряда переменных. Связь между переменными, с учетом накладываемых ограничений, выражается

системой линейных равенств или неравенств. Нужно отыскать такие неотрицательные значения переменных, удовлетворяющих всем наложенным ограничениям, при которых параметр оптимизации достигает минимума или максимума. Поясним расчет режима резания на примере продольного точения, приняв следующие ограничения:

1) Допустимая скорость резания определяется по формуле (10)

Из неё получаем

$$ns^{y_v} = \frac{318 \cdot C_v \cdot K_v}{D \cdot T^m \cdot t^{x_v}}.$$

2) Эффективная мощность станка

$$N_{\text{э}} = \frac{P_z \cdot v}{6120} \leq N_{\text{эст}}.$$

Выразив скорость резания через  $D$  и  $n$ , получим

$$\frac{C_{p_z} \cdot K_{p_z} \cdot t^{x_{p_z}} \cdot s^{y_{p_z}} \cdot \pi D n}{6120 \cdot 1000} \leq N_{\text{эст}}.$$

Отсюда

$$ns^{y_{p_z}} \leq \frac{195 \cdot 10^4 \cdot N_{\text{эст}}}{C_{p_z} \cdot K_{p_z} \cdot D \cdot t^{x_{p_z}}}.$$

3) Допускаемая высота шероховатостей обработанной поверхности

$$R_z = \frac{C_R \cdot t^{x_R} \cdot s^{y_R} \cdot \varphi^{z_R} \cdot \varphi_1^{z_R}}{r^{q_R}} \leq R_{\text{здоп}},$$

откуда допускаемая подача

$$s^{y_R} \leq \frac{R_{\text{здоп}} \cdot r^{q_R}}{C_R \cdot t^{x_R} \cdot \varphi^{z_R} \cdot \varphi_1^{z_R}}.$$

С учетом уравнения (9) для точения фасонных поверхностей

$$s^{y_R} \leq \frac{R_{\text{здоп}} \cdot r^{q_R}}{C_R \cdot t^{x_R}} \cdot \left( \frac{2}{\varphi + \varphi_1} \right)^{z_R}.$$

4) Максимальная сила, допускаемая прочностью слабого звена механизма подачи станка,

$$P_x = C_{p_x} \cdot K_{p_x} \cdot t^{x_{p_x}} \cdot s^{y_{p_x}} \leq P_{\text{мп}},$$

откуда

$$s^{y_{p_x}} \leq \frac{P_{\text{мп}}}{C_{p_x} \cdot K_{p_x} \cdot t^{x_{p_x}}}.$$

5) Минимальная подача станка  $s \geq s_{\text{стmin}}$ .

6) Максимальная подача станка  $s \leq s_{\text{стmax}}$ .

7) Минимальное число оборотов шпинделя станка  $n \geq n_{\text{стmin}}$ .

8) Максимальное число оборотов шпинделя станка  $n \leq n_{\text{стmax}}$ .

Для того чтобы  $t_o = \frac{L}{ns}$  было минимальным, необходимо иметь произведение  $ns$

максимальным. Поэтому в качестве оценочной может быть принята функция  $f = ns = \max$ .

Чтобы систему ограничений и оценочную функцию привести к линейной форме, прологарифмируем полученные выражения, предварительно умножив для удобства вычисления в первых шести и последнем выражениях подачу на 100. Обозначив  $\ln n = x_1$ ,  $\ln(100s) = x_2$  правые части выражений через  $b$ , в результате этого, после преобразований получим математическую модель оптимального режима резания:

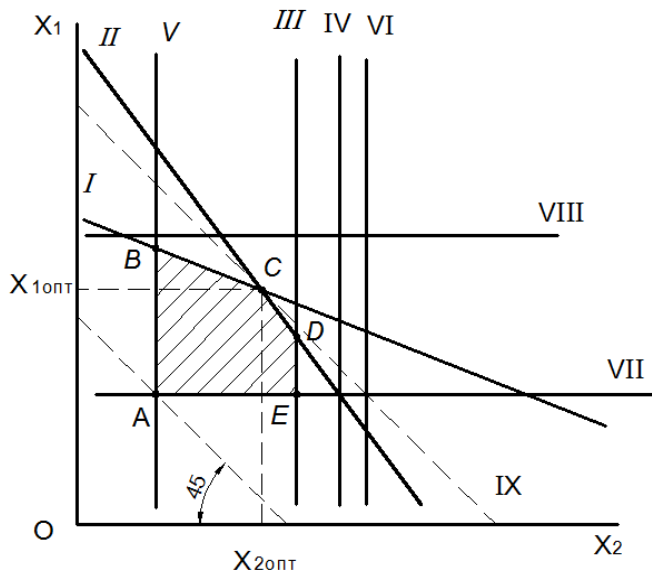


Рисунок 4 - Геометрическая интерпретация математической модели оптимального режима резания

$$A \begin{cases} x_1 + y_v x_2 = b_1 \\ x_1 + y_{p_z} x_2 \leq b_2 \\ y_R x_2 \leq b_3 \\ y_{p_x} x_2 \leq b_4 \\ x_2 \geq b_5 \\ x_2 \leq b_6 \\ x_1 \geq b_7 \\ x_1 \leq b_8 \end{cases}$$

$$f = x_1 + x_2 = \max .$$

Она состоит из восьми ограничивающих зависимостей *A* и девятой, подлежащей оптимизации. Геометрическая интерпретация математической модели оптимального режима резания представлена на рисунке 4. В координатной системе  $x_1 o x_2$  линии I—VIII соответственно изображают уравнения ограничивающих

зависимостей. При пересечении они дают число точек *i*, определяемое числом сочетаний из восьми элементов по двум с вычетом четырех точек за счет невозможности пересечения параллельных прямых. Таким образом

$$i = C_8^2 - 4 = \frac{8!}{2!(8-2)!} - 4 = 24 .$$

В числе этих точек имеются такие, которые удовлетворяют всем уравнениям поставленных ограничений. Штриховой линией IX, наклоненной к оси абсцисс под углом 45°, изображена оценочная функция, подлежащая оптимизации.

Если система ограничений не противоречива, то область возможных решений системы в координатах  $x_1 o x_2$  очерчена выпуклым многоугольником. Координаты вершин многоугольника являются корнями совместного решения уравнений системы, а точки, лежащие внутри многоугольника, удовлетворяют всем ограничениям. Чтобы найти оптимальное решение среди многих решений системы ограничений, необходимо среди точек многоугольника найти такие, для которых линейная форма оценочной функции будет иметь максимальное значение. Пусть, например, многоугольником решений является заштрихованный многоугольник *ABCDE*.

Он ограничен линиями минимального числа оборотов шпинделя и минимальной подачи, линией подачи, допускаемой высотой шероховатостей обработанной поверхности, линиями режущей способности резца и эффективной мощности станка. Будем перемещать прямую IX от начала координат параллельно самой себе. Когда прямая попадет в точку *A* многоугольника, линейная форма оценочной функции будет иметь минимальное значение. При дальнейшем перемещении линейная форма будет расти и достигнет максимума в точке *C*, координаты которой  $x_{1opt}$  и  $x_{2opt}$ , таким образом, будут соответствовать оптимальному решению системы.

При решении задачи, прежде всего, определяют координаты  $x_1$  и  $x_2$  всех точек пересечения прямых по формулам для корней системы уравнений. Далее выясняют, какие из значений  $x_1$  и  $x_2$  удовлетворяют всем уравнениям ограничений системы. В заключение определяют координаты вершины многоугольника, для которой их сумма имеет максимальную величину:

$$x_{1opt} + x_{2opt} = \max .$$

Так как  $x_{1\text{опт}} = \ln n_{\text{опт}}$ ,  $x_{2\text{опт}} = \ln(100s)$ , то  $n_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}}$ ,  $s_{\text{опт}} = \frac{1}{100} e^{x_{2\text{опт}}}$ .

То есть оптимальные значения параметров режима резания найдены.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров, В.Ф. Основы теории резания / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1976. – 344 с.
2. Ямников, А.С. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / А.С. Ямников и др. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – 269 с.
3. Панин, В.В. Выбор положения дополнительной системы координат при обработке сложнопрофильных деталей / В.В. Панин, Г.В. Шадский, Д.Д. Шаталов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. Ч.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – С.262-267.
4. Metalworking products/Elektronik catalogue. Sandwik Coromant CoroGuide. Version 2009.2.
5. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / Под ред. В.И. Баранчикова. - М.: Машиностроение, 1990. 400 с.

#### **Нгуен Ван Кыонг**

Тульский государственный университет, г. Тула  
аспирант кафедры технологии машиностроения, ТулГУ,  
Тел. +7 (953) 441 09 89  
E-mail: nguyencuong20032004@yahoo.com

#### **Ямников Александр Сергеевич**

Тульский государственный университет, г. Тула  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. (84872) 33-23-10  
E-mail: Yamnikovas@mail.ru

---

NGUYEN VAN CUONG, A.S. YAMNIKOV

### METHODOLOGY FOR OPTIMIZATION OF CUTTING CONDITIONS

*In this paper, methods for optimization of cutting conditions are de-scribed regarding productive parameter of process under limitation of cutting accuracy, roughness of fabricated surface, power of machine, and strength of force assemblies.*

**Keywords:** durability, profiled contour, wear, accuracy, productivity.

### BIBLIOGRAPHY

1. Bobrov, V.F. Osnovy teorii rezanija / V.F. Bobrov. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 344 s.
2. Jamnikov, A.S. Osnovy tehnologii mashinostroenija: uchebnik dlja vuzov / A.S. Jamnikov i dr.- Tula: Izd-vo TulGU, 2006. – 269 s.
3. Panin, V.V. Vybor polozhenija dopolnitel'noj sistemy koordinat pri obrabotke slozhnoprofil'nyh detalej / V.V. Panin, G.V. Shadskij, D.D. Shatalov // Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki. Vyp. 4. Ch.1. Tula: Izd-vo TulGU, 2009. – S.262-267.
4. Metalworking products/Elektronik catalogue. Sandwik Coromant CoroGuide. Version 2009.2.
5. Progressivnye rezhuvie instrumenty i rezhimy rezanija metallov: Spravochnik / Pod red. V.I. Baranchikova. - М.: Mashinostroenie, 1990. 400 s.

#### **Nguyen Van Cuong**

Tula state university, Tula  
Phd. Student, Department of Mechanical Engineering TSU  
+7953 441 09 89  
E-mail: nguyencuong20032004@yahoo

#### **Yamnikov Aleksandr Sergeevich**

Tula state university, Tula  
Doctor of technical science, professor of department “Machine building technology”  
Tel.: (84872) 33-23-10  
E-mail: Yamnikovas@mail.ru



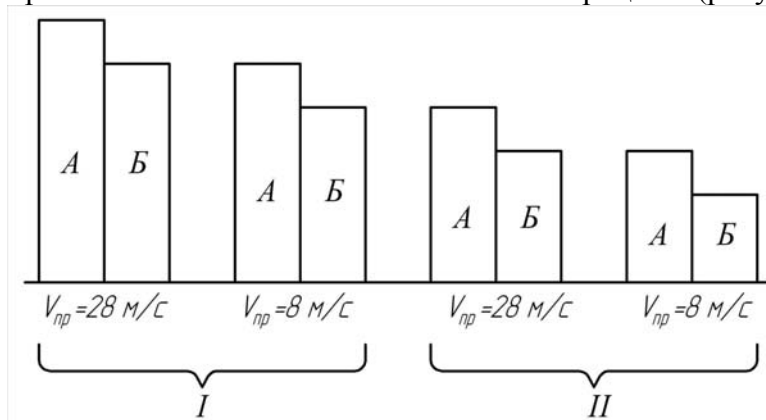
## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНО-ЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В КОНТЕЙНЕРАХ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В МАГИСТРАЛЯХ

*Рассмотрены преимущества использования высокого давления в магистралях и приводах электрохимического оборудования с импульсно-циклической подачей электродов. Приведен анализ технологических показателей импульсно-циклической электрохимической размерной обработки при использовании оборудования и средств технологического оснащения с магистралями высокого давления.*

**Ключевые слова:** технологических показателей импульсно-циклической электрохимической размерной обработки, магистрали высокого давления, построение технологического процесса.

Любой технологический процесс имеет несколько этапов [1], которые включают: подготовку, проектирование с выбором исходных данных, обоснование применения в процессе исследуемых способов или параметров, отработку технологичности детали под условия ее изготовления (в рассматриваемом случае при использовании импульсно-циклической электрохимической размерной обработки), расчет и разработка программ для технологических режимов, выбор заготовки, оснастки и оборудования, нормирование операций. Следующим этом является настройка оборудования, включая установку или передачу управляющих программ, настройку на станке средств технологического оснащения (инструмент, приспособления), изготовление и контроль первой детали в партии, запуск оборудования для выпуска серии изделий. Следующим этапом являются действия исполнителей (в том числе средств автоматизации) по оценке качества изделий (контроль в соответствии с программой: выборочный, сплошной, специальный), промывка и консервация объектов, их передачу на склад или на механосборку, оформление документации (в бумажном виде или формате базы данных).

На подготовительном этапе обработки [3] влияние высокого давления в магистралях приводит к изменению циклограмм в пользу повышенной скорости и снижению времени на подготовительные операции, усилению насосного эффекта, что дает возможность выровнять условия обработки крупногабаритных деталей. Это значительно расширяет технологические возможности процесса и повышает технологические показатели. В [2], [4], [5] показано влияние скорости прокачивания электролита на изменение электропроводности среды, определяющей режимы обработки и технологические показатели процесса (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Диаграмма зависимости удельной электропроводности электролита от скорости прокачки**  
 А – при начальном межэлектродном зазоре 0,3 мм; Б – при начальном межэлектродном зазоре 1,5 мм;  
 I – концентрация электролита 5%; II – концентрация электролита 10%;  $V_{пр}$  – скорость прокачки электролита.

Как известно из [2], съем материала за период действия импульса тока зависит от стабильности режимов, в том числе скорости течения электролита, его концентрации, величины

начального межэлектродного зазора. По [3] величина припуска ( $z_1$ ), снимаемого за импульс тока, при неподвижных инструментах может быть получена из уравнения:

$$z_1^2 - 2s_0z_1 - \frac{\alpha}{\gamma}\eta\chi(U - \Delta U)\tau_p = 0, \quad (1)$$

где  $s_0$  – начальный межэлектродный зазор, устанавливаемый перед началом каждого импульса в конце паузы очистки электролита от продуктов обработки;

$\alpha$  – электрохимический эквивалент обрабатываемого материала;

$\gamma$  – плотность обрабатываемого материала;

$\eta$  – выход по току (аналог коэффициента полезного действия);

$\chi$  – удельная электропроводность электролита;

$U$  – напряжение на электродах;

$\Delta U$  – потери напряжения;

$\tau_p$  – время рабочей части импульса.

После нахождения  $z_1$  можно установить скорость анодного растворения ( $V_a$ ):

$$V_a = \frac{z_1}{\tau_p}. \quad (2)$$

Тогда можно значительно интенсифицировать процесс, если сделать электроды подвижными со скоростью сближения с заготовкой ( $V_n$ )

$$V_n = (0,8-0,9)V_a \quad (3)$$

Это реально осуществить, если инерционные силы приводов электродов-инструментов незначительны, что возможно за счет минимизации массы подвижных частей при использовании высоких давлений рабочей среды. В нашем случае применялись давления до 70 МПа, что снизило массу подвижных частей в 10-15 раз.

На рисунке 1 показано влияние скорости прокачивания электролита в период вибрационного процесса цикла при колебании облегченного привода, который за счет насосного эффекта движется со значительно большей скоростью. При этом изменяются зазоры, температура и другие параметры, влияющие на скорость анодного растворения и технологические показатели процесса. Из рисунка 1 можно заключить, что подача электрода-инструмента должна обеспечивать межэлектродный зазор постоянным в течение всей рабочей части цикла импульса ( $s_0 \rightarrow \text{const}$ ), что эффективно реализовать в при больших давлениях в магистралях и наименьшей массе подвижных частей приводов. При использовании магистралей высокого давления целесообразно модернизировать рабочую зону контейнера, расширить пространство для базирования заготовок, снизить габариты приводов перемещения электродов-инструментов при импульсно-циклическом перемещении, имеющие уплотнения заменить на предлагаемые [6], [7]. Это позволяет создать ресурсосберегающие технологии. На рисунке 2, 3 приведены циклограммы, показывающие увеличение времени действия технологического тока ( $\tau_p$ ) относительно нерабочего периода ( $\tau_k$ ), необходимого для удаления продуктов обработки из межэлектродного пространства и магистралей.

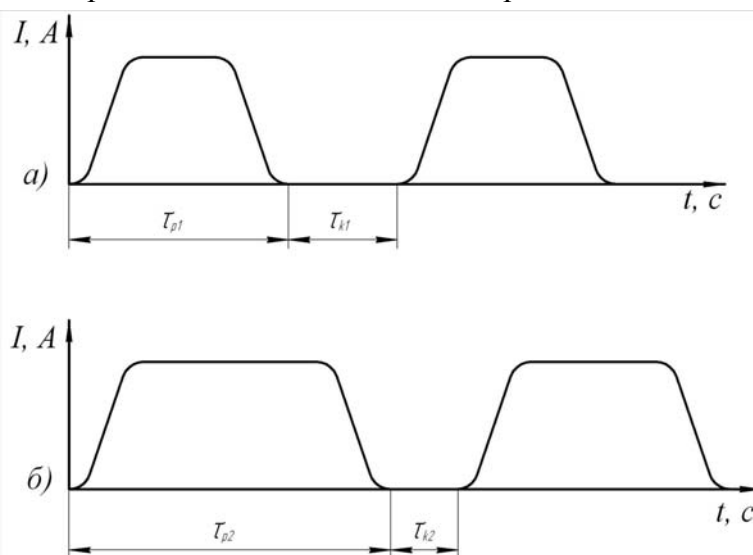
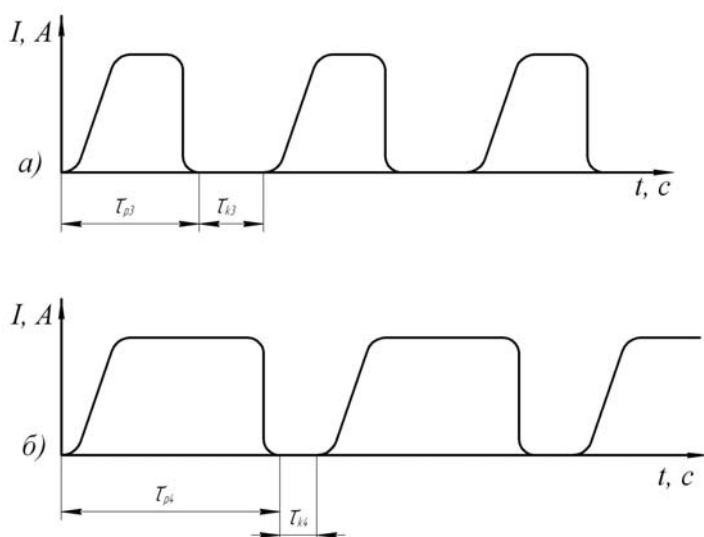


Рисунок 2 – Циклограммы импульсно-циклической обработки на входе электролита в зазор

(а – при давлении 2 МПа; б – при давлении 70 МПа)

$I$  – технологический ток;  $\tau_p$  – время прохождения технологического тока;  $\tau_k$  – время паузы.



**Рисунок 3 – Циклограммы импульсно-циклической обработки на выходе электролита из зазора**  
 (а – при давлении 2 МПа; б – при давлении 70 МПа)  
*I* – технологический ток;  $\tau_p$  – время прохождения технологического тока;  $\tau_k$  – время пауз.

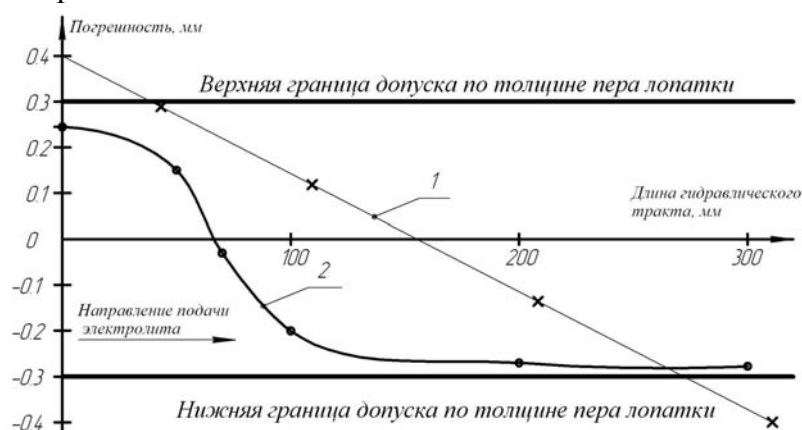
При большом давлении (б, на рисунке 2, 3) удается повысить действие насосного эффекта, что повышает скорость удаления продуктов обработки и снижает время пауз ( $\tau_k$ ). Рабочий период ( $\tau_p$ ) на рисунке 2, 3 возрастает ввиду лучшей очистки всей зоны обработки и магистралей, обеспечивающих слив отработанного (загрязненного) электролита. Если доля  $\tau_{p1}$  в длительности импульса ( $\tau_{u1}$ ) при давлении 2 МПа составляет около 0,6-0,7, то при давлении 70 МПа она составит до 0,9 (рисунок 2 а; б) соответственно нерабочий период сократится на 10-20%.

В конце участка течения электролита (его длина может составлять до 400 мм [4]) загрязнения ограничивают длительность импульса, определяющего съем материала (рисунок 3 а, б).

Тогда величина  $\tau_{k3}$  снижается, а  $\tau_{k2}$  возрастает, и время работы относительно длительности импульса в случае малого давления (рисунок 3 а) уменьшается до 40-50%. Для поддержания одинаковых условий анодного растворения приходится цикл на рисунке 3а выбирать аналогичным циклу на рисунке 2а, т.е. значительно снижать скорость удаления припуска.

Использование высокого давления в магистралях (рисунок 2 б) позволяет удалить продукты обработки по всему тракту и практически сохранить цикл работы, полученный на входе электролита в рабочую зону (рисунок 2 б). Это непосредственно влияет на технологические показатели, определяющие точность обработки и качество поверхностного слоя.

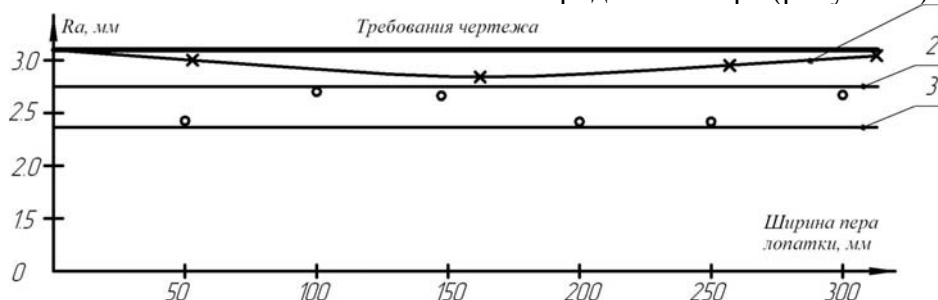
На рисунке 4 приведены экспериментальные результаты, показывающие отклонение размеров турбинных лопаток по толщине (погрешность обработки) в зависимости от давления в магистралях, определяющего интенсивность обработки и удаления продуктов процесса из гидравлического тракта.



**Рисунок 4 – Изменение величины погрешности при электрохимической размерной обработке лопаток компрессора с шириной пера  $320 \pm 0,3$  мм с подачей электролита от входной кромки к выходной (удаляемый припуск 0,9 мм)**  
 график 1 – давление рабочей жидкости в приводе перемещения электродов 2,5 МПа;  
 график 2 – давление рабочей жидкости в приводе перемещения электродов 100 МПа.

Использование приводов с высоким давлением рабочей жидкости (график 2 на рис. 4) позволяет снизить поля допусков на 15-18% или исключить вероятность получения бракованных деталей (см. график 1 на рис. 4) по выходу геометрических размеров за поле допуска.

За счет лучшего удаления продуктов обработки в приводах с высоким давлением жидкости удастся снизить шероховатость поверхности, которая зависит от плотности тока, определяемой величиной и стабильностью межэлектродного зазора (рисунок 5).



**Рисунок 5 – Шероховатость поверхности после обработке в импульсно-циклическом режиме**

- 1 – средние значения высоты неровностей при использовании привода с давлением жидкости 3 МПа;  
 2 – верхняя граница зоны рассеивания измерений шероховатости при давлении в магистралях 70 МПа;  
 3 – нижняя граница зоны рассеивания измерений шероховатости при давлении в магистралях 70 МПа.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Использование высокого давления в магистралях и приводах электрохимического оборудования с импульсно-циклической подачей электродов дает неоспоримые преимущества по снижению массы и инертности узлов, увеличивает интенсивность очистки магистралей от продуктов обработки.

2. Использование магистралей и приводов высокого давления наиболее эффективно при чистовой обработке крупногабаритных деталей, особенно с аэродинамическим профилем.

3. Использование в оборудовании и средствах технологического оснащения магистралей с высоким давлением оказывает положительное воздействие на технологические показатели импульсно-циклической электрохимической размерной обработки, что расширяет технологические возможности используемого метода, особенно для крупногабаритных деталей.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Филонов, И.П. Проектирование технологических процессов в машиностроении / И.П. Филонов, Г.Я. Беляев и др. - Минск, УП ТЕХНОПРИНТ 2003 – 910 с.
2. Головачев, В.А. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы / В.А. Головачев и др. – М.: Машиностроение, 1969 – 198с.
3. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрохимических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 2005 – 511 с.
4. Газизулин, К.М. Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах: научное издание / К.М. Газизулин. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. – 243 с.
5. Смоленцев Г.П., Коптев И.Т., Смоленцев В.П. / Теория ЭХО в нестандартном режиме, Воронеж ВГТУ 2000 – 103 с.
6. Патент 2183825 (РФ) / Уплотнительная головка / А.И. Шелякин и др. Бюллетень изобр. № 17, 2002.
7. Патент 2218498 (РФ) / Уплотнительная головка / А.В. Бондарь и др. Бюллетень изобр. № 34, 2003.

#### **Щипанов Михаил Викторович**

Воронежский государственный технический университет  
 Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
 Тел.: 8-950-754-08-04  
 E-mail: smifov@ya.ru

#### **Кузовкин Алексей Викторович**

Воронежский государственный технический университет  
 Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской Академии космонавтики,  
 зав. кафедрой «Начертательной геометрии и машиностроительного черчения»  
 Тел.: 8 (473) 254-57-84  
 E-mail: akuzovkin@mail.ru

M.V. SHCHIPANOV, A.V. KUZOVKIN

## FEATURES OF TECHNOLOGICAL PROCESS'ES CONSTRUCTION OF PULSE AND CYCLIC PROCESSING WITH HIGH PRESSURE IN WORKING ENVIRONMENT IN MAIN LINES

*In the article we study advantages of use of a high pressure in main lines and drives of the electrochemical equipment with pulse cyclic supply of electrodes. The analysis of technological indicators of pulse cyclic electrochemical dimensional processing at use of the tools and means of technological equipment with high pressure main lines are described there.*

**Keywords:** *technological indicators of pulse cyclic electrochemical dimensional processing, high pressure main lines, construction of technological process.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Filonov, I.P. Proektirovanie tehnologicheskikh processov v mashinostroenii / I.P. Filonov, G.Ja. Beljaev i dr. - Minsk, UP TEHNOPRINT 2003 – 910 c.
2. Golovachev, V.A. Jelektrohimicheskaja razmernaja obrabotka detalej slozhnoj formy / V.A. Golovachev i dr. – M.: Mashinostroenie, 1969 – 198s.
3. Smolencev, E.V. Proektirovanie jelektrohimicheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki / E.V. Smolencev. – M.: Mashinostroenie, 2005 – 511 s.
4. Gazizulin, K.M. Jelektrohimicheskaja razmernaja obrabotka krupnogabaritnykh detalej v pusl'si-rujuvix rabochih sredah: nauchnoe izdanie / K.M. Gazizulin. – Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj uni-versitet, 2002. – 243 s.
5. Smolencev G.P., Koptev I.T., Smolencev V.P. / Teorija JeHO v nestandartnom rezhime, Voronezh VGTU 2000 – 103 s.
6. Patent 2183825 (RF) / Uplotnitel'naja golovka / A.I. Sheljakin i dr. B'ulleten' izobr. № 17, 2002.
7. Patent 2218498 (RF) / Uplotnitel'naja golovka / A.V. Bondar' i dr. B'ulleten' izobr. № 34, 2003.

#### **Shchipanov Mihail Viktorovich**

Voronezh state technical university  
Post-graduate student, Department “Mechanical-engineering technology”  
Tel.: 8-950-754-08-04  
e-mail: smifov@ya.ru

#### **Kuzovkin Aleksey Viktorovich**

Voronezh state technical university  
Doctor of technical sciences, professor, corresponding member of Russian Academy of Cosmonautics, head of Department “Perspective geometry and machine drawing”  
Tel.: 8-473-254-57-84  
e-mail: akuzovkin@mail.ru

## **ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 621:658.310.8

А.В. МОРОЗОВА

### **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СПЕЦИАЛИСТА ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*В статье анализируется система теоретико-методологических подходов, которая является базой для разработки модели квалиметрического оценивания компетенций специалиста для машиностроительного производства в соответствии с новыми стандартами профессионального образования*

*Ключевые слова:* квалиметрия, компетентность, специалист, машиностроение

#### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Осуществление государственной политики перехода страны на инновационный путь, которая определена в Стратегии развития России до 2020 года, предполагает существенные изменения в системе профессионального образования, необходимость подготовки компетентных инженерно-технических кадров, способных и готовых к деятельности в условиях инновационной экономики.

В связи с ориентацией на компетентностный подход в образовании и переходом на стандарты нового поколения акцент делается на формировании ключевых компетенций инженерно-технических кадров, обеспечивающих, с одной стороны, возможность реализации модели «наилучший исполнитель», с другой - мобильность личности в быстро меняющемся мире и профессиональный успех в инновационной экономике.

В этой связи целесообразным является анализ и сопоставление различных теоретико-методологических подходов моделирования системы компетенций специалистов и методы их оценивания. Наибольший интерес среди них, по нашему мнению, представляют: компетентностная модель системы общеевропейских стандартов инженерного образования и требования европейской системы аккредитации инженерных программ EUR-ACE; Национальная рамка классификаций Российской Федерации; компетентностная модель максимальной эффективности работы (авторы - Л. и С. Спенсер); модель состояния подготовленности специалиста в компетентностном формате.

#### **АКТУАЛЬНОСТЬ И НОВИЗНА**

В настоящее время на всем европейском образовательном пространстве идут процессы, направленные на упорядочение всех видов деятельности на основе требования ответственности и самостоятельности работника, что является критерием при определении его уровня квалификации. Дескрипторы рамки Европейской системы квалификаций характеризуют деятельность в целом, что достигается даже на лекционном уровне – через использование сочетания «work or study» (дословно – «работа или исследование») [1].

Основные задачи разработки Европейской структуры квалификаций (ЕСК) – European Qualifications Framework – заключаются в следующем:

- установить общую систему координат для результатов обучения и уровней компетенций, для чего уровни и их описания формулируются в общем виде, что обеспечивает охват всего многообразия квалификаций, существующих на уровне национальных систем и отраслей;
- стать «средством перевода», позволяющим сравнивать результаты обучения в различных системах;
- определить общую систему координат для структур, ответственных за признание результатов образования и обучения;

- избрать общую систему координат для органов управления образованием и учебных заведений в части сравнения предлагаемого обучения с обучением в других странах.

Таким образом, ЕСК представляет собой методический и концептуальный подход, направленный на оптимизацию реформирования образования на национальном уровне, где также должны быть разработаны соответствующие системы квалификаций.

Таблица 1 – Номенклатура обобщенных компетенций и операционально определяемых требований к компетенциям

Компетенции	Наиболее важные стороны способностей студента
Познавательные (когнитивные)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Способность критического подхода к изучаемой дисциплине (включая анализ внутренней логики, способность применения полученных знаний к решению практических задач).</li> <li>- Глубокое знание изучаемой дисциплины (в том числе знаний истории развития, внутридисциплинарных связей, связей со смежными дисциплинами).</li> <li>- Способность самостоятельно приобрести знания из различных информационных источников, а также самостоятельное определение этих источников.</li> </ul>
Творческие (креативные)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Способность к самостоятельному поиску причинно-следственных связей.</li> <li>- Способность применения новых подходов к решению известных проблем.</li> <li>- Способность выявлять возможности практического применения закономерностей изученных дисциплин в нетрадиционных ситуациях.</li> <li>- Способность решать нестандартные задачи, в том числе далекие от изучаемой области знаний.</li> <li>- Способность выявлять основные противоречия в изучаемой области, формулировать новые задачи и проблемы.</li> </ul>
Социально-психологические	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Способность следовать нормам принятого в обществе социального поведения.</li> <li>- Способность видеть и понимать целостность мира, осознавать свое место в нем.</li> <li>- Способность к целеполаганию, выбору средств, планомерному применению этих средств для достижения поставленных целей.</li> <li>- Способность к принятию решений, в том числе нестандартных.</li> </ul>
Профессиональные (проект EUR-ACE)	
Знания и понимание (содержит требования к уровню знания выпускников)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Знание и понимание естественно-научных и математических принципов, лежащих в основе специализаций.</li> <li>- Системное понимание ключевых аспектов, компетенций и принципов в области специализаций.</li> <li>- Понимание широкого междисциплинарного контекста инженерной науки.</li> <li>- Достижения в области Критическая осведомленность в передовых знаниях и специализаций.</li> </ul>

<p>Инженерный анализ (способность решать инженерные задачи, соответствующие уровню знаний, а также задачи, включающие знания из областей, выходящих за рамки специализаций)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Способность решать незнакомые, нечетко определенные задачи в областях своей специализации.</li> <li>- Способность применять полученные знания для концептуализации инженерных моделей, систем и процессов.</li> <li>- Способность применять инновационные методы для решения инженерных задач.</li> </ul>
<p>Инженерное проектирование (участие в выполнении инженерных проектов, умение работать как в профессиональной, так и в непрофессиональной среде)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Способность использовать знания при решении незнакомых задач, в том числе с применением знаний из других дисциплин.</li> <li>- Способность использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов.</li> <li>- Способность принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации.</li> </ul>
<p>Инженерная практика (содержит требования к умению выпускников применять полученные знания в инженерной практике)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Способность выбирать и использовать подходящее оборудование, инструменты и методы, всестороннее понимание применяемых методов и их ограничений.</li> <li>- Способность интегрировать теоретические и практические знания различных областей для решения сложных инженерных задач.</li> <li>- Осведомленность о нетехнических последствиях инженерной деятельности.</li> </ul>
<p>Исследования (содержит требования к умению выпускников проводить исследования, используя различные методы, соответствующие их уровню знаний)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Способность идентифицировать, находить и получать необходимые данные.</li> <li>- Умение планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования, способность критически оценивать данные и делать выводы.</li> <li>- Умение оценивать возможность использования новых и новейших технологий в сфере своей специализации.</li> </ul>
<p>Личностные навыки (навыки, необходимые для инженерной деятельности)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Способность эффективно работать: индивидуально, в качестве члена команды, в качестве лидера команды, которая может состоять из специалистов различных направлений и квалификаций.</li> <li>- Умение использовать различные методы с целью эффективного взаимодействия с инженерным сообществом и с обществом в целом.</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Умение эффективно взаимодействовать в национальном и международном контекстах.</li> <li>- Понимание вопросов здравоохранения, безопасности, юридических аспектов и ответственности за инженерную деятельность, понимание влияния инженерных решений на социальную и окружающую среду.</li> <li>- Готовность следовать кодексу профессиональной этики и нормам инженерной практики.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Осведомленность в сфере проектного менеджмента и бизнеса, знание и понимание рисков в изменившихся условиях.</li> <li>- Осознание необходимости самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всей жизни.</li> </ul>

По версии отечественных авторов и, исходя из требований, предъявляемых европейской системой аккредитации инженерных компетенций EUR-ACE [14], [15], номенклатура операционно определяемых требований к каждой из компетенций определяется набором способностей, приведенных в таблице 1. Проект EUR-ACE (аккредитация европейских инженерных программ) [16], [17] получивший поддержку Европейской комиссии в рамках программ Socrates-Tempus, направлен на создание европейской системы аккредитации инженерного образования.

Процедура аккредитации программ инженерного образования, реализуемых в российских вузах, находится под патронажем Ассоциацией инженерного образования России (АИОР), которая имеет право на присвоение европейского знака качества EUR-ACE® и видит свою миссию в содействии достижению высокого качества подготовки инженеров в стране, получению признания российского инженерного образования за рубежом, и, как следствие, повышению престижа российских специалистов до европейского уровня. Критерии оценки, предъявляемые вузам российской ассоциацией, соответствуют системам аккредитации стран-участниц Вашингтонского соглашения, Европейской ассоциации гарантии качества высшего образования ENQA и общеевропейской системы аккредитации инженерных программ, созданной в рамках проекта EUR-ACE. АИОР является членом этих сообществ и в числе шести европейских аккредитованных агентств имеет право присвоения знака EUR-ACE®.

Кроме того, для решения проблемы рассогласованности структуры и качества подготовки рабочих и специалистов, а также спроса российского рынка труда служит разработка Национальной рамки квалификаций Российской Федерации (НРК РФ), концептуальной основой которой является компетентностный подход: описание уровней квалификации строится на описании различий в результатах обучения, выраженных в терминологии ответственных, самостоятельности и степени сложности рабочей ситуации. Дескрипторы НРК РФ формулируются в соответствии с общими принципами, свойственными рамочным структурам квалификаций других европейских стран:

- преемственностью уровней и прозрачностью квалификаций;
- иерархией квалификаций (уровней), связанной с инфраструктурой системы образования РФ;
- сопоставимостью с ЕСК.

НРК РФ является одним из ключевых элементов инновационной системы стандартизации в российском профессиональном образовании и включает системное описание различий квалификаций в зависимости от их уровня и профессиональной направленности. Описание требований к знаниям, умениям и компетенциям выпускников системы профессионального образования являются концептуальной основой разрабатываемых ФГОС. В этой связи главной задачей НРК РФ является обеспечение системной сопряженности и преемственности ФГОС по всем уровням профессионального образования.

НРК образуют представленные в форме таблицы характеристики (дескрипторы) квалификационных уровней, раскрытые через ряд обобщенных показателей (таблица 4.2).

Аналогично Европейской рамке квалификаций в НРК включены дескрипторы общей компетенции, умений и знаний, которые раскрываются через соответствующие показатели профессиональной деятельности:

- широта полномочий и ответственность;
- сложность деятельности;
- наукоемкость деятельности.

Показатель «Широта полномочий и ответственность» определяет общую компетенцию работника и связан с масштабом деятельности, ценой возможной ошибки, ее социальными, экологическими, экономическими и т.п. последствиями, а также с полной реализацией в профессиональной деятельности основных функций руководства (целеполагание, организация, контроль, мотивация исполнителей).

Показатель «Сложность деятельности» определяет требования к умениям и зависит от ряда особенностей профессиональной деятельности: множественности (вариативности) способов решения профессиональных задач, необходимости выбора или разработки этих способов; степени неопределенности рабочей ситуации и непредсказуемости ее развития.

Показатель «Наукоемкость деятельности» определяет требования к знаниям, используемым в профессиональной деятельности, зависит от объема и сложности используемой информации, инновационности применяемых знаний и степени их абстрактности (соотношения теоретических и практических знаний).

Квалификация всегда является результатом освоения определенной образовательной программы и/или практического опыта. Для приращения квалификации или изменения ее профиля на каждом уровне возможно обучение по дополнительным образовательным программам системы повышения квалификации и переподготовки кадров в учреждениях, имеющих соответствующие лицензии.

Основные пути достижения квалификационных уровней отражены в таблице 2.

Вместе с тем, большинство оригинальных моделей базируются только на тех типах поведения, которые отличают лучшее исполнение от среднего. Поведение и характеристики, которые присутствуют в модели, более привычны для лучших, чем для средних специалистов-исполнителей (модель наилучшего исполнителя Л. и С. Спенсер). Отсутствие определенной характеристики в модели означает, что она была минимальным требованием, характерным для всех занимающих эту должность людей.

Большая часть созданных в последнее время и описываемых в научной литературе [5], [6], [11], [13] моделей конкретизирует характеристики как среднего (т.е. порогового, минимально приемлемого, типического) исполнения, так и лучшего исполнения (т.е. дифференцирующие компетенции), - поэтому этот источник неточностей требует еще значительной доработки.

Типовая процедура кодирования моделей заключалась в следующем [12]. Все исходные модели компетенций были организованы в 3-6 кластеров, содержащих от 12 до 27 компетенций, каждая с 3-7 поведенческими индикаторами, которые дополнялись примерами (цитатами из интервью), описаниями и пояснениями. У некоторых моделей примеров и пояснений много, тогда как у других – пояснений, описаний и/или примеров мало или нет.

Существующие модели компетенций были кодированы в виде списка из 350 обобщенных поведенческих индикаторов. Затем эти индикаторы были соотнесены со шкалами едва заметных различий. Затем выполнялась кодировка моделей в обобщенные шкалы. Только после этого эти обобщенные модели можно было сравнивать друг с другом.

Американская обобщенная модель компетенций работающих специалистов и профессионалов как «наилучших исполнителей» имеет следующие кластеры:

- Достижение и действие – Ориентация на достижение (ОД), Забота о порядке, качестве и аккуратности (ЗА), Инициатива (ИН), Поиск информации (ИНФО);
- Помощь и обслуживание других – Межличностное понимание (МП), Ориентация на обслуживание клиента (ООК);

Таблица 2 – Система квалификационных уровней и пути их достижения

Квалификационные уровни	Пути достижения квалификации соответствующего уровня
1 уровень	Практический опыт Краткосрочное обучение (инструктаж) на рабочем месте и/или краткосрочные курсы при наличии общего образования не ниже начального общего
2 уровень	Практический опыт Профессиональная подготовка (краткосрочные курсы на базе образовательного учреждения или корпоративное обучение) при наличии общего образования не ниже основного общего
3 уровень	Практический опыт Профессиональная подготовка (курсы на базе образовательного учреждения по программам профессиональной подготовки до 1 года или корпоративное обучение) при наличии общего образования не ниже среднего (полного) общего. Начальное профессиональное образование без получения среднего (полного) общего образования на базе основного общего образования
4 уровень	Начальное профессиональное образование с получением среднего (полного) общего образования на базе основного общего образования или на базе среднего полного общего образования и практический опыт. Профессиональная подготовка (курсы на базе образовательного учреждения по программам профессиональной подготовки до 1 года и дополнительные профессиональные образовательные программы) и практический опыт
5 уровень	Среднее профессиональное образование с получением или на базе среднего (полного) общего образования, или начального профессионального образования и практический опыт
6 уровень	Бакалавриат. Среднее профессиональное образование с получением среднего (полного) общего образования на базе основного общего образования или на базе среднего (полного) общего образования. Практический опыт
7 уровень	Магистратура (на основе освоенной программы бакалавриата) и практический опыт Специалитет (на основе освоенной программы среднего (полного) общего образования) и практический опыт Бакалавриат и дополнительное профессиональное образование (программы MBA и др.) и практический опыт
8 уровень	Послевузовское образование (программы, ведущие к получению степени кандидата наук и/или практический опыт работы) Освоенная программа подготовки магистра или специалиста, дополнительное профессиональное образование и практический опыт (программы MBA и др.)
9 уровень	Послевузовское образование (степень кандидата наук и практический опыт работы или степень доктора наук и практический опыт работы), дополнительное профессиональное образование Опыт практической работы и признание на отраслевом, межотраслевом, международном уровне

- Взаимодействие и Оказание влияния – Взаимодействие и оказание влияния (ВЗД), Понимание компании (ПК), Построение отношений (ОТН);
- Менеджерские компетенции – Развитие других (РАЗВ), Директивность (ДИР), Командная работа и сотрудничество (КР), Командное лидерство (КЛ);
- Когнитивные компетенции – Аналитическое мышление (АМ), Концептуальное мышление (КМ), Экспертиза (ЭКСП);

- Личная эффективность – Самоконтроль (СМК), Уверенность в себе (УВС), Гибкость (ГИБК), Преданность компании (ПК).

Для технических специалистов американская обобщенная модель компетенций представлена в таблице 3. Так как эта модель предназначена для людей знания, ее использование, по рекомендации авторов, осуществляется на контрасте компетенций работающих людей знания с компетенциями менеджеров, продавцов, работников социальной сферы и т.д. [12].

Компетенции обсуждаются в убывающем порядке по важности для распознавания лучших технических специалистов. В рамках каждой компетенции также описываются конкретные типичные примеры поведения в убывающем порядке по важности. «Важность» оценивается частотой, с которой компетенция встречается в группе моделей специалистов/профессионалов. «Вес» отражает относительную частоту, с которой каждая компетенция различает лучших и средних исполнителей-специалистов.

Таблица 3 – Обобщенная модель компетенций для технических специалистов

Вес	Компетенции
XXXXXX	<i>Ориентация на достижение</i> Измеряет исполнение Усовершенствует результаты Ставит трудные цели Вводит новое
XXXXX	<i>Воздействие и Оказание влияния</i> Использует прямое убеждение, факты и цифры Делает презентации, учитывая особенности аудитории Демонстрирует заботу о профессиональной репутации
XXXX	<i>Концептуальное мышление</i> Распознает ключевые действия, скрытые проблемы Создает связи и модели
XXXX	<i>Аналитическое мышление</i> Предвидит препятствия Систематически разбивает проблемы на составные части Делает логические выводы Видит последствия, скрытый смысл
XXXX	<i>Инициатива</i> Настаивает на решении проблем Обращается к проблемам до того, как его попросят об этом
XXX	<i>Уверенность в себе</i> Выражает уверенность в собственных суждениях Ищет трудностей и независимости
XXX	<i>Межличностные отношения</i> Понимает отношения, интересы, потребности других
XX	<i>Забота о порядке</i> Стремится к ясности ролей и информации Проверяет качество работы или информации Ведет записи
XX	<i>Поиск информации</i> Контактирует со многими различными источниками Читает журналы и пр.
XX	<i>Командная работа и сотрудничество</i> Коллективное обсуждение, добивается вклада каждого
XX	<i>Экспертиза</i> Расширяет и пользуется техническими знаниями Наслаждается технической работой; делится профессиональными знаниями
X	<i>Ориентация на обслуживание клиента</i> Находит и удовлетворяет скрытые потребности

Такая модель, по-нашему мнению, позволяет эффективно представить элементную структуру и степень приоритетности компетенций, характеризующих личность востребованного на рынке труда специалиста технического профиля, а в дальнейшем использовать их при разработке технологии оценивания потенциальной конкурентоспособности специалиста на рынке труда.

Однако, проблемным остается переход от оценивания знаний, умений и навыков студентов к оцениванию уровня сформированности их социально-профессиональной компетентности. По нашему мнению, основу такой технологии должны составлять теоретические разработки, используемые для квалиметрического оценивания объектов любой природы [3], [4], а также модель состояния подготовленности специалиста в компетентностном формате [2], [8], [10].

Актуальность проблемы построения компетентностной модели системы профессиональных характеристик специалиста следует из наличия множества вариантов организационно-содержательного характера ее решения [8]. Крайними его вариантами являются неметрический компетентностный формат (НКФ) и метрический компетентностный формат (МКФ). Разумность выбора формата в определенной мере может зависеть от предметной области, целеполагания и от того, насколько глубоко в образовательном процессе используются компьютерные технологии.

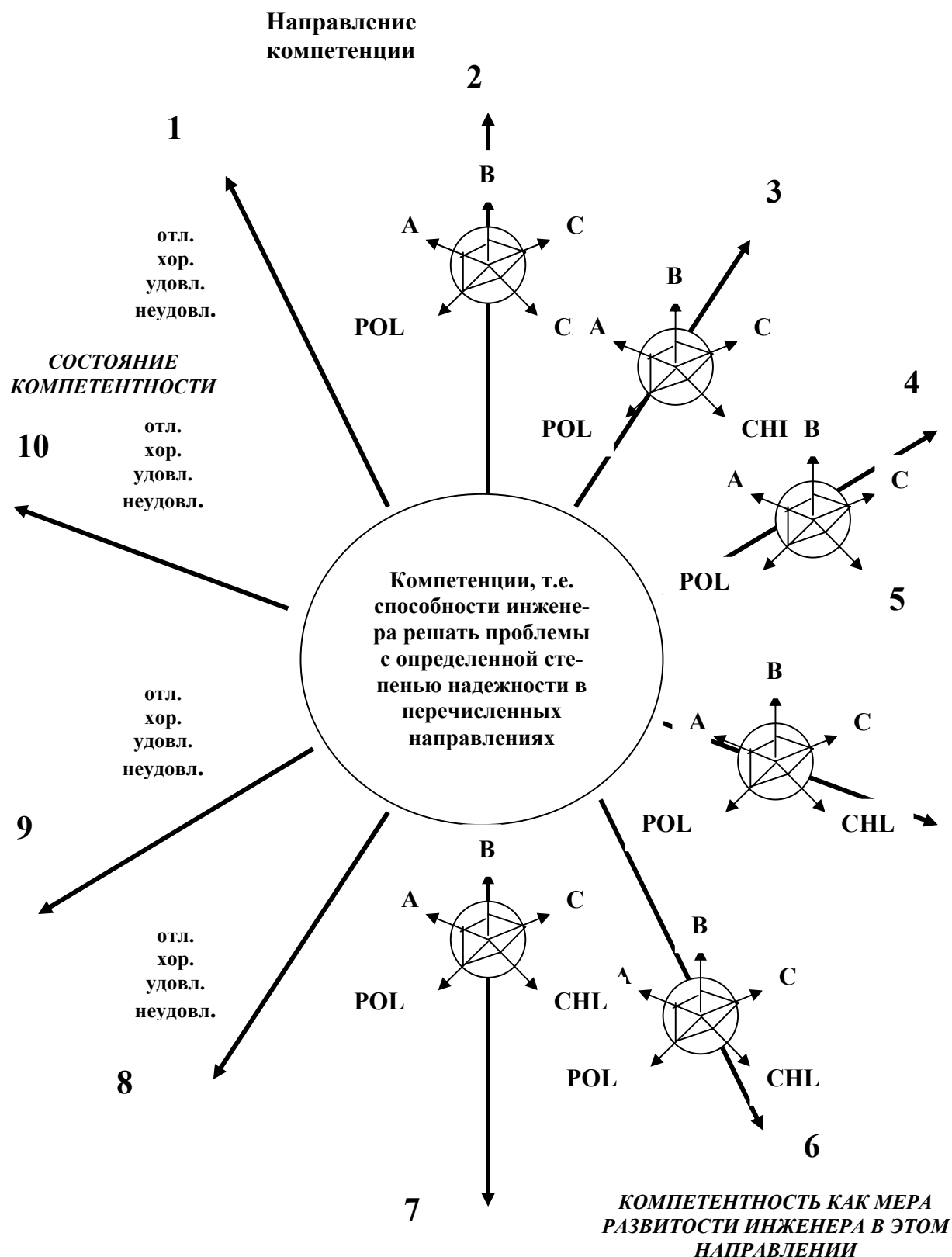
В данный момент весь учебный материал представлен в традиционном учебном формате (ТУФ) и закреплен с помощью действующих ГОС ВПО. Задача состоит в том, чтобы достаточно быстро перевести учебный материал ТУФ в МКФ или НКФ с помощью ГОС ВПО третьего поколения.

По критерию успешности деятельности различие людей состоит в том, что они имеют разные уровни развития проектно-конструктивных способностей (ПК-способностей) и разный опыт (знания) решения подобного рода проблем. Проектно-конструктивная деятельность (ПК-деятельность) – это комплекс, состоящий минимум из трех различных фаз работ: сначала проблема формализуется (понимается) человеком (фаза А), затем конструируется решение проблемы (фаза работ В) и только потом исполняется (фаза работ С). Поэтому специалисту для решения проблем какой-либо предметной области необходимо иметь, с одной стороны, высокий уровень развития ПК-способностей (личностных технологий или АВС-способностей) и накопленный опыт (знания в их полноте и целостности) решения подобного рода проблем. Компетенции как интегративная способность инженера решать проблемы в определенной области формируют направления потоков проблем, для решения которых должны быть развиты способности инженера, позволяющие ему эффективно работать в рамках специальности. Компетентность определяет требования (критерии) эффективности решения проблем инженером в рамках компетенции (пороговые значения метрик, гарантирующие решение проблем с определенной надежностью).

При подготовке компетентного инженера необходимо решить следующие задачи:

- определить комплекс компетенций (наименований направлений), которыми должен обладать инженер для эффективной деятельности на своем рабочем месте;
- определить требуемые значения метрик, т.е. уровни развития АВС-способностей и объемы интериоризованных знаний, чтобы с надежностью не менее  $p$  он был бы способен получить требуемый продукт, решить проблему или оказать требуемую услугу.

На рисунке 1 приводится модель состояния подготовленности инженера в компетентностном формате. Состав компетенций по заданному направлению подготовки инженера определяется профилем 1-2-3-...-10. Оценка актуального состояния компетентности (некомпетентности) инженера в рамках форматов НКФ и МКФ происходит по-разному. Эти форматы отличаются не только диагностической, но и процессуальной частью (разными технологиями, определяющими процесс подготовки инженера).



*Рисунок 1 – Модель состояния подготовленности специалиста в компетентностном формате (Н.К. Нуриев)*

В НКФ все определяется через понятие «компетенция», т.е. если инженер владеет компетенцией, то у него развиты способности к решению соответствующих проблем. Поэтому количество развитых способностей соответствует количеству компетенций в его под-

готовке, а сам процесс подготовки направлен на развитие этих способностей. Его успешность оценивается, как правило, по качественной шкале, т.е. по шкале «отл., хор., удовл., неудовл.» (на рис. 1 – это компетенции 1, 10, 9, 8). Следует отметить, что в этом случае «способности», как правило, используются вместо «умений» в системе ТУФ.

В МКФ компетенции определяют направление подготовки на множестве всех способностей, поддерживающих успешную деятельность в этих направлениях, здесь выделяются инвариантные способности (их можно назвать ключевыми). В качестве их рассматривают естественные способности человека, т.е. проектно-конструктивные или АВС-способности, которые необходимо развить инженеру в направлениях компетенций при его подготовке (на рис. 1 – это компетенции 2-7). Причем при подготовке инженера независимо от направления стараются развить его формализованные (А), конструктивные (В) и исполнительские (С) способности. Поэтому при подготовке в МКФ развитие АВС-способностей инженера представлено через цель, технологию, диагностику оценки качества.

Технология – это комплекс теоретических и методологических знаний, реализуемых через различные способы организации и ведения деятельности с целью получения продукта или услуги, отвечающих определенным требованиям. Таким образом, деятельность по решению профессиональных проблем инженер строит через сформированные личностные технологии, проявляющиеся в нем как АВС-способности по решению проблем в определенных областях.

В любом анализируемом процессе технология неотделима от ресурсов. Так в деятельности способности как личностные технологии являются «рецептами» использования ресурсов для решения конкретных проблем. В деятельности ресурсы – это, прежде всего, всякого рода знания (методологические, теоретические) о предметной области, в целом о мире, необходимые для решения проблем.

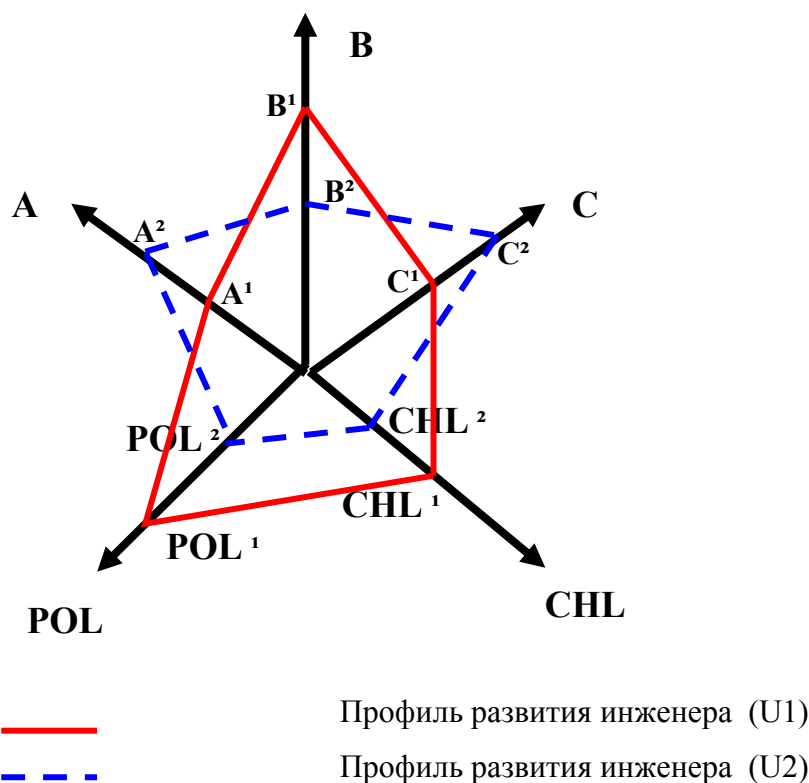
Если анализировать ресурсы компетентности, то их можно охарактеризовать полнотой (POL) и целостностью (CHL) интерпретированных (освоенных) им знаний об объектах, их связях, процессах и фактах по решению проблем в рамках этих компетенций. Таким образом, метрики POL и CHL можно рассматривать как значения характеристик показателей освоенности знаний инженером по решению проблем в области его профессиональной деятельности.

В этой связи, комплекс значений показателей «А, В, С, POL, CHL» характеризует актуальное состояние подготовленности инженера в компетентностном формате к решению проблем в определенном направлении деятельности. На рисунке 2 показаны варианты профилей уровней профессионального развития для двух инженеров. Каждый из этих специалистов способен решать разные проблемы в рамках одной профессиональной области, но в зависимости от специфики и сложности проблем они будут решать их с разными показателями надежности.

Актуальное состояние процесса формирования профессиональной индивидуальности специалиста характеризуется (с точки зрения деятельности) комплексом показателей А, В, С, POL, CHL с вычисленными значениями для каждого индивида. Конкретные процедуры диагностики и методики вычисления значений в зависимости от областей учебной деятельности приводятся в работах [9], [10].

Анализ структуры профессиональной деятельности инженера позволяет выполнить декомпозицию потока профессиональных проблем на инвариантные (относительно областей деятельности) кластеры: кластер проблем стандартного характера (СХ), кластер проблем конструктивного характера (КХ) и кластер проблем творческого характера (ТХ). При этом проблемы стандартного характера требуют репродуктивного решения, проблемы конструктивного характера требуют решения в рамках концептуально известных проблемных ситуаций, а проблемы творческого характера требуют для своего решения синтеза в когнитивной сфере принципиально новых схем (моделей) решения. В этом случае все общественное производство с точки зрения получения нового (инновационного) продукта можно разделить на

три кластера, выделив соответствующие виды деятельности: репродуктивная деятельность, продуктивная (инновационная) деятельность и научно-исследовательская деятельность.



*Рисунок 2 – Профили уровней развития (U1и U2) ABC-способностей и интеризованных знаний (POL и CHL)*

### **ВЫВОД**

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о наличии определенных противоречий переходного периода к ФГОС нового поколения:

- существует острая потребность в подготовке инженерно-технических кадров для инновационного наукоемкого машиностроения и современных металлообрабатывающих предприятий и наблюдается дефицит молодых специалистов, которые, получив образование по профилю этих специальностей, не приходят на работу в эти производственные коллективы;
- накопленный в педагогических коллективах технических вузов и профессиональных колледжей опыт целевой многоуровневой профессиональной подготовки специалистов и недостаточная фрагментарная разработанность проблем классификации профессиональных компетенций специалистов, социально-управленческой технологии их формирования и процедуры их оценивания;
- содержание ФГОС нового поколения, отражающего потребность рынка труда и работодателей в объективной оценке уровня сформированности профессиональной компетенции, приоритетов ее структуры и отсутствие в ФГОС компонентов, отражающих результативность образовательного процесса посредством оценивания уровня сформированности профессиональных компетенций выпускников.

Проведенный анализ существующих теоретико-методологических подходов к проблеме оценивания профессиональной компетентности молодых кадров инженерно-технического профиля позволяет сделать вывод о необходимости разработки квалиметрической технологии оценивания уровней сформированности отдельных компетенций, профессиональной компетентности специалиста как объекта рынка труда, формирования компетентностной диаграммы выпускников вузов и ссузов и на ее основе - решения проблемы оптимизации выбора области дальнейшей профессиональной деятельности молодых специалистов [3].



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинов, В. Национальная рамка квалификаций в Российской Федерации [Текст] / В. Блинов // Высшее образование в России. - 2008. - № 1. - С. 44-49.
2. Боярский, Е. Обобщенные компетенции выпускников вузов [Текст] / Е. Боярский, С. Коломиец // Высшее образование сегодня. - 2007. - № 6.
3. Васильев, В.И. Оценка качества деятельности образовательного учреждения [Текст] / В.И. Васильев, В.В. Красильников, С.И. Плаксий, Т.Н. Тягунова. - М.: Издательство ИКАР, 2005. - 320 с.
4. Васильев, В.И. Статистический анализ многомерных объектов производной природы [Текст] / В.И. Васильев, В.В. Красильников, С.И. Плаксий, Т.Н. Тягунова. - М.: Издательство ИКАР, 2004. - 382 с.
5. Гуревич, А.М. Ассесмент: принципы подготовки и проведения [Текст] / А.М. Гуревич. - СПб.: Речь, 2005. - 235 с.
6. Джерард, П. Компетентная организация: психологический анализ процесса стратегического менеджмента [Текст] / П. Джерард. Пол Р. Сперроу; Пер. с англ. - Харьков: Изд-во Гуманитарный Центр, 2007. - 392 с.
7. Морозова, А.В. Методологические основы тестовой квалиметрии профессиональных кадров в машиностроении [Текст] / А.В. Морозова; под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека. - М.: ИД «Спектр», 2010. - 280 с.
8. Нуриев, Н. Двухуровневая образовательная система: благо или вред? [Текст] / Н. Нуриев, Л. Журбенко, С. Старыгина // Высшее образование в России. - 2008. - № 2. - С. 84-91.
9. Нуриев, Н.К. Оценка уровня конкурентоспособности специалиста [Текст] / Н.К. Нуриев // Высшее образование в России. - 2005. - № 12. - С. 109-113.
10. Нуриев, Н.К. Мониторинг качества подготовки будущего инженера (бакалавра, магистра в компетентностном формате): Учебное пособие. [Текст] / Н.К. Нуриев, Л.Н. Журбенко, С.Д. Старыгина. - Казань, 2007.
11. Ржевская, С.В. Управление качеством / С.В. Ржевская. - М.: Университетская книга; Логос, 2009. - 288 с.
12. Спенсер, Л. Компетенции на работе [Текст] / Л. Спенсер, С. Спенсер. - М.: Издательство ГИППО, 2010. - 384 с.
13. Сыманюк, Э.Э. Психологические барьеры профессионального развития личности. Практикоориентированная монография. [Текст] / Э.Э. Сыманюк; Под ред. Э.Ф. Зеера. - М.: Московский психолого-социальный институт, 2005. - 252 с.
14. Тесты. Кадровый подбор [Текст] / автор-составитель Шувалова С. - Ростов н/Д.: Феникс, СПб.: ООО Издательство «Северо-Запад», 2008. - 350 с.
15. Чучалин, А. Качество инженерного образования: мировая тенденция в терминах компетенций [Текст] / А. Чучалин, О. Боев, А. Криушова. // Высшее образование в России. - 2006. - № 8. - С. 9-17.
16. EUR-ACE [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.enace.eu/enace/presentation.htm>
17. Ассоциация инженерного образования в России [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://tltonline.ru/news/?id=4723>

**Морозова Анна Валентиновна**

Кандидат социологических наук, Заместитель директора по НИР Технологического института им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»  
Тел.: (4862) 555524  
E-Mail: [niotlostu@gmail.com](mailto:niotlostu@gmail.com)

A.V. MOROZOVA

**METHODOLOGICAL BASES OF FORMATION OF MODEL  
MEASUREMENT OF QUALITY FORMATION OF AN ESTIMATION  
THE COMPETENCE OF THE EXPERT FOR MACHINE-BUILDING  
MANUFACTURE**

*In article the system of theory-methodological approaches which is base for development of measurement of quality formation of an estimation the competence the expert for machine-building manufacture according to new standards of vocational training is analyzed*

**Key words:** *measurement of quality, competence, the expert, mechanical engineering*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Blinov, V. Nacional'naja ramka kvalifikacij v Rossijskoj Federacii [Tekst] / V. Blinov // Vyshee obrazovanie v Rossii. - 2008. - № 1. - S. 44-49.
2. Bojarskij, E. Obobwennye kompetencii vypusnikov vuzov [Tekst] / E. Bojarskij, S. Kolomic // Vyshee obrazovanie segodnja. - 2007. - № 6.
3. Vasil'ev, V.I. Ocenka kachestva dejatel'nosti obrazovatel'nogo uchrezhdenija [Tekst] / V.I. Vasil'ev, V.V. Krasil'nikov, S.I. Plaksij, T.N. Tjagunova. - M.: Izdatel'stvo IKAR, 2005. - 320 s.
4. Vasil'ev, V.I. Statisticheskij analiz mnogomernyh ob#ektov proizvodl'noj prirody [Tekst] / V.I. Vasil'ev, V.V. Krasil'nikov, S.I. Plaksij, T.N. Tjagunova. - M.: Izdatel'stvo IKAR, 2004. - 382 s.
5. Gurevich, A.M. Assesment: principy podgotovki i provedenija [Tekst] /A.M. Gurevich. - SPb.: Rech', 2005. - 235 s.
6. Dzherard, P. Kompetentnaja organizacija: psihologicheskij analiz processa strategicheskogo menedzhmenta [Tekst] / P. Dzherard. Pol R. Sperrou; Per. s angl. - Har'kov: Izd-vo Gumanitarnyj Centr, 2007. - 392 s.
7. Morozova, A.V. Metodologicheskie osnovy testovoj kvalimetrii professional'nyh kadrov v mashinostroenii [Tekst] / A.V. Morozova; pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka. - M.: ID «Spektr», 2010. - 280 s.
8. Nuriev, N. Dvuhurovnevaja obrazovatel'naja sistema: blago ili vred? [Tekst] / N. Nuriev, L. Zhurbenko, S. Starygina // Vyshee obrazovanie v Rossii. - 2008. - № 2. - S. 84-91.
9. Nuriev, N.K. Ocenka urovnja konkurentosposobnosti specialista [Tekst] / N.K. Nuriev // Vyshee obrazovanie v Rossii. - 2005. - № 12. - S. 109-113.
10. Nuriev, N.K. Monitoring kachestva podgotovki buduwegogo inzhenera (bakalavra, magistra v kompetentnostnom formate): Uchebnoe posobie. [Tekst] / N.K. Nuriev, L.N. Zhurbenko, S.D. Starygina. - Kazan', 2007.
11. Rzhetskaja, S.V. Upravlenie kachestvom / S.V. Rzhetskaja. - M.: Universitetskaja kniga; Logos, 2009. - 288 s.
12. Spenser, L. Kompetencii na rabote [Tekst] / L. Spenser, S. Spenser. - M.: Izdatel'stvo GIPPO, 2010. - 384 s.
13. Symanjuk, Je.Je. Psihologicheskie bar'ery professional'nogo razvitija lichnosti. Praktikoorientirovannaja monografija. [Tekst] / Je.Je. Symanjuk; Pod red. Je.F. Zeera. - M.: Moskovskij psihologo-social'nyj institut, 2005. - 252 s.
14. Testy. Kadrovyj podbor [Tekst] / avtor-sostavitel' Shuvalova S. - Rostov n/D.: Feniks, SPb.: OOO Izdatel'stvo «Severo-Zapad», 2008. - 350 s.
15. Chuchalin, A. Kachestvo inzhenerenogo obrazovanija: mirovaja tendencija v terminah kompetencij [Tekst] / A. Chuchalin, O. Boev, A. Kriushova. // Vyshee obrazovanie v Rossii. - 2006. - № 8. - S. 9-17.
16. EUR-ACE [Jelektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa: <http://www.enaee.eu/enaee/presentation.htm>
17. Associacija inzhenerenogo obrazovanija v Rossii [Jelektronnyj resurs]. - Rezhim dostupa: <http://tltonline.ru/news/?id=4723>

**Morozova Anna Valentinovna**

Can.Sc. soc., Deputy Director of the Institute for scientific-research works Polikarpov Technological Institute FSBEI HVT «State University – ESPC»

Tel.: (4862) 555524

E-mail: [niotlostu@gmail.com](mailto:niotlostu@gmail.com)

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.391:616-7:616.12-07

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, А.В. КОЗЮРА

### **К ВОПРОСУ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

*Показано текущее состояние и актуальность контроля качества электрокардиографического сигнала. Представлены основные технические проблемы, встречающиеся при регистрации электрокардиограммы. Даны основные методы контроля качества ЭКГ сигнала и их недостатки. Предложено использование базы существующих разработок для реализации контроля качества ЭКГ сигнала.*

**Ключевые слова:** контроль качества, электрокардиография, ЭКГ сигнал.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Сердечно-сосудистые заболевания являются сегодня наиболее распространенными: ни по какой другой причине ежегодно не умирает столько людей, сколько от заболеваний сердца и сосудов. Не смотря на существенный прогресс в развитии методов диагностики и лечения данных заболеваний по прогнозам Всемирной организации здравоохранения к 2030 году около 23,6 миллионов человек умрет от болезней сердца и инсульта, которые останутся основными причинами смерти [1].

Электрокардиографические исследования являются наиболее распространёнными и доступными для своевременной и достоверной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. В то же время, очевидным является тот факт, что их качество зависит от множества факторов: квалификации специалиста, проводящего регистрацию электрокардиограммы, врача кардиолога, проводящего интерпретацию полученных сигналов и формирующего врачебное заключение, условий, в которых проводится исследование, качества работы инструментальных средств и программного обеспечения.

К сожалению, процент врачебных ошибок, связанных с ошибочной интерпретацией врачами участков электрокардиограммы, содержащих артефакты, и особенностями работы алгоритмов автоматического анализа остаётся высоким. Так, например, по результатам исследования [2] из 528 врачебных заключений было выявлено 293 врачебные ошибки методического характера. При этом в 66 случаях в записи не было участков, пригодных для анализа, то есть данные записи были диагностически незначимы; в 7 случаях отмечен неверный расчет одного из наиболее важных диагностических параметров – частоты сердечных сокращений – из-за наличия артефактов. Очевидно, что для снижения количества подобных ошибок специалист, проводящий регистрацию и/или расшифровку электрокардиограммы должен принимать решение о целесообразности продолжения или необходимости повторения проводимого исследования, основываясь на количественных оценках (метриках) качества электрокардиографического (ЭКГ) сигнала.

Особенно актуальной проблема создания метрик качества ЭКГ сигнала становится с всё возрастающим распространением телемедицинских технологий в лечебной практике. В данном случае регистрация электрофизиологического сигнала проводится удалённо от лечебно-профилактического учреждения, а результаты направляются специалисту кардиологу для постановки диагноза по линиям связи. Зачастую подобные исследования проводятся не специалистами в области кардиологии (вплоть до снятия ЭКГ самим пациентом с помощью мобильных телемедицинских средств) в сложных условиях, и полученные сигналы могут содержать шумы и артефакты, существенно снижающие диагностическую значимость сигнала. Данная проблема, в свою очередь, существенно повышает нагрузку на специалиста, занима-

ющего удаленно интерпретацией полученных сигналов, и увеличивает время принятия лечебного решения. Идеальным случаем является получение заключения о качестве сигнала в реальном времени или через несколько минут после завершения исследования, пока пациент ещё на месте и есть возможность повторить исследование с учетом полученных рекомендаций.

### **АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ**

Качество электрокардиографического сигнала непосредственно влияет на его диагностическую значимость: эффективность работы алгоритмов, предназначенных для интерпретационного анализа, оценки амплитуды, длительности и морфологии сигналов и сопутствующих ритмов зависит от наличия в сигнале артефактов и их вида. Цифровые сигнальные процессоры, алгоритмы и схемы фильтрации в условиях сильной зашумленности могут удалить из сигнала не только шумовые, но и полезные – информативные составляющие.

Основным проблемам и техническим ошибкам в ходе проведения электрокардиографических исследований посвящен ряд публикаций [3 – 6]. На основе анализа данных публикаций предлагается следующая классификация проблем и ошибок, влияющих на качество электрокардиографического сигнала.

1. Физиологические артефакты. В данную категорию можно отнести: движение пациента во время исследования, электромиографические шумы [3, 4].

2. Нефизиологические артефакты. В данную категорию относятся электромагнитные помехи от сети промышленной частоты, дрейф базовой линии, помехи от процессов, вызванных поляризацией электродов, нарушение целостности проводящей среды электрода, насыщение входных цепей усилителя биопотенциалов [5].

3. Неверное расположение электродов отведений. Наиболее распространённая ошибка при проведении ЭКГ исследований. Например, перестановка отведений левой и правой рук, приводит к появлению отрицательного QRS комплекса в I отведении, а перестановка грудных отведений ведет к изменению общепринятой последовательности регистрации отведений, чаще всего ошибка распознаётся по резкому снижению амплитуды в одном из отведений [6].

4. Обрыв отведения.

5. Некорректное использование фильтров.

6. Необеспечение качественного кожно-электродного контакта.

7. Дефекты электрокардиоаппаратуры.

На данный момент нет эффективных методов определения и/или количественного анализа композитных источников шума, являются ли они только физиологическими, нефизиологическими или комбинацией обоих. В связи с этим ведется разработка интегральных мер (метрик) для оценки качества сигнала [5].

Методы расчета метрик качества ЭКГ сигнала по времени анализа можно проклассифицировать следующим образом:

1. анализ качества ЭКГ сигнала непосредственно в момент исследования (в режиме реального времени);

2. анализ качества в течение короткого промежутка времени (порядка 2 мин) после завершения регистрации сигнала [8, 9];

3. анализ качества большого количества записей после регистрации в течение длительного времени (более 2 мин). Данный метод используется при оценке качества сигналов в академических базах данных и базах данных, используемых для клинических исследований.

Интегральная метрика качества ЭКГ сигнала складывается на основании анализа ряда характеристик, например в [7] это:

– уровень шума (низкочастотный/высокочастотный), количественной оценкой которого является вычисленное значение отношения сигнал/шум;

– стабильность базовой линии;

– оценка параметров кожно-электродного контакта;

– амплитуда Т-волны.

Данная интегральная метрика чаще всего используется для оценки качества ЭКГ сигналов, собранных во время клинических исследований в специализированных базах данных, и её использование в режиме реального времени является затруднённым.

В работе [8] предлагается использовать следующие составляющие для вычисления интегральной метрики ЭКГ сигнала:

- сравнение эффективности работы установленных алгоритмов определения ритма на сигнале одного отведения;
- сравнение эффективности работы одного из алгоритмов определения ритма на различных отведениях;
- вычисление распределения эксцесса ЭКГ сегмента;
- расчет соотношения спектральных распределений ЭКГ сегмента на различных полосах частот.

Данная интегральная метрика качества ЭКГ сигнала может использоваться в режиме реального времени для непрерывного анализа качества сигнала. Однако существенным недостатком данной метрики является невозможность определения неверного расположения электродов, которое является наиболее распространённой ошибкой персонала при регистрации биопотенциалов.

Проведен анализ литературных источников, каталогов поставщиков и производителей медицинской техники, в процессе которого были рассмотрены модельные ряды приборов от 101 компании-производителя электрокардиографической техники, в том числе 17 отечественных производителей (ООО «Альтоника», ЗАО «ИжМедикал, ООО «Нейрософт» и другие).

Установлено, что ведущие иностранные производители на данный момент предлагают для своих приборов дополнительное специализированное программное обеспечение, позволяющее оценивать качество регистрируемого ЭКГ сигнала, например технология Marquette Hookup Advisor от General Electric. Однако большинство производителей предлагает данную функциональность только в старших и наиболее дорогостоящих моделях своих модельных рядов. Например, кардиограф Philips Page Writer Trim II, позволяет оценивать качество сигнала на каждом отведении в режиме реального времени. Но ввиду дороговизны данные приборы не доступны для широкого и повсеместного использования.

При этом отечественные приборы практически не обладают должными возможностями оценки качества ЭКГ сигнала. Так, например, электрокардиоанализатор «Анкар-131» фирмы «Медиком-МТД» позволяет следить за качеством установки электродов и индцировать обрыв отведения. Однако он не обеспечивает возможности оценки диагностической значимости и наличия артефактов в сигнале.

Кроме того, авторами не выявлено публикаций в отечественной литературе, посвященных разработке метрик качества электрокардиографического сигнала. Так, на базе международного ресурса PhysioNet [9], организованного при поддержке Национального института биомедицинских изображений (США) и Национального института медицинских наук (США) в 2011 году был проведен конкурс, направленный на разработку методов повышения качества электрокардиографических исследований, в частности полученных с помощью телемедицинских систем на базе мобильных телефонов (смартфонов). Данный конкурс нашел широкую поддержку со стороны научного сообщества, но, к сожалению, работы отечественных авторов не принимали участие в данном мероприятии. Данные факты, возможно, говорят о недостаточном внимании со стороны отечественных разработчиков к обозначенной проблеме.

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОКАДИОГРАФИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

Для реализации анализа качества электрокардиографического сигнала в течение короткого промежутка времени (порядка 2 мин) после завершения регистрации сигнала пред-

лагается использовать программно-аппаратную базу разрабатываемой на кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» Госуниверситета – УНПК системы оперативного контроля технического состояния электрокардиографической техники [10]. В течение ряда лет авторами ведется разработка предложений, направленных на решение проблем метрологического обеспечения и повышения качества работы электрокардиоаппаратуры. На данный момент создана и запатентована структура системы оперативного контроля технического состояния электрокардиоаппаратуры (патент RU 86 300 U1), зарегистрировано специализированное программное обеспечение (ПО) для автоматизации метрологической поверки электрокардиоаппаратуры. С целью совершенствования и развития функциональных возможностей и дальнейшего внедрения системы в ОГУП «Медтехника» (г. Орел) установлен первый макетный образец данной системы.

Разрабатываемая система представляет собой программно-аппаратный комплекс, в который входит персональный компьютер со специализированным программным обеспечением, планшетный или протяжной сканер и генератор тестовых сигналов. В основу работы системы заложен автоматизированный анализ отклика прибора на формируемые генератором ЭКГ-подобные тестовые сигналы, параметры которых определены в нормативной документации. Сравнение записанного отклика с нормированными параметрами тестовых сигналов позволяет проводить метрологическую поверку и сертификационные испытания электрокардиоаппаратуры. Данные, необходимые для сравнения, получаются путем оптического распознавания координат линии сигнала на оцифрованной электрокардиографической ленте или передаются от прибора в виде файлов стандартных форматов передачи медицинских данных. Автоматизированное сравнение производится с помощью разработанного программного обеспечения.

Для реализации функции контроля качества ЭКГ сигнала на программно-аппаратной базе системы оперативного контроля технического состояния электрокардиоаппаратуры предлагается разработать метод цифровой обработки ЭКГ сигнала, включающий в себя расчет универсальной интегральной метрики качества ЭКГ сигнала, вычисление которой возможно как в режиме реального времени, так и после завершения исследования. Также необходимо дополнить данный метод алгоритмами, основанными на математическом аппарате нечеткой логики и искусственных нейронных сетей, с целью обеспечения возможности диагностики наиболее распространенных ошибок и проблем, влияющих на качество электрокардиографического сигнала. По завершению анализа электрокардиографического сигнала предполагается выдача значения интегральной метрики качества и рекомендаций по устранению обнаруженных ошибок и проблем, возникших в процессе проведенного исследования.

Дополнение системы оперативного контроля технического состояния электрокардиоаппаратуры данным методом цифровой обработки ЭКГ сигнала позволит использовать данную систему не только для проведения метрологической поверки и текущего контроля технического состояния, но также и для оценки качества электрокардиографических исследований после завершения регистрации сигнала. Несмотря на дополнительные временные затраты, связанные с необходимостью передачи результатов ЭКГ исследований в систему, её использование будет актуально для приборов, не имеющих функций передачи данных о проведенных измерениях непосредственно в персональный компьютер, или приборов, программное обеспечение которых поддерживает экспорт в стандартные форматы передачи медицинских данных, но не может проводить оценку качества получаемого сигнала.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существует проблема контроля качества ЭКГ сигнала, которая непосредственно влияет на качество исследований. На данный момент отсутствуют публикации отечественных авторов, а производимая в Российской Федерации аппаратура не реализует функций, необходимых, для контроля качества регистрируемого сигнала. Всё это говорит о недостаточном внимании отечественных разработчиков к проблеме качества ЭКГ сигналов, что, в конечном счете, существенно снижает конкурентоспособность продукции на мировом рынке.

2. Актуальным является совершенствование известных или разработка новых алгоритмов оценки качества электрокардиографического сигнала, с целью снижения вычислительной стоимости и расширения возможностей распознавания большего количества артефактов.

3. Для оценки качества ЭКГ сигнала при проведении исследований с использованием аппаратуры, не обладающей необходимыми функциональными возможностями, предлагается дополнить соответствующим математическим обеспечением программно-аппаратную базу разрабатываемой в Госуниверситете–УНПК системы оперативного контроля технического состояния электрокардиоаппаратуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационный бюллетень № 317. Сентябрь 2011 г. Сердечно-сосудистые заболевания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru/index.html>.
2. Шубик, Ю.В. Качество врачебных заключений по данным суточного мониторирования ЭКГ [Текст] / Ю.В. Шубик, И.В. Апарина, М.М. Медведев, А.П. Фельдман // Вестник аритмологии. – ЗАО "Институт Кардиологической Техники" ("ИНКАРТ"). – 2007. – № 49. – С. 25-34.
3. Технические проблемы ЭКГ [Электронный ресурс]. – Режим доступа [http://en.ecgpedia.org/wiki/Technical\\_Problems](http://en.ecgpedia.org/wiki/Technical_Problems).
4. Allen, J Assessing ECG signal quality on a coronary care unit [Text] / J. Allen, A. Murray // Physiological Measurement. – 1996. – № 17. – P. 249–258.
5. A New Method for Evaluating ECG Signal Quality for Multi-Lead Arrhythmia Analysis [Text] // Computers in Cardiology. – 2002. – № 29. – P. 85–88.
6. García-Niebla, J Technical Mistakes during the Acquisition of the Electrocardiogram [Text] / J. García-Niebla, P Llontop-García, JI Valle-Racero, G Serra-Autonell, V.N. Batchvarov, A.B.De Luna // Ann. Noninvasive Electrocardiology. – 2009. – № 14(4). – P. 389-403.
7. Establishing Metrics for ECG Recording Quality: The Role of the ECG Warehouse [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – [www.bioprint.com/Fupload/image/PCMG\\_Establishing%2520Metrics\\_\\_ECG\\_Article.pdf](http://www.bioprint.com/Fupload/image/PCMG_Establishing%2520Metrics__ECG_Article.pdf).
8. Li, Q, Robust heart rate estimation from multiple asynchronous noisy sources using signal quality indices and a Kalman filter [Text] // Physiol Meas. – 2009. – № 29 (1). – P. 15–32.
9. PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – <http://www.physionet.org/challenge/2011/>.
10. Подмастерьев, К.В. Проблемы метрологического обеспечения электрокардиографической техники и возможные пути их решения [Текст] / К.В. Подмастерьев, А.В. Козюра // Биотехносфера. – Санкт-Петербург: Политехника. – 2010. – № 1. – С. 34-39.

### **Подмастерьев Константин Валентинович**

Госуниверситет-УНПК, г. Орел

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 419802

E-mail: [asms-orel@mail.ru](mailto:asms-orel@mail.ru)

### **Козюра Алексей Вячеславович**

Госуниверситет-УНПК, г. Орел

Аспирант, ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел.(4862) 41-98-76

E-mail: [alexey.kozyura@bmeccenter.ru](mailto:alexey.kozyura@bmeccenter.ru)

K.V. PODMASTERYEV, A.V. KOZYURA

## TO THE QUESTION OF ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL QUALITY ASSESSMENT

*Current status and currency of ECG signal quality assessment are showed. Major technical problems during the acquisition of the electrocardiogram are presented. Key quality assessment methods and their drawbacks are described. Use of know solutions base for ECG signal quality assessment implementation is proposed.*

**Keywords:** *quality assessment, ECG signals electrocardiography.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Informacionnyj bjulleten' № 317. Sentjabr' 2011 g. Serdechno-sosudistye zabolevanija [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru/index.html>.
2. Shubik, Ju.V. Kachestvo vrachebnyh zakljuchenij po dannym sutochnogo monitorirovanija JeKG [Tekst] / Ju.V. Shubik, I.V. Aparina, M.M. Medvedev, A.P. Fel'dman // Vestnik aritmologii. – ZAO "Institut Kar-diologicheskoy Tehniki" ("INKART"). – 2007. – № 49. – С. 25-34.
3. Tehnicheskie problemy JeKG [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa [http://en.ecgpedia.org/wiki/Technical\\_Problems](http://en.ecgpedia.org/wiki/Technical_Problems).
4. Allen, J Assessing ECG signal quality on a coronary care unit [Text] / J. Allen, A. Murray // Physiological Measurement. – 1996. – № 17. – P. 249–258.
5. A New Method for Evaluating ECG Signal Quality for Multi-Lead Arrhythmia Analysis [Text] // Computers in Cardiology. – 2002. – № 29. – P. 85–88.
6. García-Niebla, J Technical Mistakes during the Acquisition of the Electrocardiogram [Text] / J. García-Niebla, P Llontop-García, JI Valle-Racero, G Serra-Autonell, V.N. Batchvarov, A.B.De Luna // Ann. Noninvasive Electrocardiology. – 2009. – № 14(4). – R. 389-403.
7. Establishing Metrics for ECG Recording Quality: The Role of the ECG Warehouse [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa. – [www.biotech.com/Fupload/image/PCMG\\_Establishing%2520Metrics\\_\\_ECG\\_Article.pdf](http://www.biotech.com/Fupload/image/PCMG_Establishing%2520Metrics__ECG_Article.pdf).
8. Li, Q, Robust heart rate estimation from multiple asynchronous noisy sources using signal quality indices and a Kalman filter [Text] // Physiol Meas. – 2009. – № 29 (1). – P. 15–32.
9. PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge 2011 [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa. – <http://www.physionet.org/challenge/2011/>.
10. Podmaster'ev, K.V. Problemy metrologicheskogo obespechenija jelektrokardiograficheskoy tehniki i vozmozhnye puti ih reshenija [Tekst] / K.V. Podmaster'ev, A.V. Kozjura // Biotehnosfera. – Sankt-Peterburg: Politehnika. – 2010. – № 1. – S. 34-39.

**Podmaster'ev Konstantin Valentinovich**

State University – ESPC, Oryol

Professor, Sci. Dr. in Technical sciences head of “Instrument engineering, metrology and certification” chair

Tel.: + 7(4862) 41-98-02

E-mail: [asms-orel@mail.ru](mailto:asms-orel@mail.ru)

**Kozyura Alexey Vyacheslavovich**

State University – ESPC, Oryol

Assistant lecturer of “Instrument engineering, metrology and certification” chair

Tel.: + 7(4862) 41-98-76

E-mail: [aleksei.vk@gmail.com](mailto:aleksei.vk@gmail.com)



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТРОЛЯ С ЛИНЕЙНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

*Статья посвящена исследованиям в области совершенствования частотных методов измерений различных параметров веществ и материалов с помощью индуктивных и емкостных датчиков. Для повышения точности приборов резонансного контроля предлагается использовать цифровые методы обработки и линейную частотную модуляцию возбуждающего сигнала. Выполнены аналитические и экспериментальные исследования процессов, связанных с возбуждением аналоговой резонансной системы импульсным высокочастотным сигналом и появлением дополнительной погрешности измерений, возникающей от «сноса» резонансной частоты, определены пути уменьшения этой погрешности.*

**Ключевые слова:** резонансный прибор контроля, точность измерений, линейная частотная модуляция, «снос» резонансной частоты.

### ВВЕДЕНИЕ

Значительное место среди множества методов измерений занимают частотные методы, основанные на применении высокочастотных приборов контроля с индуктивными или емкостными измерительными преобразователями и использовании явления резонанса в электрических цепях. Измерения диэлектрических свойств и влажности различных веществ, контроль уровней, измерение толщины покрытий, величин угловых, линейных перемещений и скоростей, измерения электропроводности и магнитной проницаемости различных сред, дефектоскопия изделий из металла и других материалов с помощью токовых вихревых, индуктивных и емкостных датчиков – вот далеко не полный перечень задач, решаемых методами частотных резонансных измерений.

Для уменьшения влияния мешающих факторов, понижающих достоверность резонансного контроля, применяют различные методы, большинство из которых основано на применении многопараметровых подходов и использовании линейной частотной модуляции. Однако точность таких устройств ограничивается тем, что при линейном изменении частоты возбуждающего сигнала возникает погрешность от сдвига максимума резонансной кривой колебательной системы относительно ее истинного значения. Данное явление «сноса» резонансной частоты возникает при быстрой перестройке и зависит от скорости развертки частоты и постоянной времени измерительного преобразователя, а также от добротности резонансной системы [1, 2].

Для определения способов компенсации этой дополнительной погрешности необходимо проведение исследований, направленных на повышение точности резонансных измерений с использованием цифровых методов обработки и параметрической модуляции в приборах контроля.

### АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Аналитическая модель цифрового немодулированного высокочастотного сигнала  $S_1(t)$  может быть представлена в виде периодической последовательности однополярных прямоугольных импульсов известной частоты  $f_1 = 1/T$ , амплитуды  $A$  и длительности  $\tau = T/2$ :

$$S_1(t) = A \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \text{rect}((t - kT)/\tau) = A \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \text{rect}((t - 2k\tau)/\tau), \quad (1)$$

$$\text{где } \text{rect}((t - kT)/\tau) = \begin{cases} 1, & t \in [kT, kT + \tau]; \\ 0, & kT + \tau < t < (k+1)T, \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

Импульсный сигнал с линейной частотной импульсной модуляцией (ЛЧИМ-сигнал), необходимый для возбуждения измерительной резонансной системы при использовании па-

раметрической модуляции, может быть получен из сигнала (1) следующим образом. Каждый импульс последовательности (1), начиная со второго, будет укорачиваться путем умножения длительности импульса  $\tau$  на некоторый постоянный коэффициент  $\alpha < 1$ , величина которого зависит от скорости перестройки частоты в процессе осуществления ее модуляции. В этом случае длительности всех импульсов можно записать в виде бесконечного ряда с уменьшающимися в геометрической прогрессии элементами:

$$\tau, \alpha\tau, \alpha^2\tau, \dots, \alpha^k\tau, \dots \quad (2)$$

Текущее положение каждого импульса на временной оси можно задать двумя моментами времени, соответствующими его началу  $t_{\text{н}}$  и окончанию  $t_{\text{к}}$ :

$$t_{\text{н}} = 0, 2\tau, 2\tau + 2\alpha\tau, 2\tau + 2\alpha\tau + 2\alpha^2\tau, \dots, 2\tau + 2\alpha\tau + 2\alpha^2\tau + \dots + 2\alpha^i\tau, \dots; \quad (3)$$

$$t_{\text{к}} = \tau, 2\tau + \alpha\tau, 2\tau + 2\alpha\tau + \alpha^2\tau, \dots, 2\tau + 2\alpha\tau + 2\alpha^2\tau + \dots + \alpha^i\tau, \dots \quad (4)$$

В соответствии с правилами элементарной математики, для элементов ряда в виде бесконечно убывающей геометрической прогрессии положение каждого  $i$ -го импульса ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) можно в общем виде представить следующим образом:

$$t_{\text{н}i} = 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1); \quad t_{\text{к}i} = 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1) + \alpha^i\tau. \quad (5)$$

С учетом полученных соотношений, можно записать окончательное выражение для исследуемого ЛЧИМ-сигнала в следующем виде:

$$S_{\text{ЛЧИМ}}(t) = A \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \text{rect} \left\{ \left[ t - 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1) \right] / \alpha^i\tau \right\}, \quad (6)$$

где  $\text{rect} \left\{ \left[ t - 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1) \right] / \alpha^i\tau \right\} =$

$$= \begin{cases} 1, & t \in \left[ 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1), 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1) + \alpha^i\tau \right]; \\ 0, & 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1) + \alpha^i\tau < t < 2\tau(\alpha^{i+1} - 1)/(\alpha - 1), i = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

Учитывая сложность полученного выражения и серьезные математические трудности, возникающие при анализе во временной области, представляется целесообразным решить задачу определения реакции резонансной системы второго порядка на воздействующий ЛЧИМ-сигнал (6) операторным методом.

В соответствии с операторным методом анализа [2], изображение реакции  $S_2(p)$  электрической цепи может быть определено в виде произведения операторной передаточной функции этой цепи  $T(p)$  на изображение воздействия:

$$S_2(p) = T(p) \cdot S_1(p). \quad (7)$$

Зададимся стандартным видом операторной передаточной функции, соответствующей описанию пассивной электрической цепи второго порядка в следующем виде:

$$T(p) = a_1 p / (p^2 + b_1 p + b_0). \quad (8)$$

Для определения операторного изображения воздействия необходимо выполнить над сигналом (6) ряд преобразований. Каждый  $i$ -й импульс  $I(t, i)$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) из последовательности (6) можно представить в виде суперпозиции двух функций включения противоположной полярности, сдвинутых во времени на величину  $\alpha^i\tau$ :

$$I(t, i) = A \cdot \text{rect} \left\{ \left[ t - 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1) \right] / \alpha^i\tau \right\} = \\ = A \cdot \sigma \left\{ t - 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1) \right\} - A \cdot \sigma \left\{ t - \left[ 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1) + \alpha^i\tau \right] \right\}, \quad (9)$$

где  $\sigma(x)$  – функция Хевисайда.

С учетом выражений (5) и (9) временное описание ЛЧИМ-сигнала можно представить в следующем виде:

$$S_{\text{ЛЧИМ}}(t) = A \cdot \sum_{i=0}^{\infty} I(t, i) = A \cdot \sum_{i=0}^{\infty} [\sigma(t - t_{\text{н}i}) - \sigma(t - t_{\text{к}i})]. \quad (10)$$

Поскольку выражение (10) представляет собой суперпозицию стандартных функций, можно записать операторное изображение ЛЧИМ-сигнала:

$$S_{1\text{ЧИМ}}(p) = L\{S_{1\text{ЧИМ}}(t)\} = (A/p) \cdot \sum_{i=0}^{\infty} [\exp(-pt_{hi}) - \exp(-pt_{ki})], \quad (11)$$

так как, во-первых, преобразование Лапласа является линейной операцией, а во-вторых, операторное изображение функции Хевисайда может быть представлено в следующем виде [2]:

$$L\{\sigma(t-x)\} = (1/p)\exp(-px). \quad (12)$$

Теперь нетрудно найти изображение реакции резонансной системы с передаточной функцией (8) на воздействующий ЛЧИМ-сигнал:

$$\begin{aligned} S_{2\text{ЧИМ}}(p) &= (a_1 p / (p^2 + b_1 p + b_0)) \cdot (A/p) \cdot \sum_{i=0}^{\infty} [\exp(-pt_{hi}) - \exp(-pt_{ki})] = \\ &= [a_1 A / (p^2 + b_1 p + b_0)] \cdot \sum_{i=0}^{\infty} [\exp(-pt_{hi}) - \exp(-pt_{ki})]. \end{aligned} \quad (13)$$

Для перехода в область действительной переменной  $t$  необходимо учесть следующие обстоятельства. Во-первых, обратное преобразование Лапласа для первого сомножителя в выражении (13) может быть записано с помощью таблицы соответствий [2]:

$$L^{-1}\{a_1 A / (p^2 + b_1 p + b_0)\} = (a_1 A / \omega_1) \exp(-b_1 t / 2) \sin \omega_1 t, \quad (14)$$

где  $\omega_1 = \sqrt{b_0 - b_1^2 / 4}$ .

Во-вторых, для преобразования Лапласа справедлива теорема запаздывания [2], в соответствии с которой умножение функции в операторной области на величину  $\exp(-pt_0)$  эквивалентно задержке функции на величину  $t_0$  при переходе в область действительной переменной  $t$ .

С учетом этих обстоятельств можно записать:

$$\begin{aligned} S_{2\text{ЧИМ}}(t) &= L^{-1}\{S_{2\text{ЧИМ}}(p)\} = \\ &= (a_1 A / \omega_1) \sum_{i=0}^{\infty} [\exp(-b_1(t-t_{hi})/2) \sin \omega_1(t-t_{hi})] - \\ &- (a_1 A / \omega_1) \sum_{i=0}^{\infty} [\exp(-b_1(t-t_{ki})/2) \sin \omega_1(t-t_{ki})] = \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \Theta_1(t, i) + \sum_{i=0}^{\infty} \Theta_2(t, i), \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\Theta_1(t, i) = (a_1 A / \omega_1) \exp(-b_1(t-t_{hi})/2) \sin \omega_1(t-t_{hi})$  ;

$\Theta_2(t, i) = -(a_1 A / \omega_1) \exp(-b_1(t-t_{ki})/2) \sin \omega_1(t-t_{ki})$ .

Сложность аналитического выражения (15) не позволяет непосредственно оценить значение дополнительной погрешности от "сноса" резонансной частоты, вносимой в результаты измерений при возбуждении резонансной системы импульсным высокочастотным сигналом с линейной частотной модуляцией. Более целесообразно для получения количественных оценок выполнить экспериментальные исследования на основе полученных аналитических выражений.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

С целью проверки полученных результатов проведено имитационное моделирование

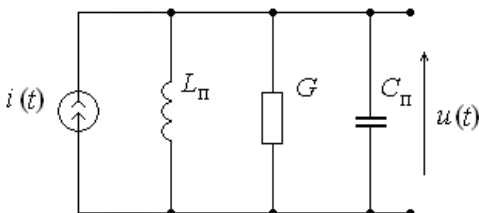


Рисунок 1 – Схема замещения резонансной системы измерительного преобразователя

с помощью программы "MathCAD". В качестве модели резонансной системы принят параллельный колебательный контур с выходным сигналом в виде напряжения  $u(t)$  и задающим током  $i(t)$  на входе (рис. 1). На этом рисунке  $L_{\text{П}}$  и  $C_{\text{П}}$  – полные индуктивность и емкость цепи, включающие собственные параметры контура, а также эквивалентные индуктивность или емкость измерительных преобразователей, которые могут быть подключены к контуру;  $G$  – проводимость, учитывающая активные потери в контролируемом материале и в элементах контура.

Операторную передаточную функцию для этой цепи можно записать в следующем виде:

$$T(p) = (1/C_1)p / (p^2 + pG/C_1 + 1/L_1C_1) = a_1p / (p^2 + b_1p + b_0), \quad (16)$$

где  $a_1 = 1/C_1$ ,  $b_0 = 1/L_1C_1$ ,  $b_1 = G/C_1 = \omega_p/Q$ ,  $\omega_p = 1/\sqrt{L_1C_1}$ ,  $Q = \sqrt{C_1}/G\sqrt{L_1}$ .

Пусть на цепь, показанную на рисунке 1, воздействует сигнал (10) в виде последовательности прямоугольных импульсов тока с изменяющейся по линейному закону частотой (рис. 2).

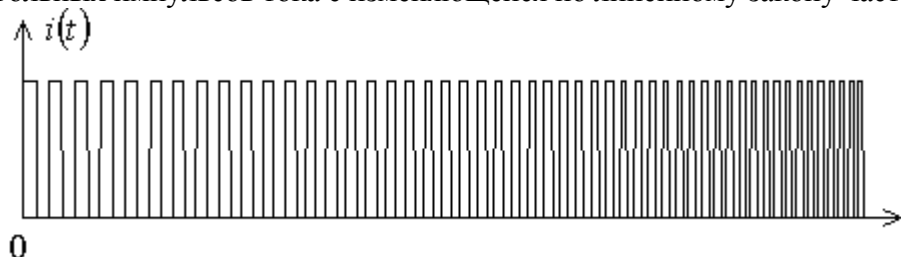


Рисунок 2 – График ЛЧИМ-сигнала

Можно составить программу по расчету сигнала  $u(t)$  на выходе линейной цепи второго порядка, схема которой приведена на рисунке 1, при воздействующем импульсном ЛЧИМ-сигнале, показанном на рисунке 2.

В программе, представленной ниже, приняты следующие обозначения:

$C$ ,  $f_p$ ,  $Q$  – соответственно емкость, резонансная частота (кГц) и добротность, которые относятся к основным параметрам резонансной системы;

$a_1$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – коэффициенты передаточной функции (16);

$\alpha$ ,  $k$ ,  $\tau$ ,  $A$  – соответственно коэффициент укорочения длительности импульсов, количество импульсов в последовательности, длительность первого импульса (мс), амплитуда последовательности импульсов;

$i(t)$  – функция, описывающая возбуждающий импульсный сигнал (ЛЧИМ-последовательность) во временной области;

$\Theta_1$ ;  $\Theta_2$  – зависимости, описывающие реакцию анализируемой цепи (рис. 1) на каждое импульсное воздействие из входной последовательности, показанной на рисунке 2;

$u(t)$  – выходной сигнал резонансной системы, приведенной на рисунке 1.

### ПРОГРАММА РАСЧЕТА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

$$C = 0,01; f_p = 1000; Q = 100.$$

$$a_1 = 1/C; b_0 = (2\pi f_p)^2; b_1 = (2\pi f_p)/Q; b_2 = 1; j = \sqrt{-1}; p(f) = j2\pi f.$$

$$K(f) = \frac{a_1 \cdot p(f)}{b_0 + b_1 \cdot p(f) + b_2 \cdot (p(f))^2}.$$

$$\alpha = 0,999; k = 1000; \tau = 0,001; A = 1.$$

$$i(t) = \sum_{i=0}^k \left\{ \begin{array}{l} 0, \quad \text{if } t < 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1}; \\ A, \quad \text{if } 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1} \leq t \leq 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1} + \tau \cdot \alpha^i; \\ 0, \quad \text{if } t > 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1} + \tau \cdot \alpha^i. \end{array} \right.$$

$$\omega = \sqrt{b_0 - (b_1/2)^2}.$$

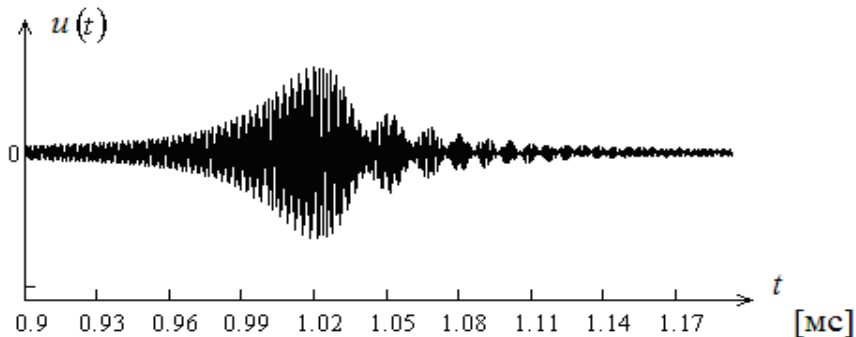
$$\Theta_1(t, t_{hi}) = \frac{a_1 \cdot A}{\omega} \cdot e^{-b_1(t-t_{hi})/2} \sin[\omega(t-t_{hi})] .$$

$$\Theta_2(t, t_{ki}) = -\frac{a_1 \cdot A}{\omega} \cdot e^{-b_1(t-t_{ki})/2} \sin[\omega(t-t_{ki})] .$$

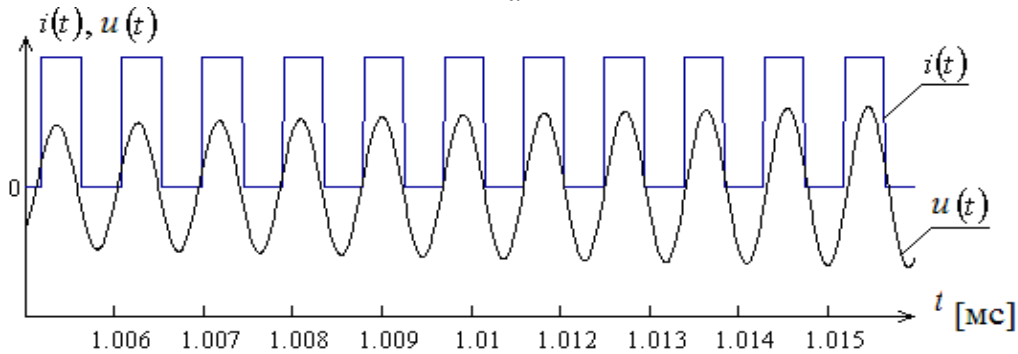
$$U_1(t) = \sum_{i=0}^k \begin{cases} 0, & \text{if } t < 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1}; \\ \Theta_1\left(t, 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1}\right), & \text{if } t \geq 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1}. \end{cases}$$

$$U_2(t) = \sum_{i=0}^k \begin{cases} 0, & \text{if } t < 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1} + \tau \cdot \alpha^i; \\ \Theta_2\left(t, 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1} + \tau \cdot \alpha^i\right), & \text{if } t \geq 2 \cdot \tau \cdot \frac{\alpha^i - 1}{\alpha - 1} + \tau \cdot \alpha^i. \end{cases}$$

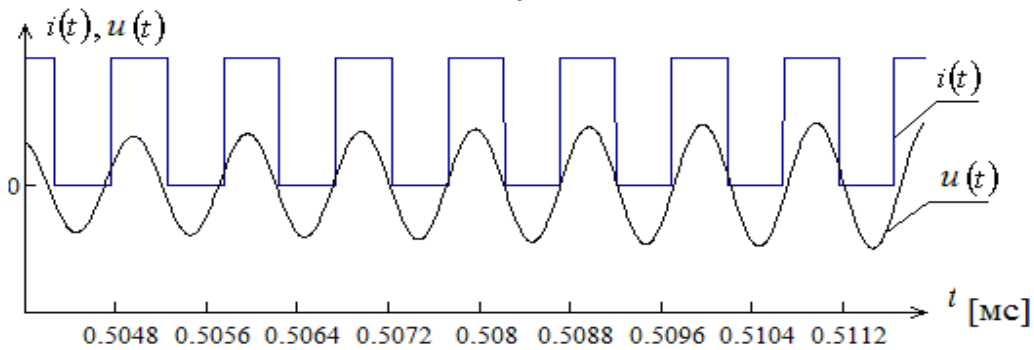
$$u(t) = U_1(t) + U_2(t).$$



a



б



в

Рисунок 3 – Диаграммы выходного сигнала (а), входного и выходного сигналов (б, в) параллельного колебательного контура при быстрой перестройке частоты возбуждающей импульсной последовательности

Результаты расчетов, выполненных на ПЭВМ по приведенной программе, графически представлены на рисунке 3. При проведении вычислений длительность периода возбуждающего импульсного сигнала последовательно уменьшалась относительно начального значения, составляющего 2 мкс, пропорционально скорости линейного изменения частоты. Для выяснения физики протекающих процессов расчеты выполнялись при разной скорости изменения частоты импульсной последовательности, что позволило выявить допустимые границы скорости модуляции частоты, обеспечивающие минимальную погрешность от "сноса" частоты резонанса.

Анализ полученных графиков показывает, что явления, происходящие в резонансной системе второго порядка при возбуждении ее импульсным сигналом с линейной модуляцией частоты, сходны с процессами, описанными для аналоговой формы возбуждающего сигнала [3]. При большой скорости перестройки частоты импульсов максимум выходного сигнала смещается, а на заднем фронте огибающей амплитуд появляются осцилляции (рис. 3, а).

Для количественной оценки наблюдаемых явлений по графикам, показанным на рисунке 3, необходимо учесть следующее. Чтобы определить значение резонансной частоты, соответствующее нулевому уровню фазовой характеристики резонансной системы, надо решить уравнение  $t_{ii} = 2\tau(\alpha^i - 1)/(\alpha - 1)$  относительно номера импульса  $i$ , при котором наблюдается совпадение фаз возбуждающей импульсной последовательности и отклика резонансной системы, после чего определить длительность  $i$ -го импульса  $\tau_i = \tau \cdot \alpha^i$  и найти текущее значение частоты возбуждающего сигнала по отношению  $f_b = 1/2\tau_i$ .

Анализ рисунков 3, б – в показывает, что при большей скорости перестройки частоты импульсов ( $\alpha = 0,998$ ,  $k = 500$ , рис. 3, в) ошибка определения  $f_p$  из-за "сноса" резонансной частоты составляет 13 кГц. При уменьшении скорости перестройки частоты ( $\alpha = 0,999$ ,  $k = 1000$ , рис. 3, б) ошибка определения частоты  $f_p$  уменьшается и составляет 11 кГц. Таким образом, можно сделать вывод, что полученные данные вполне согласуются с результатами предыдущих аналитических и экспериментальных исследований, приведенными в [3].

Для уменьшения влияния эффекта "сноса" и связанной с этим погрешности определения резонансной частоты наиболее эффективным представляется алгоритм, основанный на изменении скорости и направления развертки частоты возбуждающего импульсного сигнала в разных тактах преобразования, который позволяет снизить погрешность "сноса" при небольшом увеличении длительности цикла измерения [3]. Применение такого алгоритма позволяет при относительно небольшом увеличении общей длительности цикла измерения (от 5 до 8 мс) обеспечить 100-кратное уменьшение погрешности от "сноса" резонансной частоты LC-контра, возникающей при линейной развертке частоты возбуждающего сигнала.

### ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что ошибка измерений от "сноса" резонансной частоты, возникающая при реализации линейной развертки частоты возбуждающего сигнала в приборах резонансного контроля, реально существует и носит методический характер. Величина этой ошибки, в зависимости от параметров резонансной системы и скорости перестройки частоты возбуждающего сигнала, может достигать существенных значений, поэтому необходимо принимать меры по компенсации этой погрешности.

Использование двухтактной развертки частоты в многопараметровых приборах контроля с изменением скорости и направления развертки в разных тактах позволяет значительно уменьшить погрешность от "сноса" резонансной частоты, возникающую при реализации линейной частотной модуляции, и тем самым увеличить точность измерения контролируемых параметров различных материалов и веществ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник [Текст] / под ред. Г.С. Самойловича. – М. : Машиностроение, 1976. – 456 с.

2. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И.С. Гоноровский. – М. : Советское радио, 1971. – 672 с.

3. Лисичкин, В.Г. Повышение точности многопараметровых приборов контроля с резонансным преобразованием [Текст] / В.Г. Лисичкин, С.Н. Шведов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. – № 1/279. – С. 84–89.

**Винокуров Максим Вячеславович**

Академия ФСО России, г. Орел  
Слушатель

**Лисичкин Владимир Георгиевич**

Академия ФСО России, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
Тел. (4862) 47-00-96  
E-mail: lisichkin-vg@rambler.ru

**Шведов Сергей Николаевич**

Академия ФСО России, г. Орел  
Кандидат технических наук, преподаватель кафедры  
Тел. (4862) 43-14-00

---

M.V. VINOKUROV, V.G. LISICHKIN, S.N. SHVEDOV

**RESEARCH OF THE RESONANT CONTROL USING LINEAR PULSE  
FREQUENCY MODULATION**

*The article is devoted to perfection of frequency methods measurements by means of inductive and capacitor gauges. It is offered to use digital processing methods and linear frequency modulation to raise the accuracy of measuring devices. Analytical and experimental researches of analogue resonant system excitation are executed. The measurement error by the reason of resonant frequency «pulling down» is defined and the way of its reduction is specified.*

**Keywords:** resonant control device, accuracy of measurements, linear frequency modulation, «pulling down» of resonant frequency.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Nerazrushajuwij kontrol' metallov i izdelij. Spravochnik [Tekst] / pod red. G.S. Samojlovicha. – М. : Mashinostroenie, 1976. – 456 s.

2. Gonorovskij, I.S. Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Tekst] / I.S. Gonorovskij. – М. : Sovetskoe radio, 1971. – 672 s.

3. Lisichkin, V.G. Povyshenie tochnosti mnogoparametrovyh priborov kontrolja s rezonansnym preobrazovaniem [Tekst] / V.G. Lisichkin, S.N. Shvedov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i teh-nologii. 2010. – № 1/279. – S. 84–89.

**Vinokurov Maksim Vyacheslavovich**

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, Orel  
Trainee

**Lisichkin Vladimir Georgievich**

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, Orel  
Candidate of technical science, associate professor  
Phone: (4862) 47-00-96  
E-mail: lisichkin-vg@rambler.ru

**Shvedov Sergey Nikolaevich**

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, Orel  
Candidate of technical science, lecturer  
Phone: (4862) 43-14-00

## МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*На основе представления процесса эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры в виде упорядоченной во времени последовательности состояний разработана аналитическая модель, определяющая зависимость показателя качества функционирования от периода управляющего воздействия по восстановлению работоспособности. В качестве исходных данных для работы модели используется информация о надежности однородного парка аппаратуры, собираемая в процессе эксплуатации.*

**Ключевые слова:** радиоэлектронная аппаратура, управление техническим состоянием, полумарковский процесс, вероятности переходов, показатель качества функционирования.

Рассматривается наиболее распространённый режим функционирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а именно, режим непрерывной нормальной эксплуатации с восстановлением отказов за случайное время, распределённое по закону Эрланга. При этом предполагается, что контроль работоспособности осуществляется постоянно, то есть явные отказы обнаруживаются мгновенно, а скрытые отказы – при проведении технического обслуживания (ТО) с периодом  $\tau_{i\ \delta i}$  и длительностью обслуживания  $\tau_{\delta i}$ . Модель управления в данном случае целесообразно строить на основе полумарковских процессов (ПМП), что позволяет рассматривать произвольные законы распределения времени пребывания аппаратуры в различных состояниях [1]. Представляя изделие в виде динамического объекта, выделим пять базовых состояний:  $S_1$  – работоспособное;  $S_2$  – плановое ТО с последующим переходом в работоспособное состояние;  $S_3$  – плановое ТО с последующим переходом в состояние текущего ремонта;  $S_4$  – скрытый отказ;  $S_5$  – текущий ремонт после возникновения явных и скрытых отказов. При этом будем считать возможными следующие переходы:

$$S_1 \leftrightarrow S_2, \quad S_1 \rightarrow S_4, \quad S_1 \leftrightarrow S_5, \quad S_3 \rightarrow S_5, \quad S_4 \rightarrow S_3.$$

Исходя из приведённого описания модели, отображающей реальные процессы функционирования РЭА, вводится матрица независимых функций распределения времени пребывания аппаратуры в  $i$ -м состоянии перед переходом в  $j$ -е состояние, если бы данный выход из состояния был единственным [2]. Элементы представлены следующей системой выражений:

$$\left. \begin{aligned} Q_{12}(t) &= \begin{cases} 0 & \text{if } t < \tau_{i\ \delta i}; \\ 1 & \text{if } t \geq \tau_{i\ \delta i}; \end{cases} & Q_{14}(t) &= \begin{cases} 1 - e^{-\lambda_{14}t} & \text{if } t < \tau_{i\ \delta i}; \\ 0 & \text{if } t \geq \tau_{i\ \delta i}; \end{cases} \\ Q_{15}(t) &= \begin{cases} 1 - e^{-\lambda_{15}t} & \text{if } t < \tau_{i\ \delta i}; \\ 0 & \text{if } t \geq \tau_{i\ \delta i}; \end{cases} & Q_{21}(t) &= \begin{cases} 0 & \text{if } t < \tau_{\delta i}; \\ 1 & \text{if } t \geq \tau_{\delta i}; \end{cases} \\ Q_{35}(t) &= \begin{cases} 0 & \text{if } t < \tau_{\delta i}; \\ 1 & \text{if } t \geq \tau_{\delta i}; \end{cases} & Q_{51}(t) &= 1 - (1 + \lambda_{51}t)e^{-\lambda_{51}t}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\lambda_{14}$  – параметр потока скрытых отказов;

$\lambda_{15}$  – параметр потока явных отказов;

$\lambda_{51}$  – параметр распределения Эрланга.

Вероятности переходов между базовыми состояниями определяются на основе известного свойства ПМП [1]:



$$p_{ij} = \int_0^{\infty} \prod_{k \neq j} [1 - Q_{ik}(t)] dQ_{ij}(t). \quad (2)$$

В результате подстановки (1) в (2) получаем:

$$\left. \begin{aligned} p_{12} &= \int_0^{\infty} [(1 - Q_{14}(t))(1 - Q_{15}(t))] dQ_{12} = e^{-(\lambda_{14} + \lambda_{15})\tau_{i \delta i}}; \\ p_{14} &= \int_0^{\infty} [(1 - Q_{12}(t))(1 - Q_{15}(t))] dQ_{14} = \frac{\lambda_{14}}{\lambda_{14} + \lambda_{15}} \left(1 - e^{-(\lambda_{14} + \lambda_{15})\tau_{i \delta i}}\right); \\ p_{15} &= \int_0^{\infty} [(1 - Q_{12}(t))(1 - Q_{14}(t))] dQ_{15} = \frac{\lambda_{15}}{\lambda_{14} + \lambda_{15}} \left(1 - e^{-(\lambda_{14} + \lambda_{15})\tau_{i \delta i}}\right); \\ p_{21} &= p_{35} = p_{43} = p_{51} = 1. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Безусловные функции распределения находятся с учётом всех возможных переходов относительно рассматриваемого состояния модели:

$$\left. \begin{aligned} F_1(t) &= 1 - [(1 - Q_{12}(t))(1 - Q_{14}(t))(1 - Q_{15}(t))] = \begin{cases} 1 - e^{-(\lambda_{14} + \lambda_{15})t} & \text{if } t < \tau_{i \delta i}; \\ 1 & \text{if } t \geq \tau_{i \delta i}; \end{cases} \\ F_2(t) &= 1 - (1 - Q_{21}(t)) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < \tau_{\delta i}; \\ 1 & \text{if } t \geq \tau_{\delta i}; \end{cases} \\ F_3(t) &= 1 - (1 - Q_{35}(t)) = \begin{cases} 0 & \text{if } t < \tau_{\delta i}; \\ 1 & \text{if } t \geq \tau_{\delta i}; \end{cases} \\ F_5(t) &= 1 - (1 - Q_{51}(t)) = 1 - (1 + \lambda_{51}t)e^{-\lambda_{51}t}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

а безусловные математические ожидания  $\bar{t}_i$  времени пребывания РЭА в любом возможном  $i$ -м состоянии определяются следующими равенствами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{t}_1 &= \int_0^{\infty} [1 - F_1(t)] dt = \frac{1}{\lambda_{14} + \lambda_{15}} \left(1 - e^{-(\lambda_{14} + \lambda_{15})\tau_{i \delta i}}\right); \\ \bar{t}_2 &= \int_0^{\infty} [1 - F_2(t)] dt = \tau_{\delta i}; \\ \bar{t}_3 &= \int_0^{\infty} [1 - F_3(t)] dt = \tau_{\delta i}; \\ \bar{t}_4 &= \frac{\tau_{i \delta i}}{1 - e^{-(\lambda_{14} + \lambda_{15})\tau_{i \delta i}}} - \frac{1}{\lambda_{14} + \lambda_{15}}; \\ \bar{t}_5 &= \int_0^{\infty} [1 - F_5(t)] dt = \frac{2}{\lambda_{51}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для определения практически важного показателя процесса функционирования РЭА, а именно, стационарных вероятностей  $P_i$ , предварительно находятся стационарные вероятности  $\Pi = \{\pi_i\}$  вложенной в рассматриваемый полумарковский процесс марковской цепи, определяемые путём решения системы уравнений Колмогорова – Чепмена (6), а также математическое ожидание времени пребывания системы в состояниях (7):

$$\left. \begin{aligned} & \pi_1 = \frac{1}{2(1+p_{14})}; \\ \left. \begin{aligned} \pi_1 &= \pi_2 p_{21} + \pi_5 p_{51}; \\ \pi_2 &= \pi_1 p_{12}; \\ \pi_3 &= \pi_4 p_{43}; \\ \pi_4 &= \pi_1 p_{14}; \\ \pi_5 &= \pi_3 p_{35} + \pi_1 p_{15}; \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 &= 1. \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \pi_2 &= \frac{p_{12}}{2(1+p_{14})}; \\ \pi_3 &= \frac{p_{14}}{2(1+p_{14})}; \\ \pi_4 &= \frac{p_{14}}{2(1+p_{14})}; \\ \pi_5 &= \frac{p_{14} + p_{15}}{2(1+p_{14})}. \end{aligned} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^5 \pi_i \bar{t}_i = \pi_1 (\bar{t}_1 + p_{12} \bar{t}_2 + p_{14} (\bar{t}_3 + \bar{t}_4) + (1 - p_{12}) \bar{t}_5). \quad (7)$$

С учётом (5), (6) и (7) получены выражения для  $P_i$ :

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{\pi_1 \bar{t}_1}{\bar{t}} = \frac{\pi_1 \bar{t}_1}{\pi_1 A} = \frac{\bar{t}_1}{A}; \\ P_2 &= \frac{\pi_2 \bar{t}_2}{\bar{t}} = \frac{\pi_1 p_{12} \bar{t}_2}{\pi_1 A} = \frac{p_{12} \bar{t}_2}{A}; \\ P_3 &= \frac{\pi_3 \bar{t}_3}{\bar{t}} = \frac{\pi_1 p_{14} \bar{t}_3}{\pi_1 A} = \frac{p_{14} \bar{t}_3}{A}; \\ P_4 &= \frac{\pi_4 \bar{t}_4}{\bar{t}} = \frac{\pi_1 p_{14} \bar{t}_4}{\pi_1 A} = \frac{p_{14} \bar{t}_4}{A}; \\ P_5 &= \frac{\pi_5 \bar{t}_5}{\bar{t}} = \frac{\pi_1 (1 - p_{12}) \bar{t}_5}{\pi_1 A} = \frac{(1 - p_{12}) \bar{t}_5}{A}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $A = \bar{t}_1 + p_{12} \bar{t}_2 + p_{14} (\bar{t}_3 + \bar{t}_4) + (1 - p_{12}) \bar{t}_5$ .

В результате преобразования выражения (8) с учётом (3) и (5) получается:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{1 - P_{1 \text{ öi}}}{\lambda_{14} \tau_{i \text{ öi}} + \tau_{\text{öi}} P_{1 \text{ öi}} (\lambda_{14} + \lambda_{15}) + (1 - P_{1 \text{ öi}}) \{1 + \tau_{\hat{a}} \lambda_{15} + \lambda_{14} [\tau_{\text{öi}} + \tau_{\hat{a}} - 1 / (\lambda_{14} + \lambda_{15})]\}}; \\ P_2 &= \frac{\tau_{\text{öi}} P_{1 \text{ öi}} (\lambda_{14} + \lambda_{15})}{\lambda_{14} \tau_{i \text{ öi}} + \tau_{\text{öi}} P_{1 \text{ öi}} (\lambda_{14} + \lambda_{15}) + (1 - P_{1 \text{ öi}}) \{1 + \tau_{\hat{a}} \lambda_{15} + \lambda_{14} [\tau_{\text{öi}} + \tau_{\hat{a}} - 1 / (\lambda_{14} + \lambda_{15})]\}}; \\ P_3 &= \frac{\lambda_{14} (1 - P_{1 \text{ öi}})}{\lambda_{14} \tau_{i \text{ öi}} + \tau_{\text{öi}} P_{1 \text{ öi}} (\lambda_{14} + \lambda_{15}) + (1 - P_{1 \text{ öi}}) \{1 + \tau_{\hat{a}} \lambda_{15} + \lambda_{14} [\tau_{\text{öi}} + \tau_{\hat{a}} - 1 / (\lambda_{14} + \lambda_{15})]\}}; \\ P_4 &= \frac{\lambda_{14} (1 - P_{1 \text{ öi}}) [\tau_{i \text{ öi}} / (1 - P_{1 \text{ öi}}) - 1 / (\lambda_{14} + \lambda_{15})]}{\lambda_{14} \tau_{i \text{ öi}} + \tau_{\text{öi}} P_{1 \text{ öi}} (\lambda_{14} + \lambda_{15}) + (1 - P_{1 \text{ öi}}) \{1 + \tau_{\hat{a}} \lambda_{15} + \lambda_{14} [\tau_{\text{öi}} + \tau_{\hat{a}} - 1 / (\lambda_{14} + \lambda_{15})]\}}; \\ P_5 &= \frac{(\lambda_{14} + \lambda_{15}) (1 - P_{1 \text{ öi}}) \tau_{\hat{a}}}{\lambda_{14} \tau_{i \text{ öi}} + \tau_{\text{öi}} P_{1 \text{ öi}} (\lambda_{14} + \lambda_{15}) + (1 - P_{1 \text{ öi}}) \{1 + \tau_{\hat{a}} \lambda_{15} + \lambda_{14} [\tau_{\text{öi}} + \tau_{\hat{a}} - 1 / (\lambda_{14} + \lambda_{15})]\}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $P_{1 \text{ öi}} = e^{-(\lambda_{14} + \lambda_{15}) \tau_{i \text{ öi}}}$ ,  $\tau_{\hat{a}} = \frac{2}{\lambda_{51}}$ .

Учитывая, что из пяти рассматриваемых состояний  $S_1$  является работоспособным, а все остальные – неработоспособными, функция управления техническим состояни-

ем  $F_{\dot{o}} = K_{\dot{a}}(\tau_{i \dot{o}})$ , представляющая собой зависимость коэффициента готовности РЭА от периода управляющего воздействия, определяется через вероятность безотказной работы  $P_1$ .

Примеры расчёта  $F_{\dot{o}}$  показаны на рисунке 1. Из рисунка при фиксированных значениях интенсивностей отказов графически легко определяется оптимальное значение  $\tau_{i \dot{o}}$ , обеспечивающее максимальное значение функции управления.

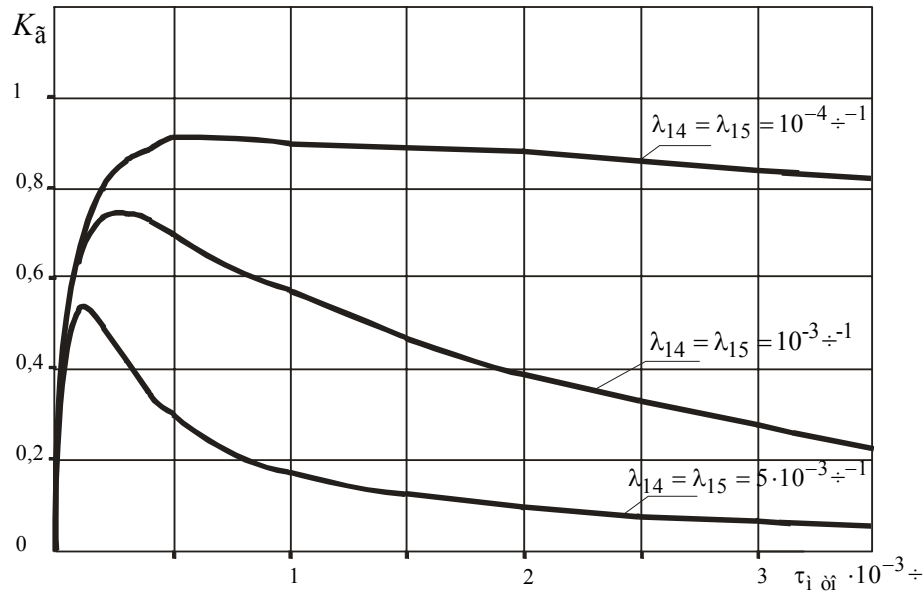


Рисунок 1 – Примеры расчета функции управления

Оптимальное значение  $\tau_{i \dot{o}}$  можно определить также из следующего равенства:

$$\frac{dF_{\dot{o}}}{d\tau_{i \dot{o}}} = 0. \tag{10}$$

Решение уравнения (10) и его преобразование приводят к получению приближенного выражения для определения  $\tau_{i \dot{o}}$ :

$$\tau_{i \dot{o}} \approx \sqrt{\frac{2\tau_{\dot{o}}}{\lambda_{14}}}. \tag{11}$$

Таким образом, полученные аналитические выражения полностью описывают реальный процесс функционирования РЭА в режиме непрерывной нормальной эксплуатации и позволяют соответствующим выбором периода управляющего воздействия добиться максимально возможного значения показателя качества функционирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королук, В.С. Полумарковские процессы и их приложения [Текст] / В.С. Королук, А.Ф. Турбин. – Киев: Наукова Думка, 1976. – 184 с.
2. Волков, Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов [Текст] / Л.И. Волков. – М.: Высш. шк., 1987. – 400 с.

**Моисеев Сергей Александрович**  
 Госуниверситет УНПК, г. Орел  
 Соискатель кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
 E-mail: ant1441@yandex.ru

## MANAGEMENT MODEL OF THE TECHNICAL CONDITION OF RADIOELECTRONIC EQUIPMENT IN THE PROCESS OF EXPLOITATION

*On the basis of representation of process of maintenance of radio-electronic equipment in the form of the sequence of conditions ordered in time the analytical model defining the dependence of quality coefficient of functioning from the period of control response on restoration of working capacity. As initial data for model work the information on reliability of homogeneous park of the equipment, collected while in service is used.*

**Keywords:** *radio-electronic equipment, management of a technical condition, semi-Markov process, probabilities of transitions, an indicator of quality of functioning.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Korolyuk, V.S. Polumarkovskie protsessy i ikh prilozheniya [Tekst] / V.S. Korolyuk, A.F. Turbin. – Kiev: Naukova Dumka, 1976. – 184 s.
2. Volkov, L.I. Upravlenie ehkspluatatsiej letatel'nykh kompleksov [Tekst] / L.I. Volkov. – M.: Vyssh. shk., 1987. – 400 s.

**Moiseev Sergey Aleksandrovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Degree-seeking student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

E-mail: ant1441@yandex.ru

А.Б. ЕРШОВ, В.Я. ХОРОЛЬСКИЙ, А.В. ЕФАНОВ

## СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОНСЕЛЕ И ПОЛЗУНОВА-УАТТА ПРИ ПРОГРАММНОМ УПРАВЛЕНИИ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ОДИНОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА БОЛЬШОЙ ВЕЛИЧИНЫ

*В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности процесса программного управления амплитудно-временными параметрами одиночных импульсов тока большой величины в режиме реального времени посредством введения в закон управления операнда задающего воздействия. Представлена методология формирования эквивалентного оператора объекта управления, обеспечивающего инвариантность системы по отношению к функции задающего воздействия до заданного значения погрешности.*

**Ключевые слова:** принцип Ползунова – Уатта; принцип Понселе; программное управление; эквивалентная передаточная функция.

Практика разработки испытательного оборудования силовых полупроводниковых приборов при освоении серийного производства диодов 2Д432-80 в ОАО "Опэрон-Ставрополь" показала невозможность применения стандартных законов программного управления параметрами испытательных импульсов большого тока (до 2 кА). При этом под стандартными законами управления понимается использование принципов управления, базирующихся на формировании реакции системы управления на отклонение выходной переменной от программно заданного значения. Так, например, практическая реализация метода изодромного регулирования дает сбой при импульсах тока менее 100 А, а при токах в 250 – 300 А становится полностью нечувствительной к функции задающего воздействия в виде полупериода синусоидального колебания частотой 50 Гц. Практическая реализация методов программного управления токами импульсов большой величины стала возможной только при использовании нестандартных методов формирования управляющих воздействий.

Трудности реализации стандартных методов программного управления параметрами импульсов тока большой величины в режиме реального времени обусловлены присутствием в функции задающего воздействия производных второго и более высоких порядков и вариациями их значений. Например, сам принцип программного управления изменяющимся током  $i(t)$  уже определяет присутствие в функции задающего воздействия второй производной

$$\text{var } g(t) = \text{var } \frac{dq}{dt} = \frac{d^2i(t)}{dt^2}. \quad (1)$$

Алгоритм или функциональную зависимость, в соответствии с которым управляющее устройство (микропроцессор с буферизированным устройством управления) вырабатывает управляющее воздействие  $u(t)$ , в общем случае можно представить в виде

$$u(t) = F(g, f, \delta), \quad (2)$$

где  $F$  – нелинейный оператор объекта управления;  $g$  – операнд задающего воздействия;  $f$  – операнд возмущающего воздействия;  $\delta$  – операнд ошибки.

Для электрических систем в подавляющем большинстве случаев нелинейный оператор объекта управления может быть линеаризован, и выражение (2) можно представить в виде

$$u(t) = L_1(g) + L_2(f) + L_3(\delta). \quad (3)$$

В этом выражении третье слагаемое соответствует принципу регулирования по отклонению (принцип Ползунова – Уатта), а первое и второе – регулированию по внешнему воздействию (принцип Понселе) [1].

Рассматривая преимущества совместного использования принципов Понселе и Ползунова – Уатта при программном управлении амплитудно-временными параметрами оди-

ночных импульсов тока большой величины будем считать, что система программного управления работает в отсутствие внешних возмущений, т. е.

$$u(t) = L_1(g) + L_2(\delta). \quad (4)$$

В этом случае функция ошибки системы управления  $\delta(t)$  определяется решением операторного уравнения

$$\delta(t) = \frac{(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n)}{(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m)} g(t) = \frac{Q(p)}{D(p)} g(t). \quad (5)$$

Для нулевых начальных условий изображение ошибки можно представить в виде

$$\Delta(p) = \frac{Q(p)}{D(p)} G(p) = \frac{Q(p)A(p)}{D(p)B(p)}, \quad (6)$$

где  $G(p) = A(p)/B(p)$  – изображение задающего воздействия, представляющее собой дробно-рациональную функцию комплексного аргумента  $p = c + j\omega$ .

Учитывая, что табличные формулы дифференцирования оригиналов даются для нулевых начальных условий, то в соответствии с теоремой разложения [2] для ненулевых начальных условий изображение по Лапласу первой производной оригинала имеет вид

$$\int_0^{\infty} \delta'(t) e^{-pt} dt = e^{-pt} \delta(t) \Big|_0^{\infty} + p \int_0^{\infty} \delta(t) e^{-pt} dt = p\Delta(p) - \delta(0), \quad (7)$$

и, соответственно для производной  $n$  – го порядка можно получить уравнение

$$L[\delta^{(n)}(t)] = p^n \Delta(p) - p^{n-1} \delta(0) - \dots - \delta^{(n-1)}(0). \quad (8)$$

Оригинал (8) в случае отсутствия кратных корней может быть представлен в виде

$$\delta(t) = \delta_c(t) + \delta_g(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{p_k t} + \sum_{i=1}^l E_i e^{p_i t}, \quad (9)$$

где  $\delta_c(t), \delta_g(t)$  – соответственно, свободная и вынужденная составляющие функции ошибки управления  $\delta(t)$ ;

$p_k$  – полюсы передаточной функции системы управления по ошибке, определяемые корнями уравнения  $D(p) = 0$ ;

$p_i$  – полюсы передаточной функции системы управления по задающему воздействию или корни уравнения  $B(p) = 0$ .

Вынужденная составляющая  $\delta(t)$  равна нулю когда  $A(p) = 0$ , или при равенстве нулю функции задающего воздействия, и при  $Q(p) = 0$ , т. е. при абсолютной инвариантности системы управления по отношению к задающему воздействию.

Для системы программного управления равенство  $Q(p) = 0$  означает, что равна нулю передаточная функция по ошибке. В иной записи это означает равенство единице передаточной функции замкнутой системы

$$\Phi(p) = 1 - \Phi_{\delta}(p) = 1. \quad (10)$$

Условие (10) приводит к тому, что идеальная система программного управления должна иметь регулируемый объект с бесконечной полосой пропускания, так как частотная передаточная функция замкнутой системы  $\Phi(j\omega) = 1$  при всех частотах  $0 < \omega < \infty$ .

Учитывая, что для реальных систем программного управления данное условие практически не реализуемо, можно прийти к выводу об отсутствии абсолютно инвариантных систем по отношению к любому виду задающих воздействий (задающих функций программного управления).

Совместное использование принципов Понселе и Ползунова – Уатта при программном управлении амплитудно-временными параметрами одиночных импульсов большой ве-

личины означает осуществление регулирования по замкнутому и разомкнутому циклам, выполняемому в структурной схеме (рис. 1).

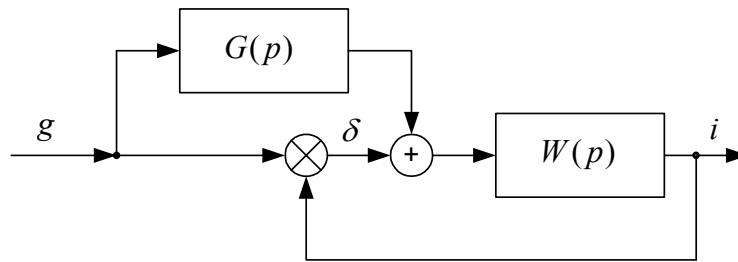


Рисунок 1 – Исходная структурная схема системы управления при совместном использовании принципов Понселе и Ползунова - Уатта

При равенстве нулю программной функции задающего воздействия регулируемая величина тока  $i$  связана с задающим воздействием  $g$  через передаточную функцию замкнутой системы [1]:

$$i = \Phi(p)g = \frac{W(p)}{1+W(p)}g, \quad (11)$$

где  $W(p)$  – передаточная функция разомкнутой системы.

При введении управляющего воздействия регулируемая величина определяется выражением

$$i = \frac{W(p)}{1+W(p)}[1+G(p)]g = \Phi_3(p)g. \quad (12)$$

Эквивалентная передаточная функция замкнутой системы с учетом регулирования по задающему воздействию имеет вид

$$\Phi_3(p) = \frac{W(p)[1+G(p)]}{1+W(p)}. \quad (13)$$

Существование эквивалентной передаточной функции  $\Phi_3(p)$  для микропроцессорных систем управления означает возможность программной реализации в режиме реального времени функции управляющего воздействия на объект управления, одновременно осуществляющей регулирование выходной переменной по принципам Понселе и Ползунова – Уатта, что поясняется структурной схемой, показанной на рисунке 2.

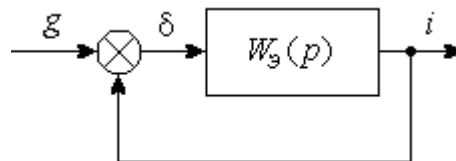


Рисунок 2 – Преобразованная структурная схема системы управления при совместном использовании принципов Понселе и Ползунова – Уатта

Из последнего выражения видно, что введение регулирования по задающему воздействию не меняет характеристического уравнения системы, работающей по отклонению, так как знаменатель передаточной функции одинаков в (11) и (13). Данное свойство означает, что при совместном использовании принципов Понселе и Ползунова – Уатта не будут нарушаться не только условия устойчивости, но и сохранятся оценки качества переходного процесса, базирующиеся на использовании корней характеристического уравнения.

Эквивалентная передаточная функция по ошибке  $\Phi_{\delta_3}(p)$  определяется выражением

$$\Phi_{\delta_3}(p) = 1 - \Phi_3(p) = \frac{1 - W(p)G(p)}{1 - W(p)}, \quad (14)$$

и, соответственно передаточная функция разомкнутой системы управления имеет вид

$$W_{\delta_3}(p) = \frac{\Phi_{\delta_3}(p)}{1 - \Phi_{\delta_3}(p)} = \frac{W(p)}{1 - W(p)G(p)}. \quad (15)$$

Из выражения (14) для передаточной функции по ошибке условие полной инвариантности системы управления можно получить, положив  $\Phi_{\delta_3}(p) = 0$ ,

$$G(p) = 1/W(p). \quad (16)$$

Вид необходимой функции управления определяется путем разложения выражения (16) в ряд по степеням оператора  $p = d/dt$ :

$$G(p) = a_0 + \tau_1 p + \tau_2 p^2 + \tau_3 p^3 + \dots \quad (17)$$

Бесконечность ряда (17) подтверждает суждение о невозможности создания системы управления, обладающей абсолютной инвариантностью по отношению к задающему воздействию. Однако практическая реализация введения производных для систем программного управления значительно упрощается, а инвариантность системы до погрешности  $\varepsilon$  определяется цифровой точностью системы. Принципиально важным является то, что введение первой производной от задающего воздействия в системе с объектом управления, обладающим астатизмом первого порядка, позволяет получить равной нулю скоростную ошибку, т. е. повысить на единицу степень астатизма относительно задающего воздействия. Введя первую и вторую производные (даже с имеющейся цифровой погрешностью  $\varepsilon$ ) степень астатизма повышается на два. Это дает обращение в нуль соответствующих коэффициентов ошибок, что позволяет значительно повысить точность всей системы управления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
2. Деруссо, Р. Пространство состояний в теории управления [Текст] / Р. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М.: Наука, 1970. – 620 с.

#### **Ершов Андрей Борисович**

Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь  
Доцент кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования, кандидат технических наук  
Тел. (8652) 72-93-03, +7 (918) 750-54-01  
E-mail: 7112828@rambler.ru

#### **Хорольский Владимир Яковлевич**

Невинномысский технологический институт Северо-Кавказского государственного технического университета, г. Невинномысск  
Профессор кафедры информационных систем, электропривода и автоматики, доктор технических наук, профессор  
Тел. 8-(8652) 23-25-52

#### **Ефанов Алексей Валерьевич**

Невинномысский технологический институт Северо-Кавказского государственного технического университета, г. Невинномысск  
Заведующий кафедрой информационных систем, электропривода и автоматики, кандидат технических наук, доцент  
Тел. 8-(86554) 7-03-84  
E-mail: kea@nti.ncstu.ru

---

A.B. ERSHOV, V.Y. KHOROLSKIY, A.V. YEFANOV

### JOINT USE OF PONCELE AND POLZUNOV-UATT PRINCIPLES IN THE PROCESS OF PROGRAMMED CONTROLLING PEAK-TIME



## PARAMETERS OF SINGLE IMPULSES OF A CURRENT OF THE BIG CAPACITY

*In article questions of increase of efficiency of process of programmed control in peak-time parametres of single impulses of a current of the big capacity in a mode of real time by means of introduction in the law of management of an operand of setting influence are considered. The methodology of formation of the equivalent operator of object of the management providing invariancy of system in relation to function of setting influence to a preset value is presented.*

**Keywords:** *a principle of Polzunova – Uatta; a principle of Ponsel; the programmed control; equivalent transfer function.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Besekerskiy, V.A. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Tekst] / V.A. Besekerskiy, E.P. Popov. – M. : Nauka, 1975. – 768 s.
2. Derusso, R. Prostranstvo sostoyanij v teorii upravleniya [Tekst] / R. Derusso, R. Roj, CH. Klouz. – M. : Nauka, 1970. – 620 s.

#### **Ershov Andrey Borisovich**

Stavropol State Agrarian University, Stavropol

Candidate of technical science, associate professor of department “Electrical Supply and Electric Equipment Operation”

Tel. (8652) 72-93-03, +7 (918) 750-54-01

E-mail: 7112828@rambler.ru

#### **Khorolskiy Vladimir Yakovlevich**

Nevinnomyssk Technological Institute of the North Caucasus

State Technical University, Nevinnomyssk

Professor of department “Information systems, electric drive and automation”,

Doctor of Engineering, professor

Tel. 8-(8652) 23-25-52

#### **Yefanov Aleksey Valeryevich**

Nevinnomyssk Technological Institute of the North Caucasus

State Technical University, Nevinnomyssk

Head of department “Information systems, electric drive and automation”,

Candidate of technical science, associate professor

Tel. 8-(86554) 7-03-84

E-mail: kea@nti.ncstu.ru

# ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 629.5.03-8.001.18

А.А. КИРПИЧЕВ, М.А. МАКСИМОВА, П.Н. ШКАТОВ

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАПАСА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ**

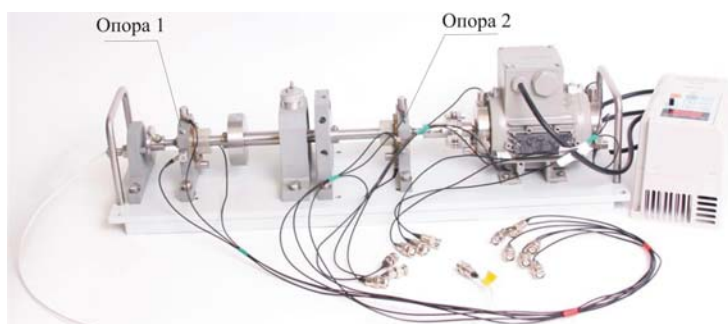
*Подшипники являются самыми распространенными и наиболее уязвимыми элементами любого роторного механизма. Подшипники осуществляют пространственную фиксацию вращающихся роторов и воспринимают основную часть статических и динамических усилий, возникающих в механизме. Техническое состояние подшипников является важнейшей составляющей, определяющей работоспособность механизма в целом. В статье описаны исследования запаса работоспособности подшипника качения и скольжения с помощью имитационного стенда.*

**Ключевые слова:** вибродиагностика, подшипник, имитационный стенд.

В работе представлены результаты экспериментального разрушения подшипников, с использованием стенда имитационного AP7000 (рис. 1), предназначенного для имитации различных режимов работы промышленного оборудования и проверки его технического состояния путем обработки измерительной информации с первичных вибропреобразователей [1]. Целью эксперимента было выведение подшипников скольжения и качения из строя (для последующего прогнозирования их остаточного ресурса) путем искусственного нанесения дефектов такой величины, чтобы подшипники оставались работоспособными и в тоже время эти дефекты имели возможность развития в процессе работы стенда.

Эксперимент проводился на подшипнике качения (ПК) типа DPI 6201RS (рис. 2), установленном в первую опору стенда.

В исходном состоянии, на частоте 30 Гц, уровень вибрации был приблизительно равен 65 дБ (рис. 3).



**Рисунок 1 – Стенд имитационный AP7000**



а

б

**Рисунок 2 – Испытуемый подшипник**  
а – начальное состояние ПК, б – вышедший из строя подшипник

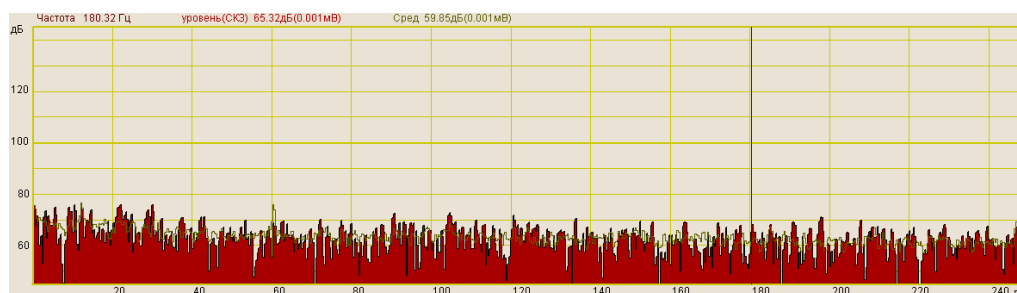


Рисунок 3 – Спектр нового подшипника качения

После внесения дефекта на поверхность качения наружного кольца (лазерной сваркой была сделана раковина), на спектре явно стала выделяться частота примерно в 76,4 Гц и её гармоники, средний уровень вибрации возрос до 80 дБ (рис. 4).

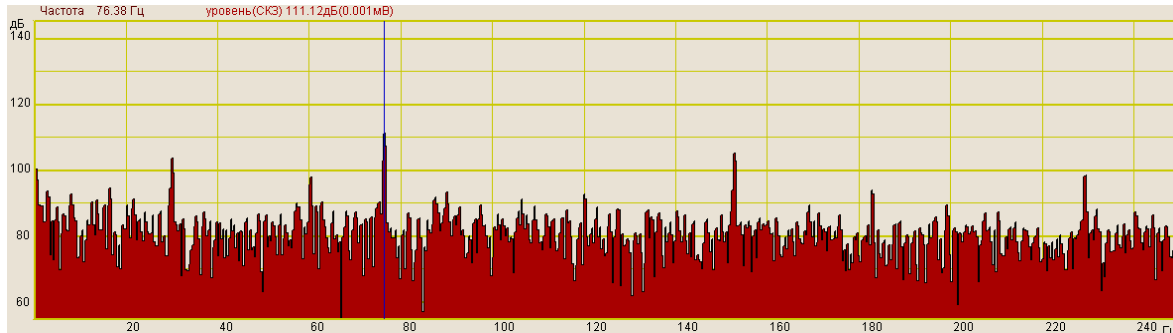


Рисунок 4 – Спектр дефектного подшипника качения

По теории [2], эта частота должна быть равна частоте перекатывания тел качения по наружному кольцу для данного подшипника, т.е.  $f_H$ . Чтобы проверить данное утверждение, был произведен расчет основных частот ПК. Чтобы вывести основные частоты, нужно знать основные геометрические размеры подшипника. Их легко измерить с помощью измерительных приборов. Проблема заключалась только в измерении диаметра тела качения ( $d_{TK}$ ), которая решилась путем разрезания ПК на две части. Теперь, зная основные геометрические размеры подшипника и то, что вал вращается с частотой 30 Гц, можно вычислить основные частоты ПК:

- частота вращения подвижного кольца относительно неподвижного:  $f_{BP} = 30$  Гц;
- частота вращения сепаратора относительно наружного кольца:

$$f_C = \frac{1}{2} \cdot f_{\hat{A}\hat{D}} \cdot \left(1 - \frac{d_{\hat{O}\hat{E}}}{d_C} \cdot \cos \alpha\right),$$

где  $d_{\hat{O}\hat{E}}$  – диаметр тела качения;

$d_C \approx \frac{1}{2} \cdot (d_H - d_B)$  – диаметр сепаратора,  $d_H$  – диаметр наружного кольца,  $d_B$  – диаметр внутреннего кольца;

$\alpha$  – угол контакта тел и дорожек качения;

$$f_C = 10,9 \text{ \AA} \ddot{\text{o}};$$

- частота перекатывания тел качения по наружному кольцу:

$$f_I = \frac{1}{2} \cdot f_{\hat{A}\hat{D}} \cdot \left(1 - \frac{d_{\hat{O}\hat{E}}}{d_C} \cdot \cos \alpha\right) \cdot z,$$

где  $z$  – число тел качения;

$$f_I = 76,4 \text{ \AA} \ddot{\text{o}};$$

- частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу:

$$f_B = \frac{1}{2} \cdot f_{\hat{A}\hat{D}} \cdot \left(1 + \frac{d_{\hat{O}\hat{E}}}{d_C} \cdot \cos \alpha\right) \cdot z;$$

$$f_B = 133,6 \text{ \AA} \ddot{\text{o}};$$

- частота вращения тела качения относительно поверхности колец:

$$f_{\hat{E}} = \frac{1}{2} \cdot f_{\hat{A}\hat{D}} \cdot \frac{d_C}{d_{\hat{O}\hat{E}}} \cdot \left(1 - \frac{d_{\hat{O}\hat{E}}^2}{d_N^2} \cdot \cos^2 \alpha\right);$$

$$f_{\hat{E}} = 50,9 \text{ \AA}.$$

Как видно из расчетов, частота 76,4 Гц соответствует частоте перекачивания тел качения по наружному кольцу, а присутствие её гармоник (рис. 4) говорит о диагностическом признаке  $kf_n$ , что соответствует дефекту «раковина на наружном кольце». Данную операцию современные диагностические приборы решают в автоматическом режиме.

Каждые три часа снимались показания спектра вибрации в осевом, горизонтальном и вертикальном направлениях. Чтобы подшипник работал под нагрузкой, с помощью гайки изгиба вала вал был максимально изогнут, а в оба маховика были ввернуты балансировочные грузы для придания дисбаланса. Через 66 ч ПК вышел из строя. Появились недопустимые для нормальной работы люфты, повредился сепаратор (рис. 2б). Это можно считать за вывод ПК из строя.

Таким образом, в конце измерений накопилось 22 показания по трем направлениям. Самым пригодным для диагностики и очевидным является осевое направление измерения вибрации, исходя из этого, получился следующий временной ряд, представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения вибрации

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Уровень вибрации, дБ	105,2	105	105,5	105,7	106,4	106	106,3	106,8	106	107	107,1
Номер измерения	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Уровень вибрации, дБ	108	108,5	108,2	109,5	110,7	111	112	112,9	114,7	117	118,7

Следующим этапом эксперимента был прогноз работоспособности подшипника. Известен уровень вибрации, при котором ПК вышел из строя, поэтому можно спрогнозировать его остаточный ресурс и сравнить с экспериментальными данными. Для этого воспользуемся программой прогнозирования «Прогнозирование сроков технического обслуживания судового энергетического оборудования» [5]. Программа предназначена для прогнозирования технического состояния элементов судовой энергетической установки по контролируемому параметру одномерного объекта. Программа позволяет спрогнозировать момент выхода параметра на допустимый уровень по известному допустимому значению контролируемого параметра и рассчитать время упреждения момента технического обслуживания по регламенту, спрогнозировать значение контролируемого параметра в какой-нибудь конкретный момент времени. Также при необходимости программа производит корректировку прогноза.

На рисунке 5 представлен график изменения уровня вибрации ПК на частоте перекачивания тел качения по наружному кольцу.

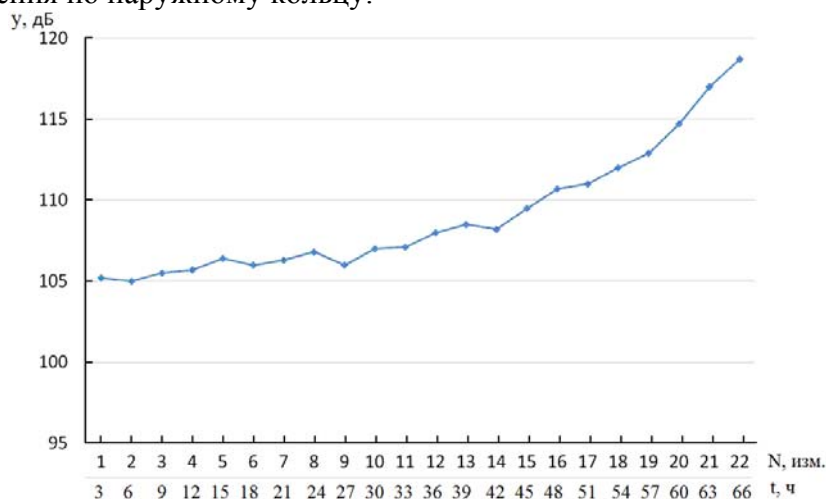


Рисунок 5 – График изменения уровня вибрации ПК

К 22-ому измерению уровень вибрации ПК вышел за допустимый уровень. Можно ли было спрогнозировать время выхода подшипника из строя? Первые 14 измерений переносятся в программу. Результаты расчета, с учетом поправки параметра тренда, оптимизируя его используя энтропийную и относительную приведенную погрешности, показали, что контролируемый параметр достигнет допустимого уровня в момент времени  $T = 21,85$ , т.е. на 22-ом измерении, что в полной мере подтверждает эксперимент (рис. 6). При этом упреждение прогноза составило  $((22-14) \times 3) = 24$  ч с погрешностью не более 2-х часов.

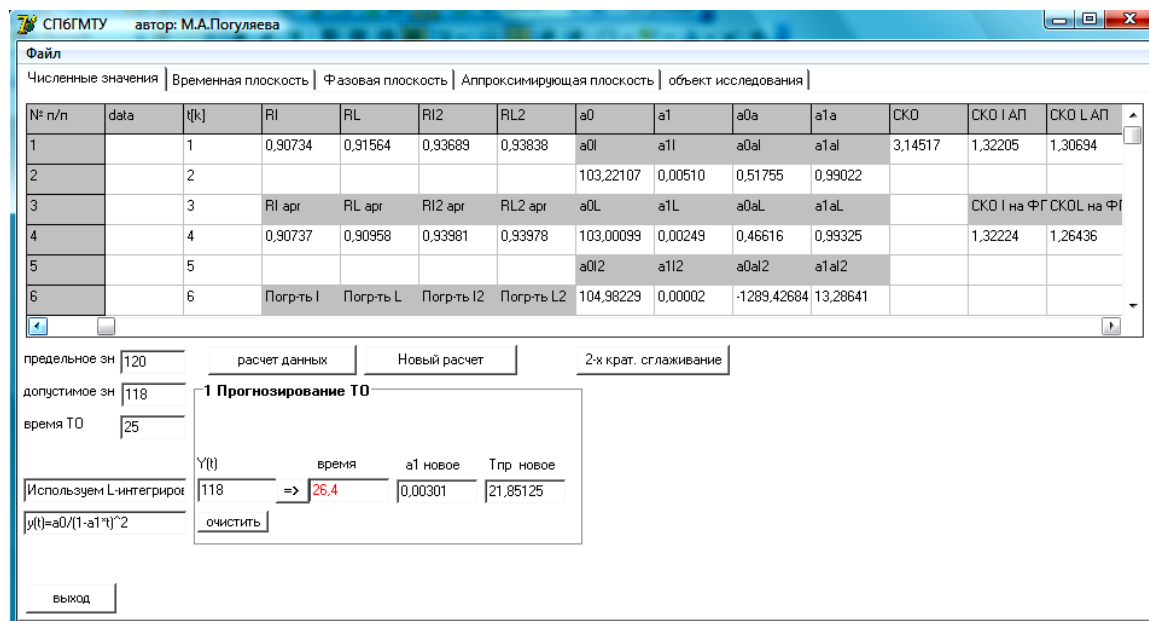


Рисунок 6 – Окно программы «Прогнозирование сроков технического обслуживания судового энергетического оборудования», ПК

Второй частью эксперимента был вывод из строя и прогнозирование остаточного ресурса подшипника скольжения (ПС) из комплекта стенда (рис. 7).

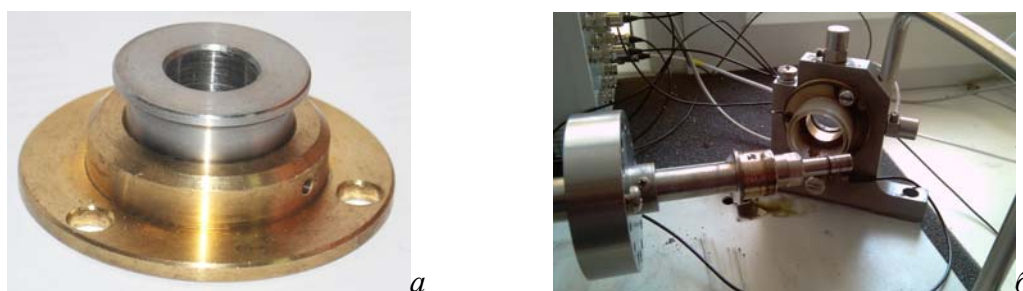


Рисунок 7 – Испытуемый подшипник  
а – начальное состояние ПС, б – вышедший из строя подшипник

Средний уровень вибрации нового ПС на частоте 30 Гц не превысил 55 дБ (рис. 8).

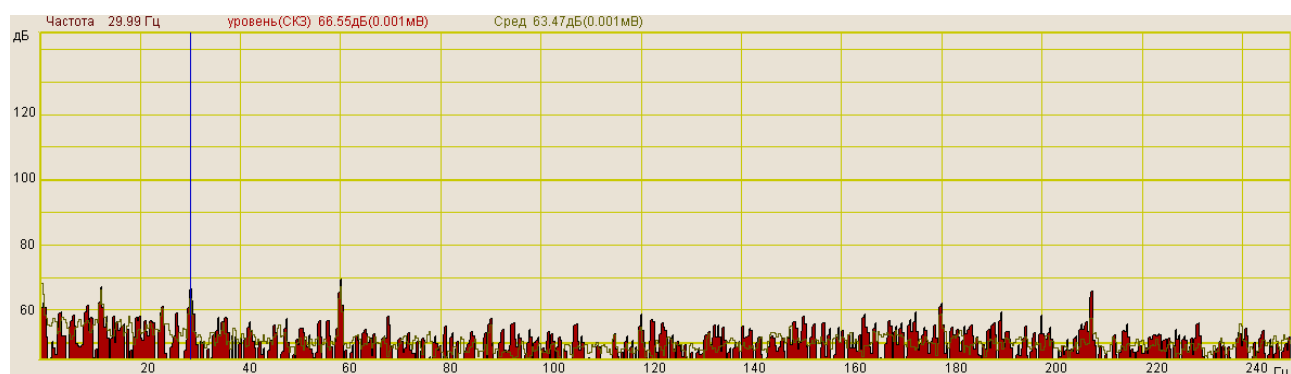


Рисунок 8 – Спектр исправного подшипника скольжения

На ПС также искусственно был внесен дефект (сняты фаски на обоих кольцах на плоскостях скольжения). После этого, как и у ПК попрос общий уровень вибрации до 85 дБ, стала выделяться частота вращения вала и её гармоники (рис. 9).

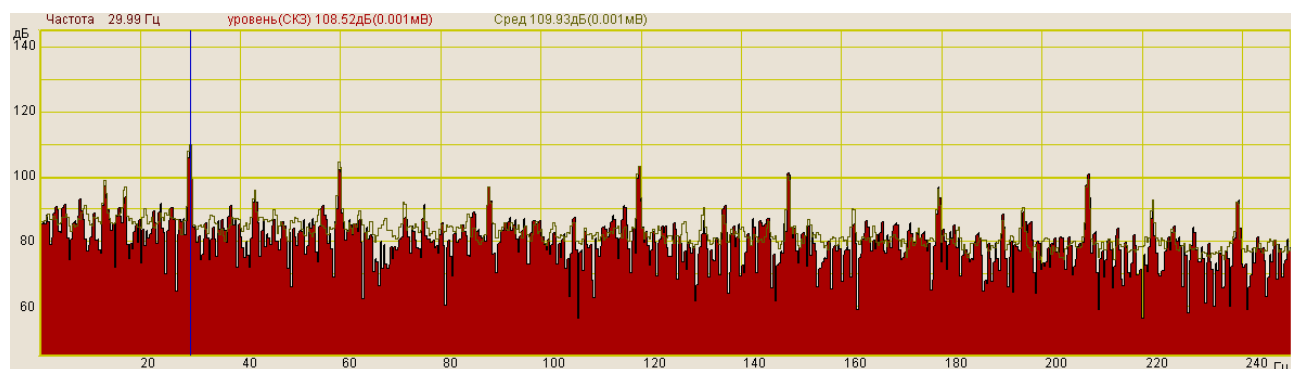


Рисунок 9 – Спектр дефектного подшипника скольжения

Процесс развития дефекта быстро прогрессировал, поэтому показания снимались каждые 2 часа. Через 30 часов стала интенсивно нагреваться опора, подшипник начал работать в разнос и вышел из строя (рис. 7, б).

На рисунке 10 представлен график изменения уровня вибрации ПС на частоте вращения вала.

Для прогноза остаточной работоспособности ПС была использована та же программа прогнозирования.

К 15-му измерению уровень вибрации ПС вышел за допустимый уровень. Возьмем первые 11 измерений и перенесем их в программу.

Результаты расчета с учетом поправки параметра тренда программы показали, что контролируемый параметр достигнет допустимого уровня в момент времени  $T = 14,09$  (рис. 11), т.е. на 15-ом измерении, что в полной мере подтверждает эксперимент. При этом упреждение процесса составило  $((15-11) \times 2) = 8$  ч с погрешностью 1,8 ч.

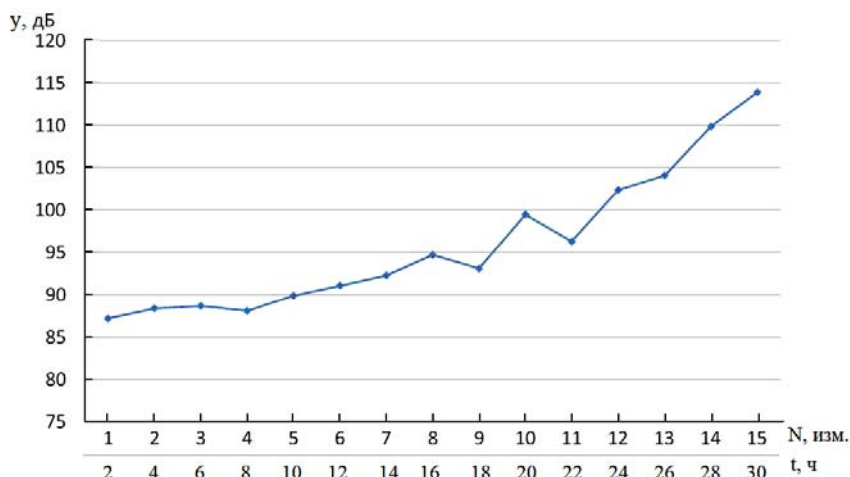


Рисунок 10 – График изменения уровня вибрации ПС

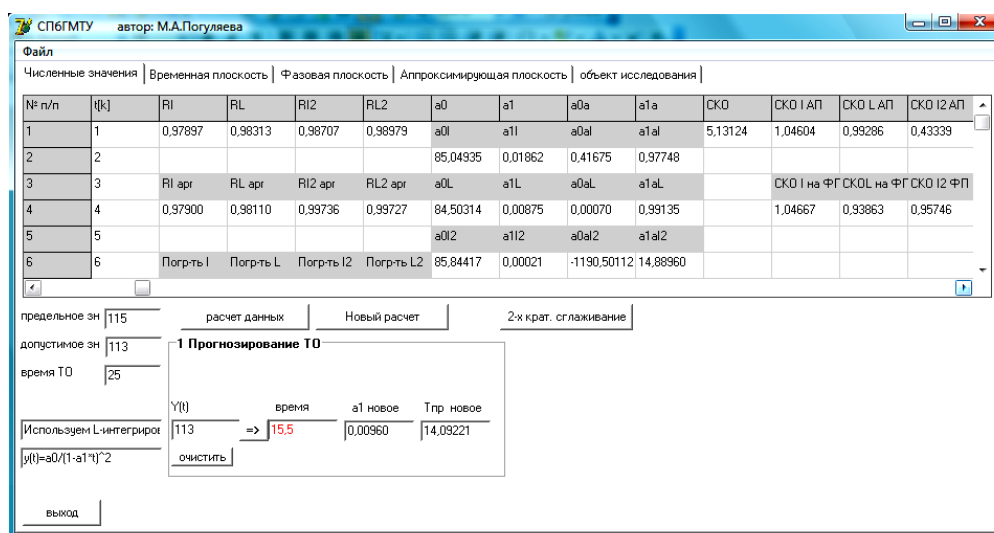


Рисунок 11 – Окно программы «Прогнозирование сроков технического обслуживания судового энергетического оборудования», ПС

Экспериментальное разрушение ПК и ПС подтвердило прогноз их остаточного ресурса, рассчитанного по программе «Прогнозирование сроков технического обслуживания судового энергетического оборудования».

В заключение следует отметить, что практическая реализация обработки информации о текущем техническом состоянии СЭУ по вибрации с использованием программы, рассчитывающей основные частоты, сообщающей о превышении предельного уровня вибрации на данной частоте, и программы прогнозирования «Прогнозирование сроков технического обслуживания судового энергетического оборудования», позволит осуществить переход от жестко регламентированного технического обслуживания к менее затратному обслуживанию по фактическому состоянию на основе компьютерных информационных технологий и позволит сократить расходы на ТО и ремонт роторных механизмов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.globaltest.ru>.
2. Баркова, Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования [Текст]: учеб. пособие / Н.А. Баркова. – СПб. : Изд. центр СПбГМТУ, 2003. – 160 с.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zetms.ru>.
4. Погуляева, М.А. Прогнозирование момента замены смазки подшипников качения, с использованием метода пик – фактора [Текст]: сборник научных трудов X Международной конференции. Трибология и надежность / М.А. Погуляева. – СПб. : ПГУПС, 2010. – С. 49-56.
5. Максимова, М.А. Программа «Прогнозирование сроков технического обслуживания судового энергетического оборудования». Свид-во № 2011614934. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.06.2011.

**Кирпичев Алексей Александрович**

ООО «ГлобалТест»

инженер-исследователь

E-mail: [kirpichev@yahoo.com](mailto:kirpichev@yahoo.com)

Тел.: (83130) 7-41-01, 6-42-56, факс: (83130) 6-42-57

**Максимова Марина Александровна**

СПбГМТУ, к.т.н., старший преподаватель

Тел.: 8-911-2148393

E-mail: [pooh.spb@mail.ru](mailto:pooh.spb@mail.ru)

**Шкатов Петр Николаевич**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва

Д-р техн. наук, профессор, директор НУЦ «КАСКАД» МГУПИ

Тел. (499) 268-76-94 факс. (495) 964-91-50

E-mail: [petr\\_shkatov@mail.ru](mailto:petr_shkatov@mail.ru)

A.A. KIRPICHEV, M.A. MAKSIMOVA, P.N. SHKATOV

## EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE SAFETY PERFORMANCE OF ROLLING AND PLAIN BEARINGS

*Bearings are the most widespread and most vulnerable elements of any rotary mechanism. Bearings shall spatial fixing rotors and accept most of the static and dynamic forces arising in the mechanism. Therefore the technical condition of bearings is the major component determining working capacity of the whole mechanism. In article researches, a stock of working capacity of the of rolling and plain bearings by means of the imitating stand are described.*

**Keywords:** vibrodiagnostics, bearing, the imitating stand.

### BIBLIOGRAPHY

1. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.globaltest.ru>.
2. Barkova, N.A. Vvedenie v vibroakusticheskiju diagnostiku rotornyh mashin i oborudovanija [Tekst]: ucheb. posobie / N.A. Barkova. – SPb. : Izd. centr SPbGMTU, 2003. – 160 s.
3. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.zetms.ru>.
4. Poguljaeva, M.A. Prognozirovanie momenta zameny smazki podshipnikov kachenija, s ispol'zovaniem metoda pik – faktora [Tekst]: sbornik nauchnyh trudov H Mezhdunarodnoj konferencii. Tribologija i nadezh-nost' / M.A. Poguljaeva. – SPb. : PGUPS, 2010. – S. 49-56.
5. Maksimova, M.A. Programma «Prognozirovanie srokov tehničeskogo obsluzhivaniya sudovogo jenergetičeskogo oborudovanija». Svid-vo № 2011614934. Zaregistrovano v Reestre programm dlja JeVM 23.06.2011.

#### **Kirpichev Aleksey Aleksandrovich**

LLC "GlobalTest"

research engineer

E-mail: [kirpichev@yahoo.com](mailto:kirpichev@yahoo.com)

Tel.: (83130) 7-41-01, 6-42-56, fax: (83130) 6-42-57

#### **Maksimova Marina Aleksandrovna**

SPbGMTU, Ph.D., senior lecturer

Tel.: 8-911-2148393

E-mail: [pooh.spb@mail.ru](mailto:pooh.spb@mail.ru)

#### **Shkatov Petr Nikolaevich**

The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow

Doctor of technical science, professor, director of the NCA "CASCADE"

Tel. (499) 268-76-94 fax (495) 964-91-50

E-mail: [petr\\_shkatov@mail.ru](mailto:petr_shkatov@mail.ru)



УДК 620.179.1.082.7

В.В. МИШИН, А.В. СЕЛИХОВ, В.В. СЕМЁНОВ, Е.И. РОДЬКИН, С.Н. ТУЛИН

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

*Статья посвящена комплексному многопараметрическому анализу технического состояния подшипника качения с использованием вибрационного, акустического и электрического методов диагностирования.*

**Ключевые слова:** подшипник, электрическое сопротивление, вибрация, шум.

Подшипники качения являются одним из основных элементов подвижных конструкций машин и механизмов, поэтому вопрос оценки их технического состояния (техническая диагностика) на этапах сборки подшипников, установки в конструкцию и в процессе эксплуатации является весьма актуальным. Ввиду отсутствия методов, дающих однозначное суждение о качестве подшипника в узле, в настоящее время одной из самых распространённых методик является органолептический метод диагностики и контроля наличия дополнительных акустических составляющих в акустическом спектре излучения подшипника качения, тепловой и вибрационный контроль. В первом случае оператор сравнивает акустический шум исследуемого подшипника с шумом образцового и в случае существенного расхождения подшипник признаётся бракованным. При реализации инструментальных методов оценка технического состояния подшипника проводится по вибрации и температуре.

Работа посвящена экспериментальным исследованиям в области совместного использования вибрационного, акустического и электрического методов с целью повышения достоверности результатов диагностирования подшипников качения.

Объектом исследования является подшипник марки 1000900, скорость вращения – 300 об/мин, радиальная нагрузка 20 Н, масло И-20, шумомер RM-DT-0602, датчик вибрации ДН-3, цифровой осциллограф DSO-2090, микрофон Genius Mic-01/A. Испытательный стенд был собран на основе стенда для приработки подшипников качения (СППК), технические характеристики которого приведены в таблице 1 (разработан совместно ООО «НПП Астронэлектроника» и ФГБОУ ВПО Госуниверситет - УНПК). Стенд со смонтированными датчиками изображен на рисунке 1.

Таблица 1 – Технические характеристики

Осевая нагрузка, Н	0 - 100
Радиальная нагрузка, Н	0 - 100
Частота вращения, об/мин	0 - 1000
Измеряемая температура, °С	0 - 100
Напряжение питания, В	220±22

Принцип измерения заключается в следующем (рис. 2): на испытуемый подшипник 1 через токосъемник 2 подается электрическое напряжение от источника 3. Ток через подшипник ограничивается дополнительным сопротивлением (условно не показано). На входной цепи преобразователя сопротивление-напряжение (ПСН) при работе подшипника образуется электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению (проводимости) подшипника. Одновременно с сигналом сопротивления преобразователем 4 регистрируется вибросигнал с наружного кольца подшипника, преобразователь 5 регистрирует уровень шума, создаваемый подшипником. Сбор данных осуществляется платой сбора данных ПСД, затем данные передаются в ЭВМ. Ввиду ограниченности количества измерительных каналов, возможно одновременное измерение только двух величин.

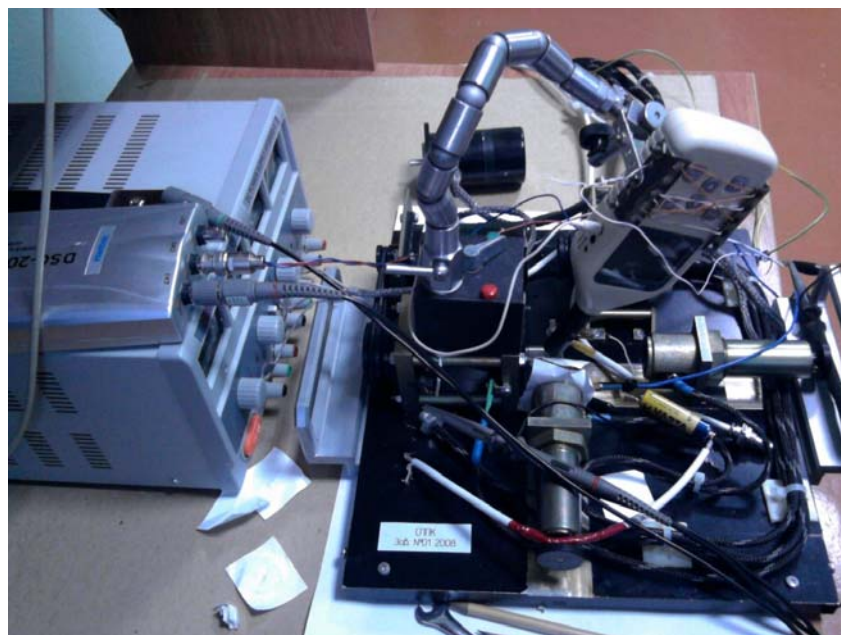


Рисунок 1 – Стенд приработки подшипников качения

Блок схема измерительных каналов представлена на рисунке 2.

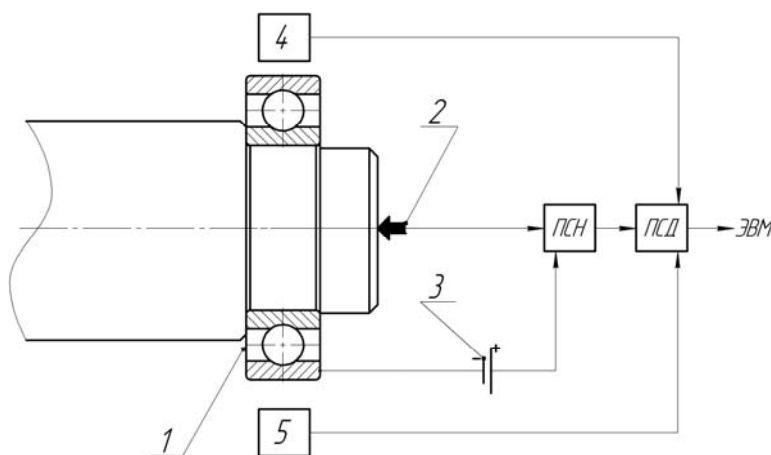


Рисунок 2 – Блок схема измерительных каналов

Первый подшипник проходил два режима работы: приработка, рабочий режим. После приработки подшипник был разобран, на внешнюю поверхность внутреннего кольца нанесены макродефекты в виде царапин с поперечным направлением относительно дорожек качения. Акустический шум, создаваемый подшипником, складывается из шума от шариков, от вращения внутреннего кольца и сепаратора, влияния микрогеометрии контактирующих поверхностей, поэтому создание дополнительных фиксированных макронеровностей необходимо для проведения исследований влияния их наличия, формы и параметров на параметры сигналов электрической, акустической и вибрационной природы при сравнительном эксперименте.

Для исследования влияния изменений микрогеометрии дорожек качения на сигналы, после приработки, дорожка качения внутреннего кольца второго подшипника была модифицирована внесением абразивного материала в зону трения. Для равномерного распределения абразива и нанесения дефектов по всей поверхности, подшипник впоследствии прокручивался при действии радиальной нагрузки. После этой операции он был промыт, и заново установлен на стенд.

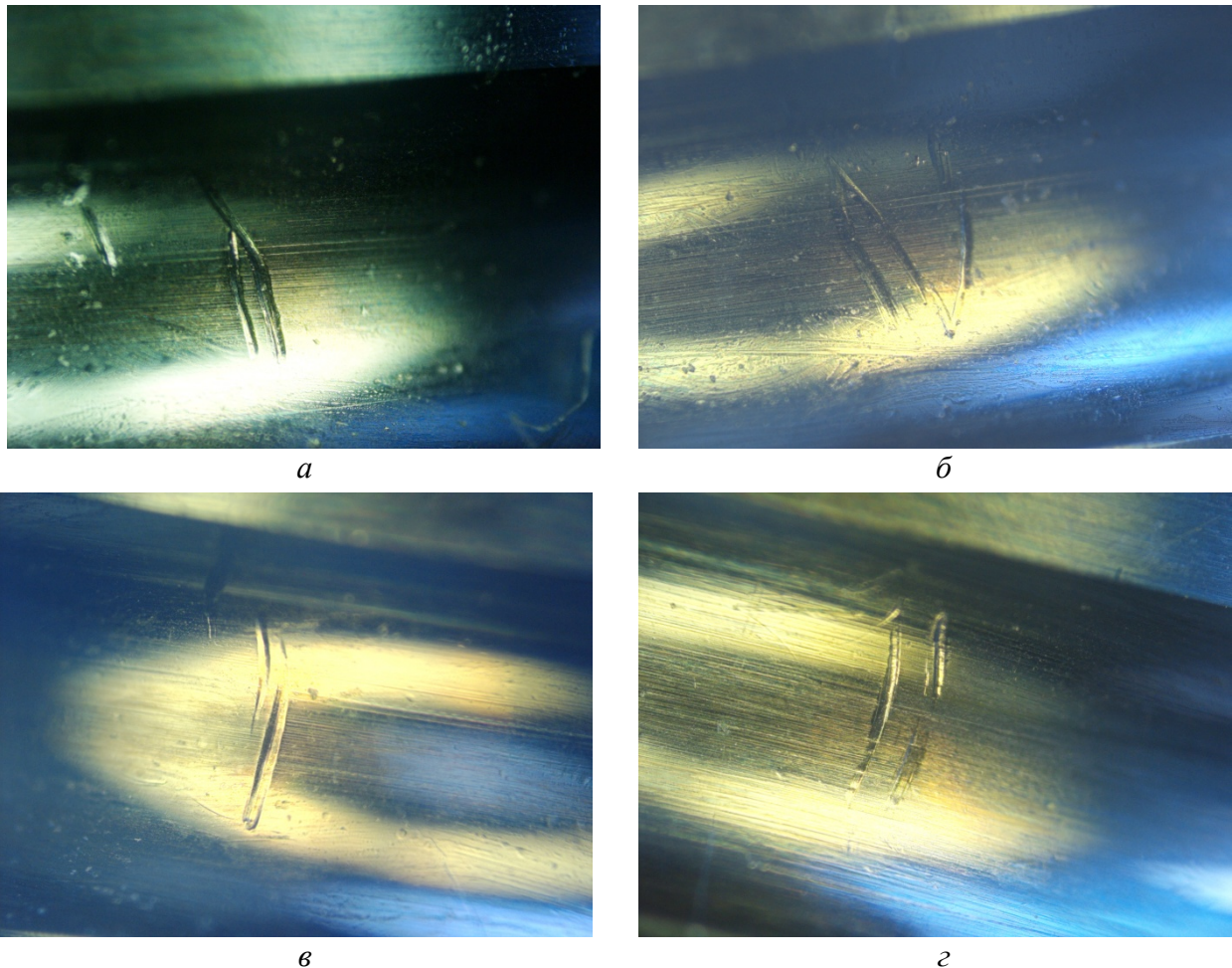
Третий подшипник является контрольным – его время работы равно времени работы первого подшипника. Это необходимо для сравнения сигналов сопротивления, вибрации,

шума двух подшипников и выявления отклонений в исследуемом подшипнике по отношению к контрольному.

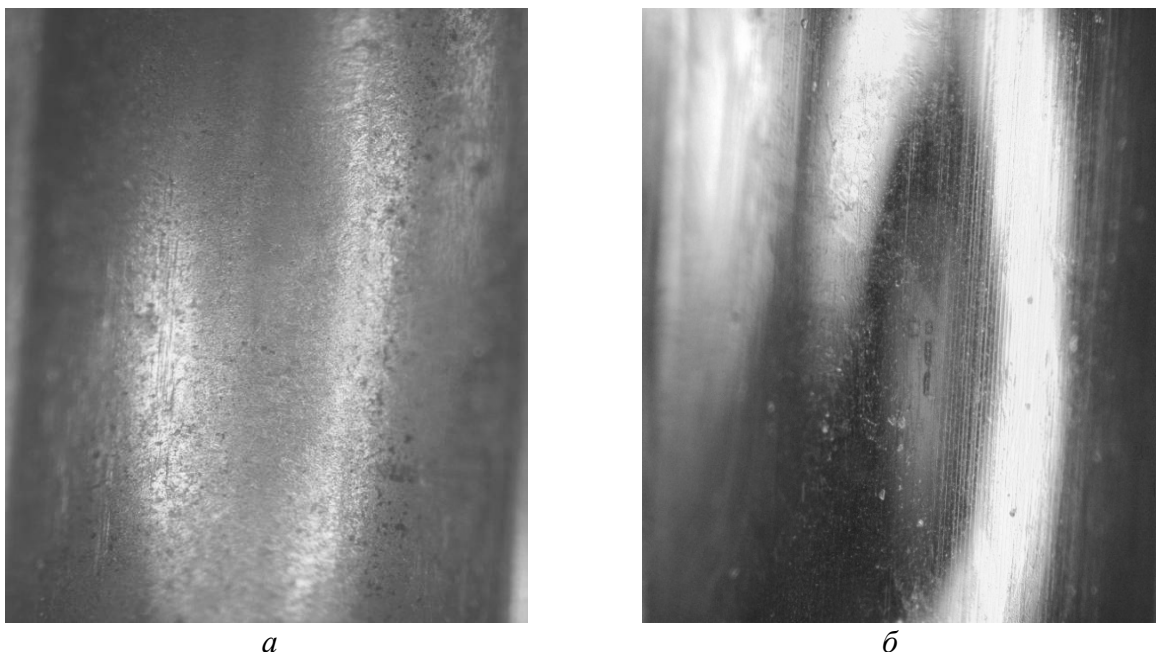
В ходе эксперимента измерялся параметр относительного времени разрушения смазочного слоя (ОВРС). ОВРС – отношение суммарного времени разрушения смазочного слоя, за период измерения, к периоду измерения. Фактом разрушения смазочного слоя считается снижение электрического сопротивления подшипника ниже установленного порога в 100 Ом.

В начале эксперимента, после установки и запуска первого подшипника, проводилась двухканальная запись диагностических сигналов: сопротивление-шум, сопротивление-вибрация. Далее, в течение 15 минут, проводилась запись сигнала ОВРС и заново выполнялась регистрация диагностических сигналов сопротивление-шум, сопротивление-вибрация. После этого подшипник был разобран, нанесены макродефекты. Далее подшипник был собран заново, и процесс записи сигнала повторялся.

Фотографии макродефектов при пятидесятикратном увеличении представлены на рисунке 3. В среднем их ширина составляет 50 мкм, длина – 900 мкм. Фотографии поверхностей второго и контрольного подшипников представлены на рисунке 4.



**Рисунок 3 – Макродефекты**  
*а – первый дефект, б – второй дефект, в – третий дефект, г – четвертый дефект*



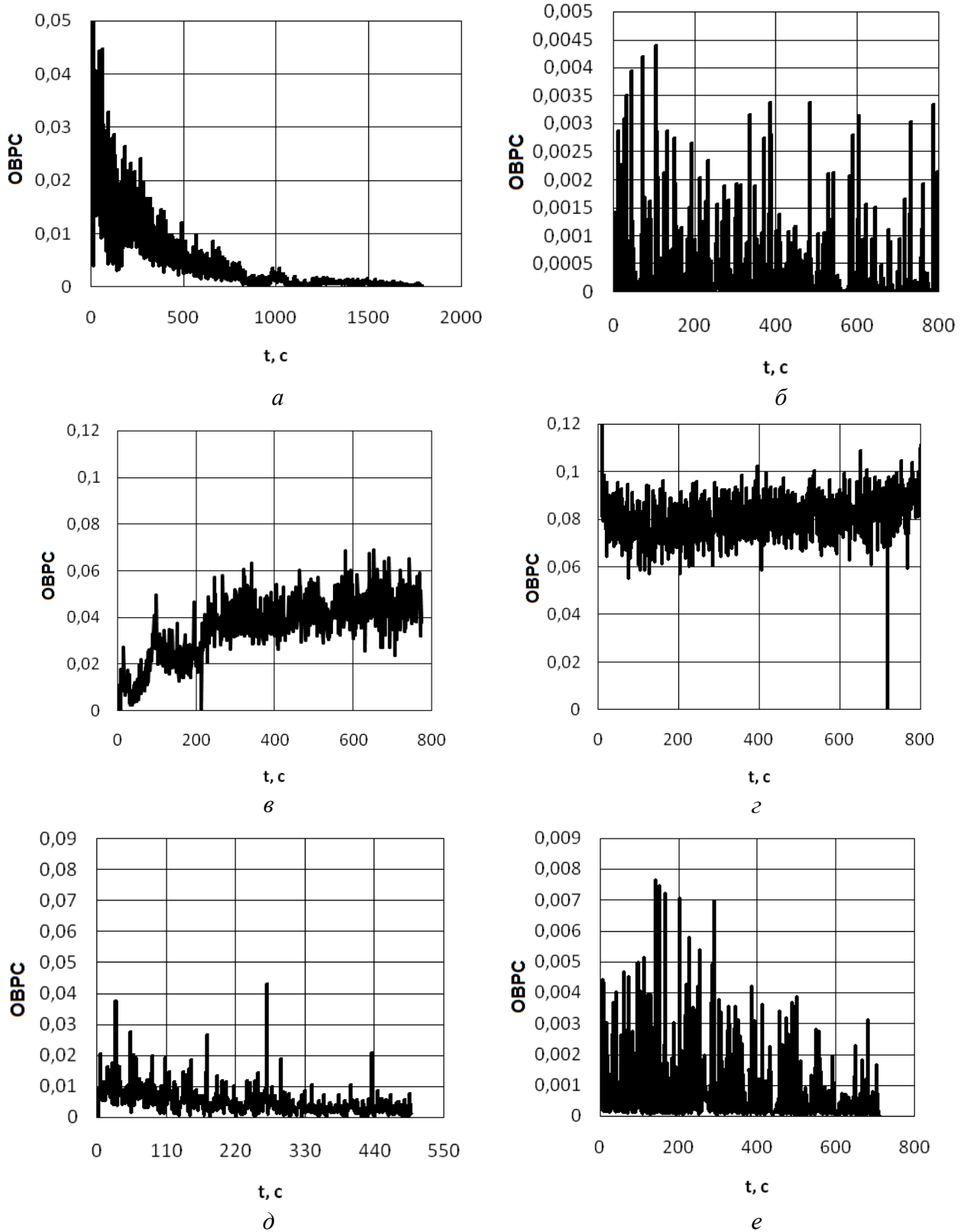
**Рисунок 4 – Поверхность подшипников**  
*а) – с абразивом, б) – контрольный*

Как видно из фотографий, поверхности контрольного подшипника и подшипника с насечками являются почти идентичными, значит, наибольший вклад в разницу сигналов будут вносить макродефекты. Поверхность подшипника с абразивом является сильно зашумленной, микрогеометрия предположительно будет изменять среднее значение уровня шума и его высокочастотные составляющие. На рисунке 5 представлены диаграммы изменения параметра ОВРС, полученные в ходе эксперимента.

Как видно из рисунка 5, диаграммы ОВРС контрольного подшипника и подшипника с насечками в рабочем режиме имеют сходство, основное различие наблюдается в порядке значений (в среднем уровне). Характер изменения значений предположительно говорит о том, что поверхность ещё не до конца приработана и содержит неоднородности. В тоже время, наличие постоянных макронеровностей обеспечивает увеличенное по сравнению с контрольным значение ОВРС у подшипника с макродефектами. Поверхность подшипника, обработанного абразивом, является матовой, что косвенно свидетельствует о высоком уровне шероховатости.

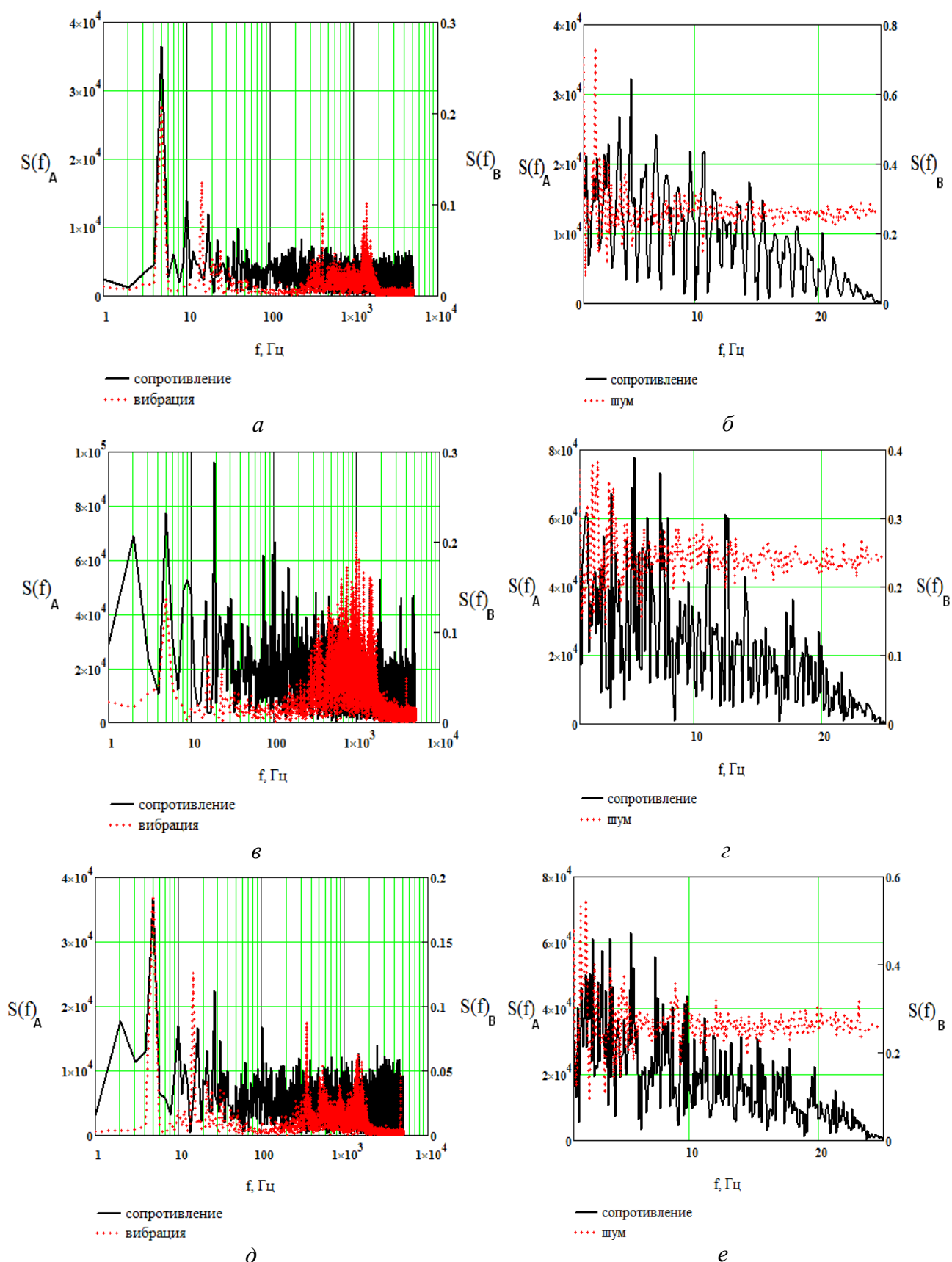
В результате совместного измерения сигналов сопротивления и вибрации, сопротивления и шума были получены сигналы, спектры которых приведены на рисунке 6. Измерения шума проводились с помощью шумомера RM-DT-0602, расположенного вблизи зоны трения. Так же было проведено дополнительное измерение шума с помощью микрофона Genius Mic-01/A, который так же располагался вблизи зоны трения, спектр данного сигнала представлен на рисунке 7. Это было сделано для сравнения результатов двух способов измерения шума. В первом случае сигнал записывался с цифрового выхода шумомера, во втором – сигнал аналоговый поступал в компьютер для оцифровки. В результате сравнения было выявлено, что первый способ обладает меньшим быстродействием, в тоже время недостаток второго способа – необходимость в специализированном программном обеспечении. Так же, шумомер более эффективен в области низких частот, когда использование микрофона – на всем диапазоне частот, воспринимаемых человеком. Полученный результат с помощью микрофона сопоставим с результатами измерения вибрации и сопротивления.

В таблицах 1, 2, 3 приведены статистические параметры полученных сигналов сопротивления, вибрации, шума.



**Рисунок 5 – Графики сигналов ОБРС**

*а – приработка контрольного подшипника, б – рабочий режим контрольного подшипника,  
в – приработка подшипника с абразивом, г – рабочий режим подшипника с абразивом,  
д – приработка подшипника с насечками, е – рабочий режим подшипника с насечками*



**Рисунок 6 – Относительные спектры сигналов сопротивления, вибрации, шума**

*а – спектр сопротивления, вибрации контрольного подшипника, б – спектр сопротивления, шума контрольного подшипника, в – спектр сопротивления, вибрации подшипника с абразивом, г – спектр сопротивления, шума подшипника с абразивом, д – спектр сопротивления, вибрации подшипника с насечками, е) – спектр сопротивления, шума подшипника с насечками*

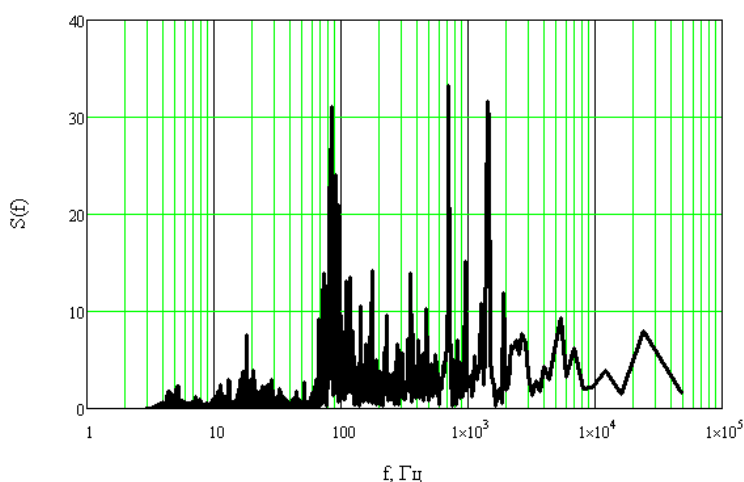


Рисунок 7 – Относительный спектр акустического сигнала

Таблица 1 – Контрольный подшипник

	Совместное измерение сопротивления, шума		Совместное измерение сопротивления, вибрации	
	сопротивление, Ом	шум, дБ	сопротивление, Ом	вибрация, м/с <sup>2</sup>
Среднее арифметическое	36975,7	65,04	49280,4	0,23
Дисперсия	1,6E+10	0,9	2,7E+10	0,4

Таблица 2 – Подшипник с абразивом

	Совместное измерение сопротивления, шума		Совместное измерение сопротивления, вибрации	
	сопротивление, Ом	шум, дБ	сопротивление, Ом	вибрация, м/с <sup>2</sup>
Среднее арифметическое	81108,9	60,2	783087,5	0,03
Дисперсия	9,1E+10	0,23	4,5E+11	3,11

Таблица 3 – Подшипник с насечками

	Совместное измерение сопротивления, шума		Совместное измерение сопротивления, вибрации	
	сопротивление, Ом	шум, дБ	сопротивление, Ом	вибрация, м/с <sup>2</sup>
Среднее арифметическое	148790,6	64,9	101673,8	0,12
Дисперсия	8,17E+10	0,8	5,7E+10	0,4

Проведенные экспериментальные исследования показали принципиальную возможность совместного использования акустического, вибрационного и электрического методов диагностирования подшипников качения. Стоит отметить, что сигнал электрической природы (рисунки 6) имеет более сложный спектральный состав по сравнению с сигналами вибрации и акустического шума. Это обусловлено большой информационной избыточностью электрического сигнала, из-за значительного влияния на него параметров состояния поверхностного слоя, которое в свою очередь определяется большим числом факторов (скоростной режим, температурный режим, микро и макрогеометрия, наличие смазки).

Выявлено, что спектральная картина сигналов сопротивления и вибрации адекватно характеризуют подшипник в области частот, определенных его кинематикой, однако, сигнал сопротивления более информативен в области низких частот (практически от постоянной составляющей) и в областях высоких частот (определяется в зависимости от параметров микрогеометрии контактирующих поверхностей). Сигнал акустического шума, из рассмотренных в работе сигналов, является наименее информативным.

Комплексный подход к диагностированию подшипника качения, основанный на оценке электрического и вибрационных сигналов позволяет более адекватно решать диагностические задачи, акустический сигнал дает необходимую информацию для качественной оценки состояния подшипника в целом (по средней интенсивности и уровню шума). Рас-

смотренное направление комплексирования является перспективным и исследования в этой области необходимо продолжить.

**Мишин Владислав Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

E-mail: vlad89290@gmail.com

**Селихов Алексей Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

**Семёнов Вячеслав Вячеславович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

Ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

**Родькин Евгений Иванович**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862) 41-98-76

**Тулин С.Н.**

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

Магистрант Госуниверситета - УНПК

Тел. (4862) 41-98-76

---

MISHIN V.V., SELIHOV A.V., SEMENOV V.V., ROD’KIN E.I, TULIN S.N.

**RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF PARAMETERS OF  
COMPLEX ASSESSMENT OF BALL BEARING’S TECHNICAL STATE**

*The article is devoted to complex multi-parameter analysis of the technical condition of ball bearings nick using vibration, acoustic and electric methods of diagnosis.*

**Keywords:** ball bearing, electrical resistance, vibration, noise.

**BIBLIOGRAPHY**

**Mishin Vladislav Vladimirovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862) 41-98-76

E-mail: vlad89290@gmail.com

**Selihov Aleksey Vladimirovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862) 41-98-76

**Semenov Vyacheslav Vyacheslavovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Assistant lecturer of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862) 41-98-76

**Rod’kin Evgeniy Ivanovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Phone: (4862) 41-98-76

**Tulin S.N.**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Magistrand State University – Education Science Production Complex

Phone: (4862) 41-98-76



К.С. СЫЧЕВ

## УНИФИКАЦИЯ УСЛОВИЙ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В РЕЖИМЕ ОБРАЩЕННО-ФАЗОВОЙ ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ. Часть 1. ФЛАВОНОЛЫ, ФЛАВОНОЛ-ГЛИКОЗИДЫ, КАТЕХИНЫ, ГИДРОКСИКОРИЧНЫЕ КИСЛОТЫ

*Разработан единый подход к контролю природных органических соединений в растительных экстрактах в режиме обращенно-фазовой жидкостной хроматографии (ОФ ВЭЖХ). Описанный аналитический подход позволяет проводить в условиях изократического элюирования скрининг природных соединений различных классов: флавонолов, катехинов, гидроксикоричных кислот, антоцианинов, алкалоидов – включая не только агликоны соединений, но также их гликозиды и эфиры с полярными органическими кислотами.*

*Ключевые слова:* ВЭЖХ, хроматография, природные соединения, флавоноиды, катехины, гидроксикоричные кислоты, антоцианины, биологически активные добавки, БАД, фармацевтика растений.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие фармацевтической отрасли является одним из приоритетных направлений модернизации производства в России. Фармацевтическое производство включает как выпуск готовых дженериков, так и синтез (или выделение из природных объектов) биологически активных субстанций и их очистку. К фармацевтическому производству также можно причислить производство биологически активных добавок (БАД). Одно из необходимых условий организации успешного фармацевтического производства – обладание современными методами технического контроля на всех стадиях производства. Для тонкой очистки, а также, если речь идет о веществах растительного происхождения, для выделения субстанций все шире применяются адсорбционные технологии, в основном жидкостная хроматография в препаративных и промышленных масштабах. Так, препаративная ВЭЖХ, фактически, вытеснила все остальные методы в области тонкой очистки фармацевтических субстанций, занимающих высокую ценовую нишу [1].

В области технического контроля на фармацевтическом производстве высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) является основным аналитическим методом на протяжении весьма длительного времени, и никакой другой метод пока не может составить ему значительной конкуренции. Отличительная черта метода жидкостной хроматографии состоит в том, что оборудование, предназначенное для реализации этого метода, не может работать «само по себе», а требует наличия определенной технологии, «ноу-хау». В то же время, оптимальные подходы для реализации хроматографических разделений (как в аналитических, так и в производственных целях), как правило, являются интеллектуальной собственностью компаний-производителей – и такая практика является общемировой. Таким образом, реально функционирующие и детально прописанные аналитические подходы не доступны в открытой печати. Максимум, что доступно в литературе – это академические работы достаточно частного характера (то есть несистематические), их обзоры и многочисленные компиляции. Например, различные «сборники методик» (в том числе европейская, американская фармакопей) являются не чем иным, как компиляциями именно академических работ, которые могут не воспроизводиться в конкретных условиях. Нередко наблюдаемая неудовлетворительная воспроизводимость результатов во многом может быть объяснена тем, что авторы методик применяют достаточно экзотические расходные материалы, реагенты, растворители и т.д. Более того, под определенные группы соединений, как правило, создают отдельные эксклюзивные методики; в результате, разработанные условия редко являются универсальными, что увеличивает ресурсоемкость и уменьшает производительность

аналитических подходов. Многие режимы хроматографического разделения, приведенные в открытых источниках, вообще оказываются в принципе нестабильными. Таким образом, основная задача комплексного исследования, включающего данную работу, была сформулирована следующим образом: разработать минимальное число наиболее универсальных хроматографических режимов, позволяющих проводить скрининг биологически активных органических соединений, которые бы обладали высокой стабильностью (robustness), низкой ресурсоемкостью и высокой производительностью.

Более частной задачей, поставленной в данной работе, является разработка подобных хроматографических режимов для разделения и определения ряда групп природных биологически активных соединений, в частности флавонолов и флавонол-гликозидов, катехинов, гидроксикоричных кислот, антоцианинов, гликозидов родиолы, алкалоидов изохилинового ряда.

### ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

При выполнении эксперимента применялся жидкостной хроматограф высокого давления со спектрофотометрическим детектором на УФ область; конфигурация: насос Beckman 110A (Beckman), инжектор 210A (Altex), детектор UVIS-205 (PerSeptive Biosystems) или «Милихром – 6».

Применяемые хроматографические колонки:

- 50×4,6 Reprosil-Pur Basic C18, 1,9 мкм (Maich GmbH, Германия);
- 150×4,6 Reprosil-Pur C18-AQ, 3 мкм (Maich GmbH, Германия);
- 250×4,6 Reprosil-Pur Basic C18, 5 мкм (Maich GmbH, Германия);
- 150×4,6 Halo Amide, 2,7 мкм (Advanced Materials Technology, США).

Для приготовления подвижных фаз применялся ацетонитрил Lesciopharm марки «UV grade 210 nm», дистиллированная вода и фосфорная кислота марки «хч».

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### ФЛАВОНОЛЫ И ФЛАВОНОЛ-ГЛИКОЗИДЫ

Идея унификации хроматографических условий для скринингового контроля биологически активных соединений природного происхождения основана на применении единой подвижной фазы в режиме обращенно-фазовой ВЭЖХ. В качестве базовых рассматривались следующие составы элюирующих смесей [2]:

- ацетонитрил-вода-фосфорная кислота в диапазоне объемных соотношений от 17:83:0,5 до 19:81:0,5 (далее – система 1);
- ацетонитрил-вода-фосфорная кислота в диапазоне объемных соотношений от 10:90:0,5 до 12:88:0,5 (далее – система 2).

Различие в пределах 2 % доли ацетонитрила в рамках каждой из систем обусловлено небольшой коррекцией состава подвижной фазы в целях ее оптимизации под тот или иной типоразмер хроматографических колонок. Как правило, доля ацетонитрила убавлялась при переходе на короткие колонки для экспрессных разделений.

Для хроматографического разделения флавонолов и флавонол-гликозидов применялась система 1. При скрининге данных соединений оптимальный баланс между качеством разделения и временем анализа был достигнут на колонке типоразмера 150×4,6 с адсорбентом зернения 3 мкм (150×4,6 Reprosil-Pur C18-AQ, 3 мкм). В качестве оптимального был выбран состав подвижной фазы ацетонитрил-вода-фосфорная кислота 19:81:0,5.

На рисунке 1 приведена хроматограмма экстракта шелухи лука с идентификацией флавонола кварцетина и его дигликозида рутина. Спектр флавонолов достаточно просто идентифицируется на хроматограмме, поскольку для соединений данной группы поглощение на длине волны 360 нм превосходит поглощение на длине волны 330 нм; спектральные отношения 360/330 флавонолов составляют порядка 1,2-1,3 для гликозидов и около 1,8 для агликонов.

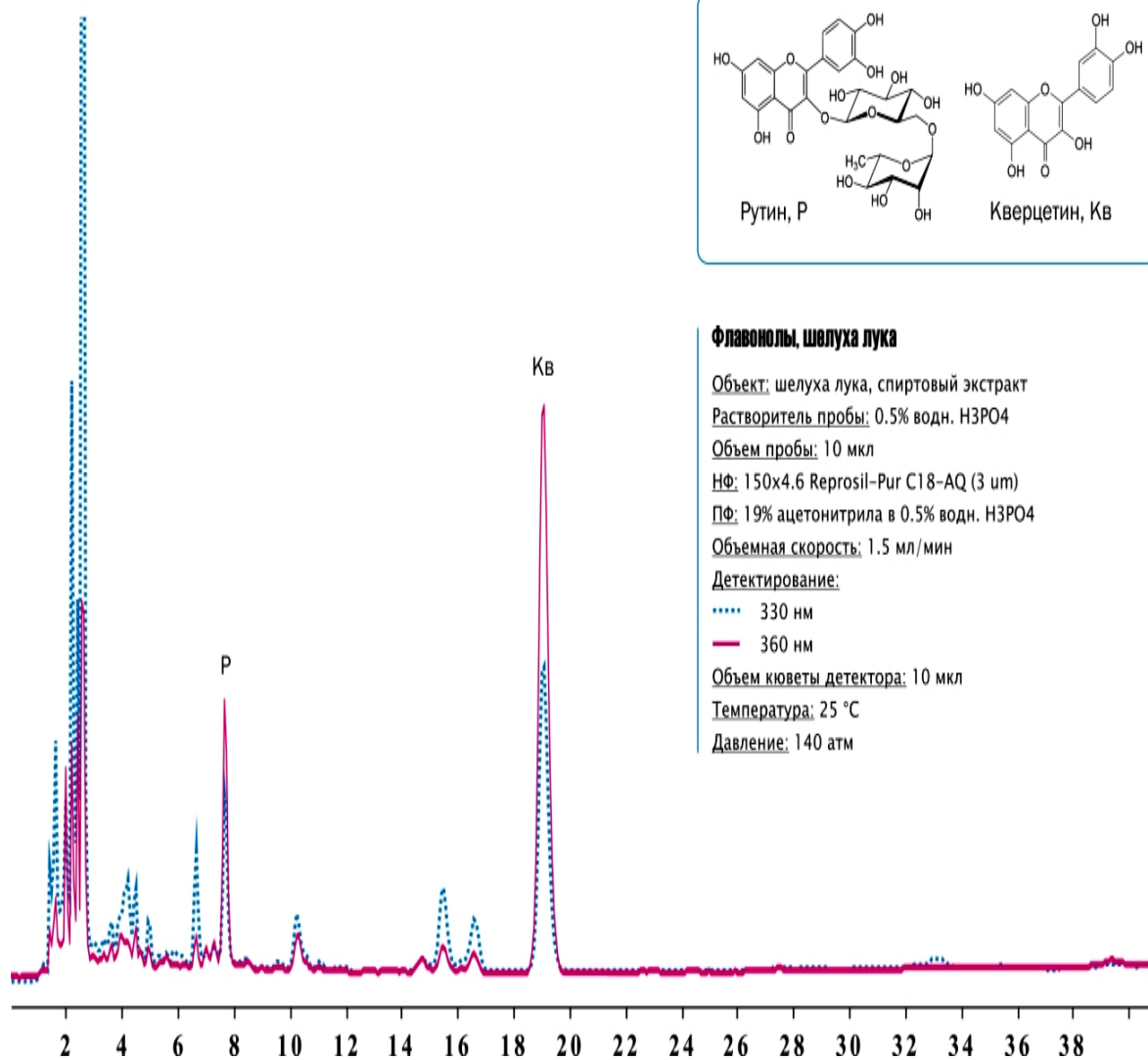


Рисунок 1 – Хроматограмма флавонолов шелухи лука. Условия приведены на рисунке

Флавонол-гликозиды элюируются на участке от 3 до 16 мин. На рисунке 2 приведена наглядная демонстрация регулирования соотношения качества хроматографического разделения и скорости анализа.

Демонстрация проведена на примере разделения группы четырех основных флавонол-гликозидов зверобоя, элюирующихся последовательно с минимальным запасом по разрешению. Так, качество разделения уменьшается при последовательном переходе от колонки 250x4,6 Reprosil-Pur Basic C18, 5 мкм при скорости потока 1 мл/мин к скорости потока 2 мл/мин и затем к колонке 150x4,6 Reprosil-Pur C18-AQ, 3 мкм при скорости потока 1,5 мл/мин; время анализа, соответственно, сокращается от 14 до 7 мин и далее до 4,5 мин.

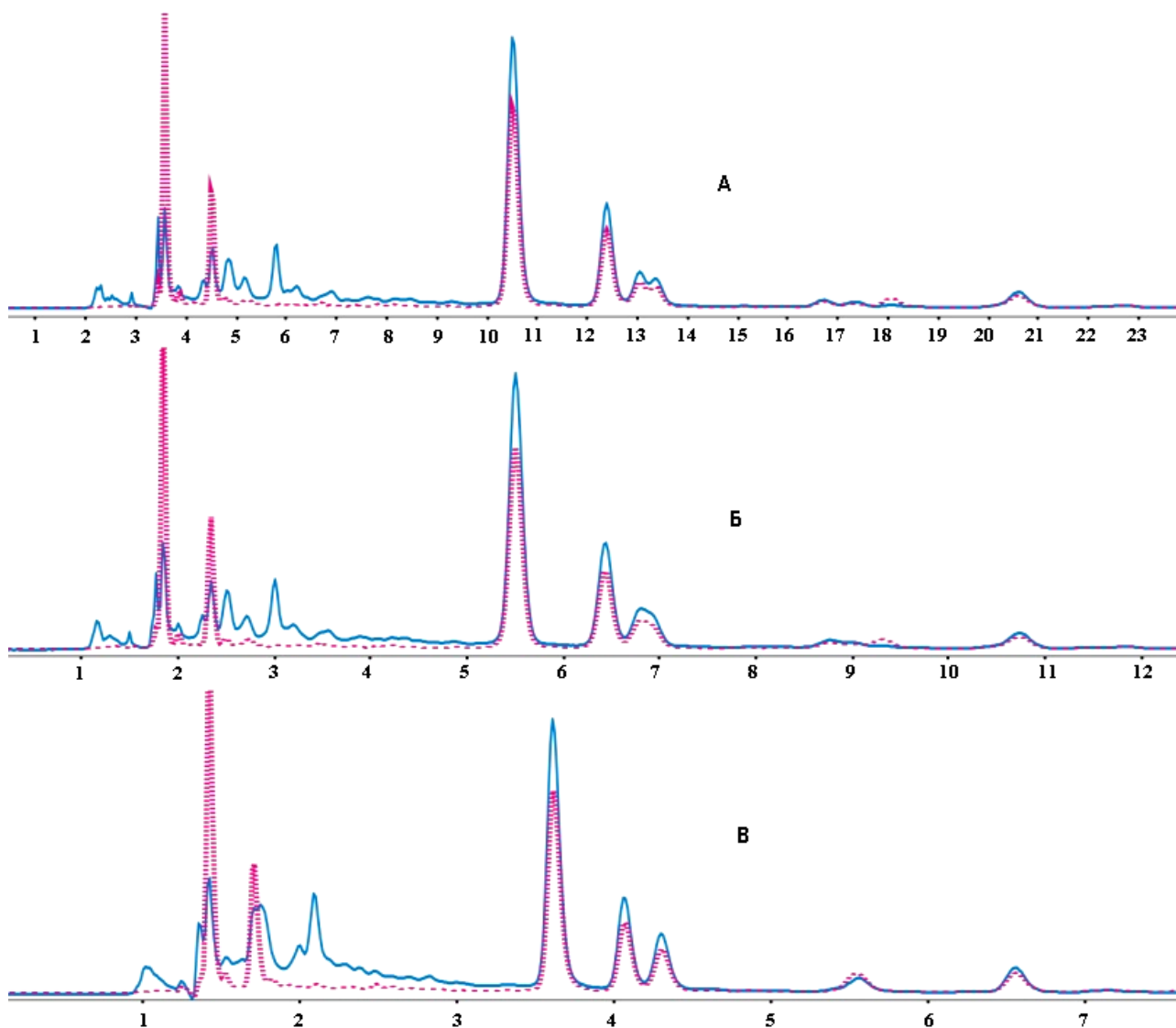
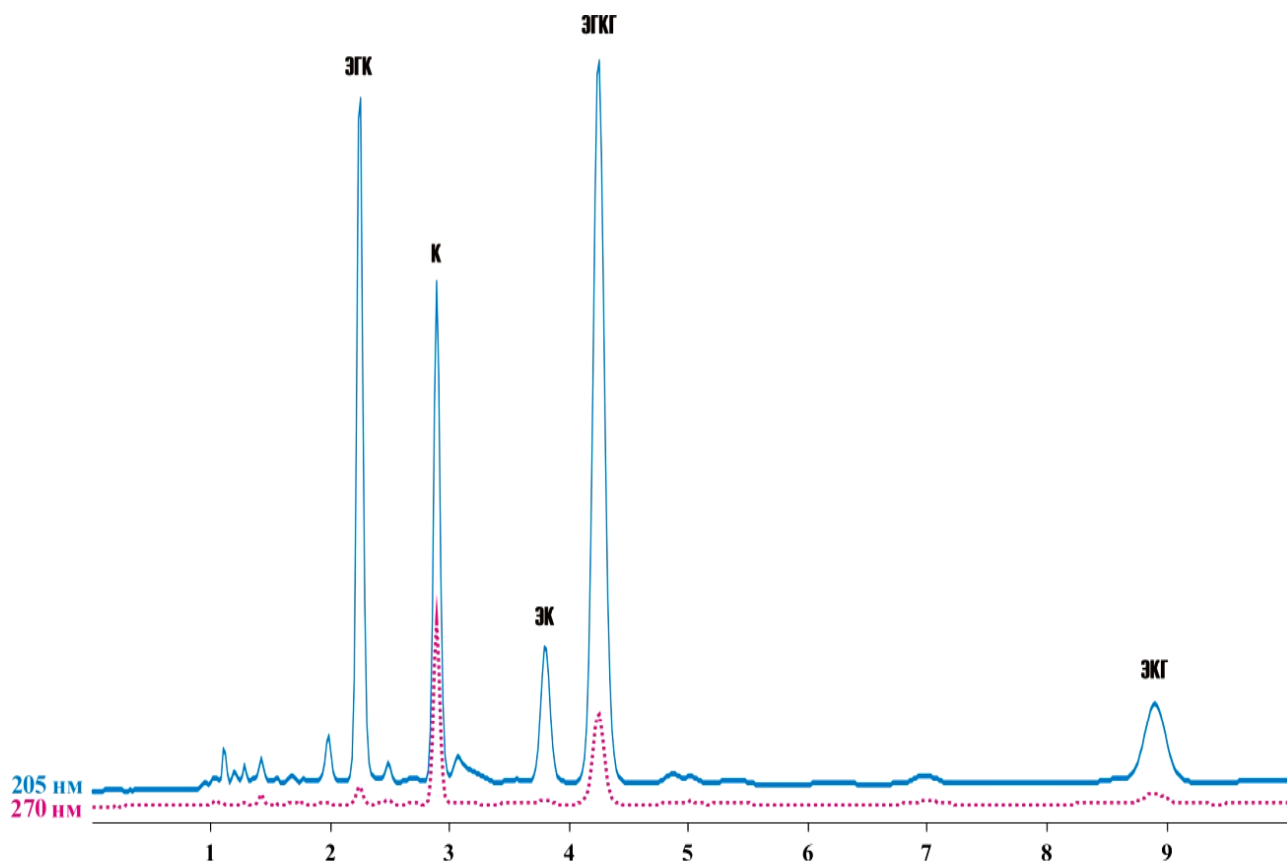


Рисунок 2 – Хроматограмма флавонолов липового цвета.  
 Объемная подача А – 1 мл/мин, Б – 2 мл/мин, В – 1,5 мл/мин

### Катехины

Для хроматографического разделения катехинов применялась система 1. При скрининге данных соединений оптимальный баланс между качеством разделения и временем анализа был достигнут на колонке типоразмера 250×4,6 с адсорбентом зернения 5 мкм (250×4,6 Reprosil-Pur Basic C18, 5 мкм). В качестве оптимального был выбран состав подвижной фазы ацетонитрил-вода-фосфорная кислота 17:83:0,5. На рисунке 3 приведены хроматограммы зеленого чая (SenCha, Япония) с идентификацией катехинов эпигаллокатехина, эпикатехина, эпигаллокатехингаллата и эпикатехингаллата.



### Катехины зеленого чая

Объект: зеленый чай, спиртовой экстракт

Растворитель пробы: подвижная фаза

Объем пробы: 10 мкл

НФ: 250x4.6 Reprosil-Pur Basic C18 (5 μm)

ПФ: 17% ацетонитрила в 0.5% водн. НЗРО4

Объемная скорость: 2 мл/мин

Детектирование:

— 205 нм

..... 270 нм

Объем кюветы детектора: 10 мкл

Температура: 25 °С

Давление: 130 атм

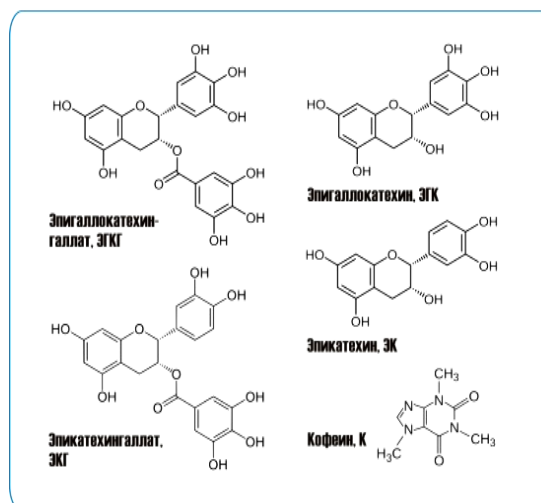


Рисунок 3 – Хроматограмма катехинов зеленого чая (*SenCha*, Япония). Условия приведены на рисунке

### Гидроксикоричные кислоты

Для хроматографического разделения гидроксикоричных кислот применялись обе системы 1 и 2. Система 1 применялась для экспрессных разделений. В том случае, когда требовалось лучшее качество разделения, применялась система 2. При скрининге гидроксикоричных (рис. 4) кислот оптимальный баланс между качеством разделения и временем анализа был достигнут на колонке типоразмера 50×4,6 с адсорбентом зернения 1,9 мкм (50×4,6 Reprosil-Pur Basic C18, 1,9 мкм). В качестве дополнительной также применялась колонка 150×4,6 Halo Amide, 2,7 мкм с C16-амидной неподвижной фазой, демонстрировавшая нетипичную (по сравнению с C18 фазами) селективность разделения. На рисунке 4 приведено сравнение профилей гидроксикоричных кислот в различных объектах (кофе, красное вино, экстракт эхинацеи пурпурной) в условиях применения системы 1. На хроматограммах идентифицированы три изомера хлорогеновой кислоты и кафтаровая кислота (рис. 5).

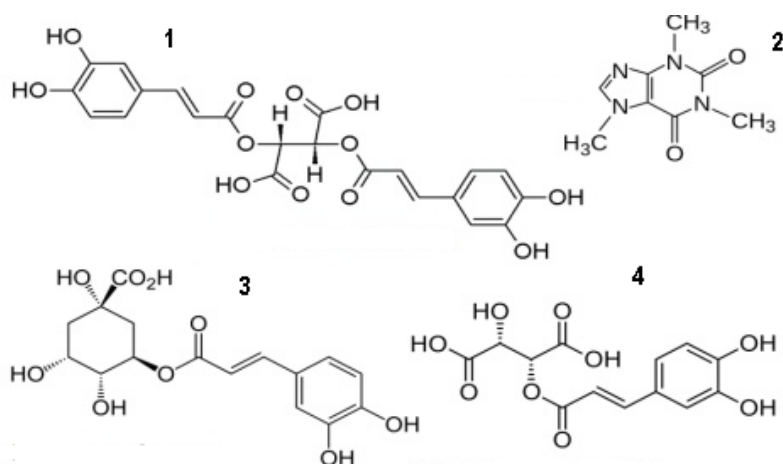


Рисунок 4 – Структурные формулы гидроксикоричных кислот

1 – дикофеилвинная(цикориевая, Ц), 2 – кофеин К, 3 – 3-кофеилхинная(хлорогеновая, 3-КХ),  
4 – кофеилхинная (кафтаровая, КФ)

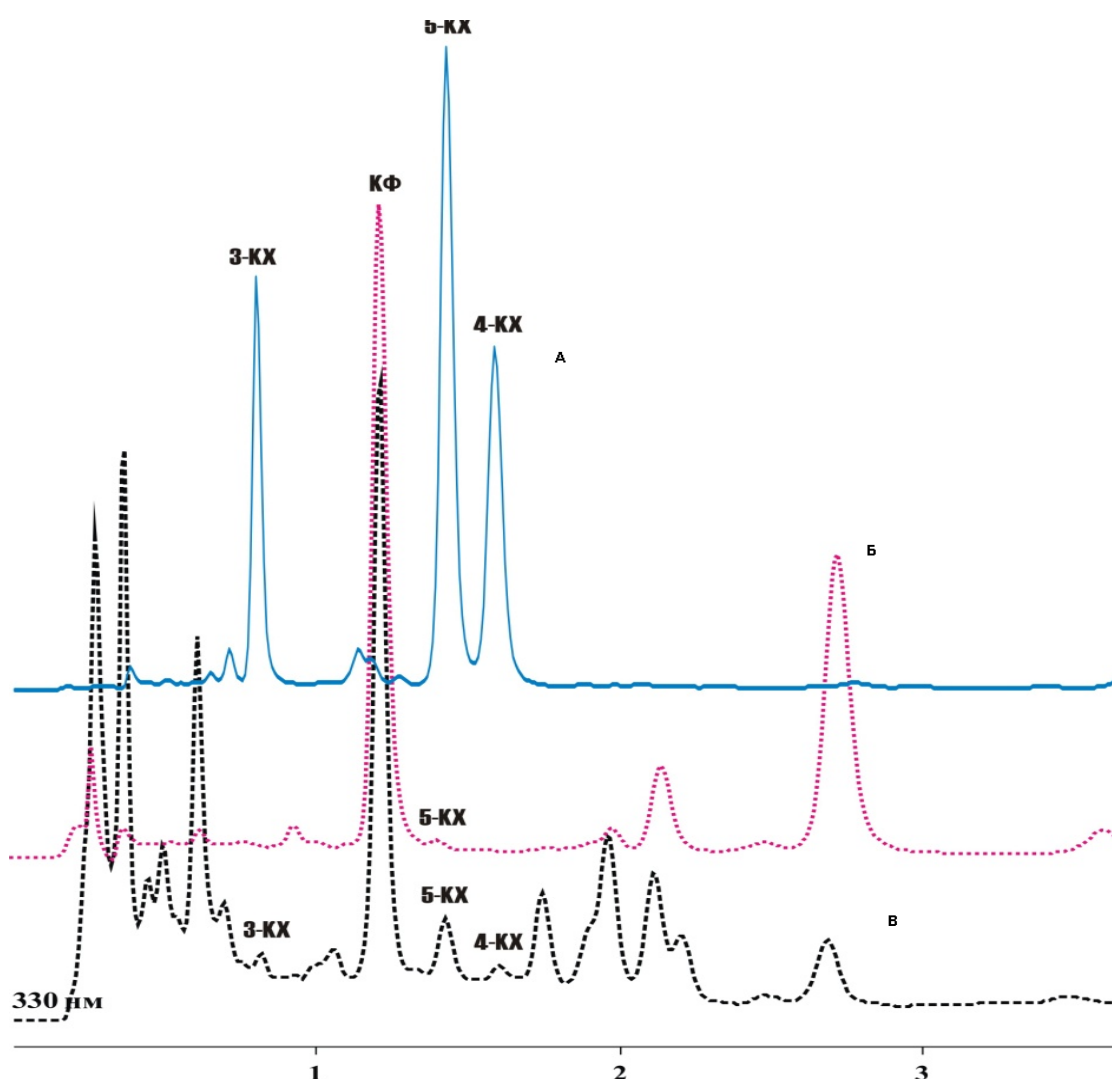


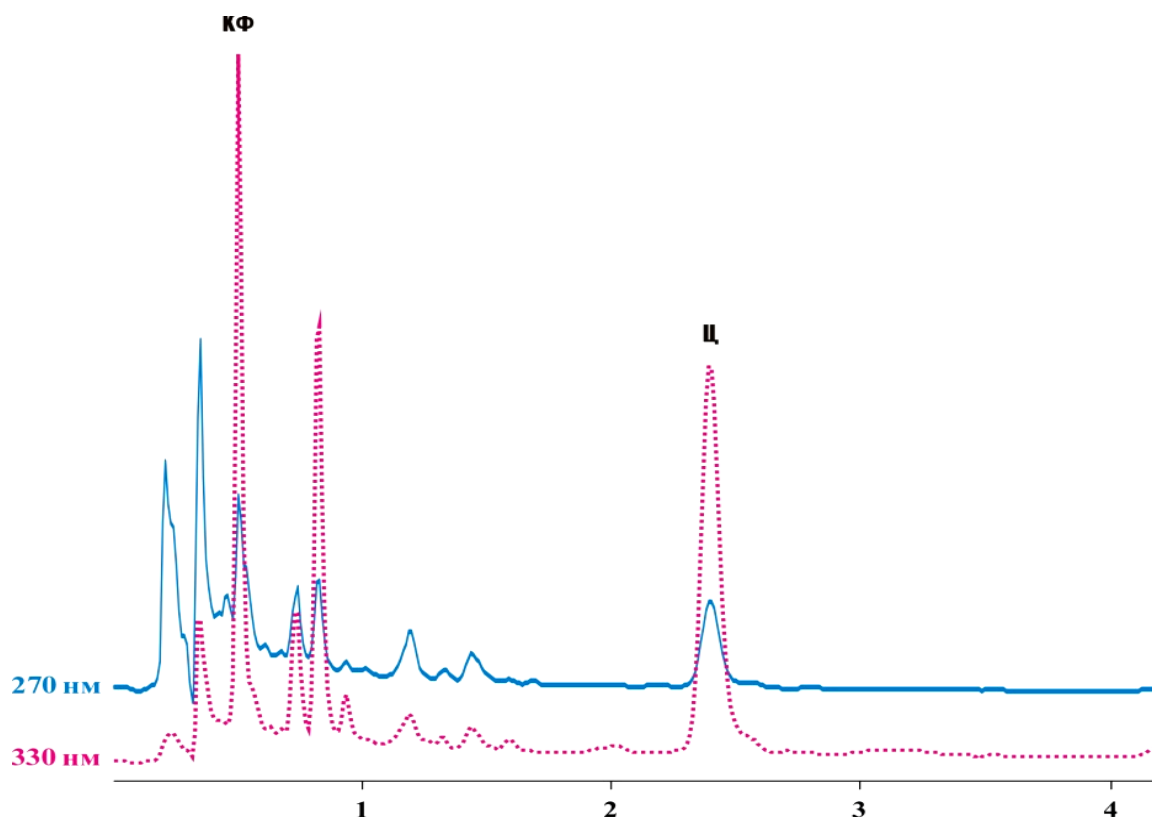
Рисунок 5 – Сравнение профилей гидроксикоричных кислот в различных объектах

А – кофе, Б – красное вино, В – экстракт эхинацеи пурпурной.

Идентифицированы три изомера хлорогеновой кислоты и кафтаровая кислота. Условия приведены на рисунке

Пики кафтаровой и цикориевой кислот являются удобными реперными точками при проведении определений гидроксикоричных кислот в природных объектах, поскольку большинство гидроксикоричных кислот-агликонов (например, кофейная кислота, феруловая кислота)

лота) элюируются между ними. Спектр гидроксикоричных кислот достаточно просто идентифицируется на хроматограмме, поскольку для соединений данной группы поглощение на длине волны 330 нм значительно превосходит поглощение на длине волны 270 нм (неселективной длине волны для всех полифенольных соединений). Спектральные отношения 330/270 гидроксикоричных кислот – эфиров кофейной кислоты (хлорогеновые кислоты, кафтаровая, цикориевая кислота) – находятся в пределах 3,5-4,5. На рисунке 6 приведена хроматограмма гидроксикоричных кислот эхинацеи пурпурной в варианте экспрессного определения с идентификацией кафтаровой и цикориевой кислот.



*Рисунок 6 – Хроматограмма гидроксикоричных кислот эхинацеи пурпурной (вариант экспрессного определения). Условия приведены на рисунке*

## **ВЫВОДЫ**

Разработан единый подход к определению природных органических соединений в растительных экстрактах в режиме обращенно-фазовой жидкостной хроматографии (ОФ ВЭЖХ). Описанный аналитический подход позволяет проводить в условиях изократического элюирования скрининг природных соединений различных классов: флавонолов, катехинов, гидроксикоричных кислот.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сычев, К.С. Практическое руководство по жидкостной хроматографии [Текст] / К.С. Сычев. – М. : Техносфера, 2011. – 272 с.
2. Сычев, С.Н. Высокоэффективная жидкостная хроматография [Текст] : учеб. пособие для ВУЗов / С.Н. Сычев. – Орел : ОрелГТУ, 2010. – 190 с.

**Сычев Константин Сергеевич**

Госуниверситет - УНПК, г. Орел

Канд. хим. наук, инженер лаборатории ВЭЖХ Госуниверситета - УНПК

Тел.: +7(961)625-7822

E-mail: kssychev@gmail.com

K.S. SYCHOV

## UNIFYING THE CONDITION FOR LIQUID CHROMATOGRAPHIC SEPARATION AND SCREENING CONTROL OF NATURAL ORGANIC COMPOUNDS IN RP MODE

*An integrated approach for RP-HPLC screening control of natural compounds in plant extracts has been developed that involves two simple isocratic systems. The approach is suitable for screening such compounds as flavonols, catechins, hydroxycinnamic acids, anthocyanins, alkaloids.*

**Keywords:** *HPLC, chromatography, natural compounds, flavonoids, catechins, hydroxycinnamic acids, anthocyanins, food additives, farmaceutics.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Sychev, K.S. Prakticheskoe rukovodstvo po zhidkostnoj hromatografii [Tekst] / K.S. Sychev. – M. : Tehnosfera, 2011. – 272 s.
2. Sychev, S.N. Vysokojeffektivnaja zhidkostnaja hromatografija [Tekst] : ucheb. posobie dlja VUZov / S.N. Sychev. – Orel : OrelGTU, 2010. – 190 s.

#### **Sychov Konstantin Sergeevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

PhD, en engineer

Tel.: +7(961)625-7822

E-mail: kssychev@gmail.com



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ РАБОЧЕЙ АРМАТУРЫ ПРИ КОНТРОЛЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК СТАТИЧЕСКИМ И ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

*В статье рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению площади поперечного сечения продольной рабочей арматуры в железобетонных балках с использованием статического и динамического методов. Установлено, что площадь рабочей арматуры функционально связана с максимальным прогибом и основной (или первой резонансной) частотой колебаний балок, поэтому максимальный прогиб и основная частота колебаний могут использоваться в качестве критериев для оценки площади арматуры.*

**Ключевые слова:** железобетонная балка, рабочая продольная арматура, площадь поперечного сечения, статические и динамические испытания, основная частота колебаний.

Железобетонные конструкции являются наиболее распространенными в современном строительстве, поэтому проблема разработки новых и совершенствования существующих методов диагностики и контроля качества таких конструкций является актуальной. В нашей стране в настоящее время существует система выборочного контроля качества железобетонных конструкций балочного типа, регламентируемая ГОСТ 8829-94 [1], когда из конструкций определенной партии выбираются для контроля лишь несколько изделий, которые испытывают методом статического нагружения до разрушения, при этом полученные результаты распространяются на всю партию. Такой метод контроля экономически неэффективен и не обеспечивает достоверности результатов контроля.

Более выгодны неразрушающие методы контроля качества конструкций, в частности вибрационные. Однако в нашей стране они до сих пор не получили должного распространения. Для определения диаметра рабочей арматуры используются ультразвуковые и магнитоэлектрические методы. Они дают весьма приближенную оценку этого параметра [2]. Вибрационный же метод для этих целей не использовался.

В основу вибрационного способа определения площади рабочей арматуры в железобетонных балках положена закономерность, установленная профессором В.И. Коробко, согласно которой произведение максимального прогиба упругой однопролетной балки постоянного сечения  $w_0$  с произвольными граничными условиями, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой  $q$ , на квадрат ее основной (или первой резонансной) частоты колебаний  $\omega$  с точностью до размерного коэффициента  $q/m$  ( $m$  – погонная масса балки) есть величина постоянная, равная  $\approx 4/\pi$ :

$$w_0 \omega^2 \approx 4/\pi \cdot q/m. \quad (1)$$

Максимальный прогиб железобетонной шарнирно опертой по концам балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой  $q$ , находится по формуле

$$w_0 = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{B}, \quad (2)$$

где  $B = 0,85E_b I_{red}$ . Здесь и далее использованы общепринятые обозначения в теории железобетонных конструкций. Подставляя выражение (2) в закономерность (1), получим:

$$\frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{0,85E_b (I_b + \alpha_s A_s y_s^2)} \omega^2 = \frac{4}{\pi} \frac{q}{m}. \quad (3)$$

Выразив из этой формулы площадь поперечного сечения рабочей арматуры, найдем:

$$A_s = \frac{1}{\alpha_s y_s^2} \left( \frac{l^4 \omega^2 m}{83,12 E_b} - I_b \right). \quad (4)$$

Выражение (4) связывает функционально площадь арматуры с основной частотой колебаний балки в ненагруженном состоянии. Зная остальные геометрические и физические характеристики балки, входящие в формулу (4), можно по этой частоте, определенной экспериментально, найти площадь сечения арматуры, то есть выражение (4) можно использовать в качестве математической модели в экспериментальном способе определения площади сечения рабочей арматуры.

Для оценки чувствительности параметра  $A_s$  к основной частоте колебаний балки была проведена серия экспериментов. Были изготовлены 6 типов железобетонных перемычек (по две одинаковых, всего 12 штук) со следующими геометрическими характеристиками:  $l = 2590$  мм,  $b = 120$  мм,  $h = 140$  мм; погонная масса перемычек  $m \approx 109$  кг; бетон класса  $B 15$ ; арматура класса  $A400$  шести диаметров ( $d_s = 8, 10, 12, 14, 16$  и  $18$  мм).

Схема экспериментального стенда, на котором проводились статические и динамические испытания перемычек, приведена на рисунке 1.

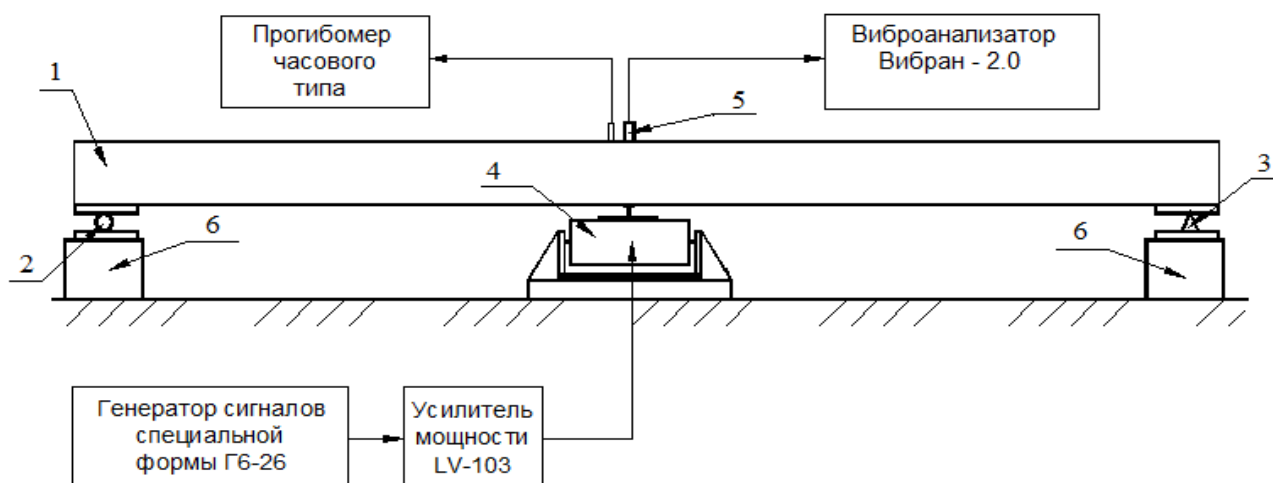


Рисунок 1 – Функциональная схема испытательного стенда

1 – контролируемая балка; 2, 3 – подвижная и неподвижная шарнирные опоры;  
4 – ударное устройство – возбудитель собственных поперечных колебаний;  
5 – виброанализатор спектра колебаний «Вибран-2»; 6 – силовые опоры

В балке 1, установленной на стенде и закреплённой на опорах 2 и 3, с помощью ударного устройства 4 возбуждались поперечные механические колебания, анализ которых осуществлялся с помощью виброанализатора 5, и определялась основная частота колебаний. В каждой балке колебания возбуждались не менее 10 раз с различной силой удара и небольшим смещением ударного устройства относительно центра балки. Экспериментальные данные после проведения статистической обработки результатов измерений приведены в таблице, и по этим данным построен график зависимости  $d_s - \omega_{\text{поп}}$  (рис. 2): верхняя прямая построена по теоретической формуле (4); нижняя прямая является функцией, аппроксимирующей экспериментальные результаты, уравнение которой представляется выражением:

$$d_s = 22,797 + 0,427\omega. \quad (5)$$

Анализ зависимостей  $d_s - \omega_{\text{поп}}$  показывает:

- эксперименты подтвердили наличие функциональной связи между площадью (диаметром) рабочей арматуры и основной частотой колебаний балки;
- чувствительность основной частоты колебаний балки к изменению диаметра рабочей арматуры невысокая (при изменении диаметра арматуры от 8 до 12 мм частота колебаний изменяется всего на 4 Гц, что составляет всего 16-18 % от измеряемой частоты);
- с ростом диаметра арматуры экспериментальная прямая монотонно приближается к теоретической; при малых диаметрах арматуры отклонения оказываются достаточно высокими.

Таблица 1 – Результаты измерения основной частоты колебаний балок, отклонения экспериментальной частоты от теоретической

Диаметр арматуры и класс бетона	$d_s = 8$ мм B 15	$d_s = 10$ мм B 15	$d_s = 12$ мм B 15	$d_s = 14$ мм B 15	$d_s = 16$ мм B 15	$d_s = 18$ мм B 15
$f_{\text{поп(эксп), Гц}}$	26,2	26,5	29	28,1	30,1	30,2
$f_{\text{поп(теор), Гц}}$	29,05	29,36	29,74	30,13	30,55	30,97
Отклонение, %	9,81	9,74	2,49	6,74	1,47	2,49

Последний физический эффект, очевидно, можно объяснить преобладанием упруго-пластических свойств бетона над упругими свойствами рабочей арматуры. С ростом диаметра арматуры это различие уменьшается, и экспериментальные данные приближаются к теоретическим.

Из-за низкой чувствительности частоты колебаний к изменению площади поперечного сечения точность разрабатываемого вибрационного метода определения площади рабочей арматуры при малых процентах армирования может оказаться не высокой. Очевидно, вибрационный метод будет полезен при высоких процентах армирования бетона.

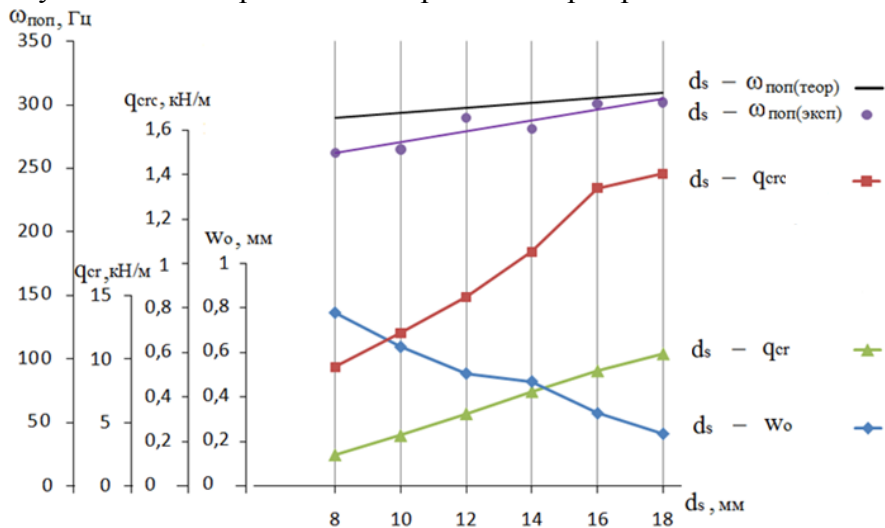


Рисунок 2 – Функциональные зависимости физических параметров железобетонных балок с диаметром (площадью) рабочей арматуры

При проведении динамических испытаний параллельно был осуществлён весь требуемый по ГОСТ [1] комплекс контроля жесткости  $w_0$ , трещиностойкости  $q_{кр}$  и прочности  $q_{cr}$  изготовленных балок и выявлены функциональные связи между этими параметрами и диаметром арматуры. Эти экспериментальные зависимости, представленные на рисунке 2, как и следовало ожидать, близки к линейным. На рисунке вертикальный масштаб у рассматриваемых функций разный; это сделано для удобства графического представления результатов эксперимента.

**ВЫВОДЫ**

1 Проведенные эксперименты убедительно подтвердили наличие функциональной связи между площадью рабочей арматуры в железобетонных ненапряженных балках с их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии. Однако чувствительность этого динамического критерия к изменению диаметра рабочей арматуры при малых процентах армирования балок невысокая. В железобетонных балках при высоком проценте армирования этот физический эффект может лечь в основу разработки вибрационного метода диагностики железобетонных балок, находящихся в условиях эксплуатации.

2 Выявлены функциональные зависимости между параметрами жесткости, трещиностойкости и прочности железобетонных балок и диаметром рабочей арматуры. При этом, несмотря на различные условия работы конструкций при контроле отдельных ее параметров, функциональные зависимости получились практически линейными. Эти зависимости приводят к идее разработки теоретического аппарата для приближенного определения жесткости, трещиностойкости и прочности железобетонных балок по площади рабочей арматуры.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 8829-94. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Методы испытания нагружением и оценка прочности, жёсткости и трещиностойкости [Текст]. – Взамен ГОСТ 8829-85 ; Введ. 1998.01.01. – М. : Изд-во стандартов, 1994. – 26 с. – (Государственный стандарт СССР).
2. Коробко, В.И. Контроль качества строительных конструкций: Виброакустические технологии [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Коробко – М. : Издательство АСВ, 2003. – 288 с.

**Абашин Евгений Геннадьевич**

Центр ЭПБ ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

Инженер

Тел.: +7 (4862) 76-03-72

E-mail: oantc@ostu.ru

---

E.G. ABASHIN

### **DEFINITION OF CROSS-SECTION AREA OF PRINCIPAL REINFORCEMENT BARS AT THE CONTROL OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BY THE STATIC AND DYNAMIC METHODS**

*The article examines the results of theoretical and experimental investigations for evaluation of cross-section area of longitudinal reinforcement bar in reinforced concrete beams by the static and dynamic tests. By the investigations results is proved that cross-section area of longitudinal reinforcement bar in reinforced concrete beam is functionally connected with the main frequency oscillations and the maximum deflection of the beam, therefore the maximum deflection and the main frequency of vibration can be used as criteria to assess the area of cross-section area of longitudinal reinforcement bar.*

**Key words:** reinforced concrete beams, longitudinal reinforcement bar, cross-section area, concrete elasticity module, static and dynamic tests, the main frequency of vibrations.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. GOST 8829-94. Konstrukcii i izdeliya betonnye i zhelezobetonnye sbornye. Metody ispytaniya nagru-zheniem i ocenka prochnosti, zhyostkosti i treshchinostonkosti [Tekst]. – Vzamen GOST 8829-85 ; Vved. 1998.01.01. – М. : Izd-vo standartov, 1994. – 26 s. – (Gosudarstvennyy standart SSSR).
2. Korobko, V. I. Kontrol kachestva stroitelnykh konstrukciy: Vibroakusticheskie tekhnologii [Tekst] / V. I. Korobko, A. V. Korobko. – М. : Izd-vo ASV, 2003. – 288 s.

**Abashin Evgeniy Gennad'evich**

Center of industrial safety state university – education-science-production complex, Orel

Engineer

Ph.: +7 (4862) 76-03-72

E-mail: oantc@ostu.ru

Т.П. БЕЛЯЕВА, В.К. ЗОЛЬНИКОВ

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТНЫМИ РИСКАМИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ НА ЭТАПЕ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ

*Эффективное управление проектами по созданию современной ЭКБ невозможно без определения возможности возникновения рисков и степени их воздействия на проект. Эта задача решается на этапах идентификации рисков, их качественной и количественной оценки в процессе управления проектными рисками.*

**Ключевые слова:** управление рисками, планирование проекта, микроэлектроника, алгоритм оценки степени риска.

Эффективное управление проектами невозможно без оценки возможности возникновения риска. Риски невыполнения срока реализации, превышения бюджета проекта, отклонения планируемого содержания и качества результата проекта от фактического сегодня характерны для большинства научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), относящихся к планированию и реализации проектов микроэлектроники. Это связано с отсутствием методики оценки и управления рисками в данной области.

Управление рисками должно носить систематический характер снижения неопределенности и управления вероятностью возникновения событий на всех этапах жизненного цикла проекта (рис. 1).

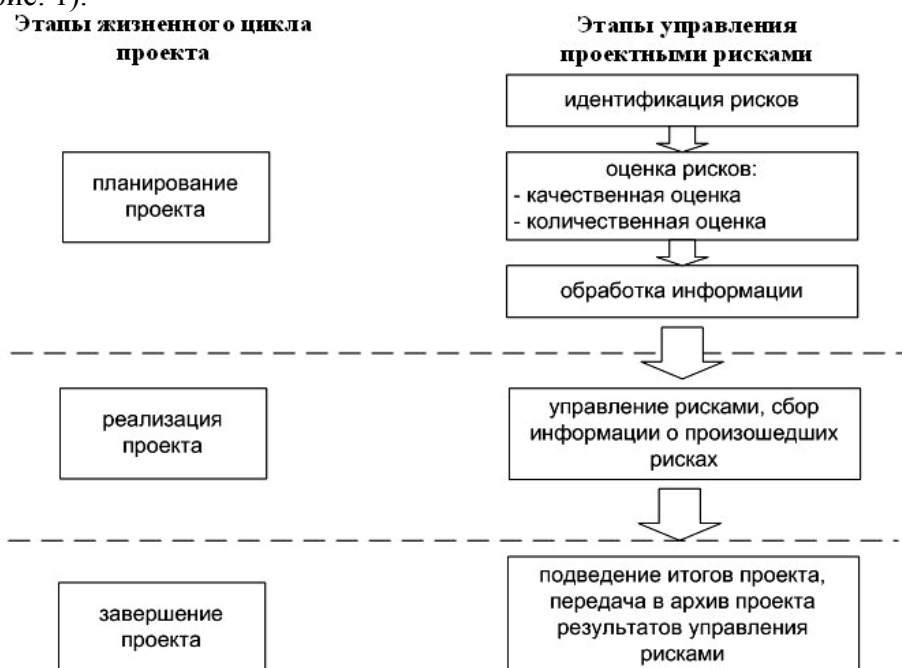


Рисунок 1 – Зависимость управления рисками от этапа жизненного цикла проекта

В данной работе рассмотрим только ступени управления, относящиеся к первому этапу жизненного цикла проекта – планирование проекта. С нашей точки зрения, этот этап является наиболее важным, так как на этой стадии происходит постановка цели и задач проекта, закладываются основные характеристики (входные данные, инструменты и методы, временной промежуток, ожидаемый результат).

Идентификация рисков предусматривает определение рисков, способных повлиять на проект, и документальное оформление его характеристик, проводится на этапе планирования и по мере развития проекта. Для идентификации рисков проводят анализ:

– внешней информации по аналогичным проектам из открытых источников (НИОКР, базы данных коммерческих предприятий);

- внутренней информации о выполнении предыдущих проектов (архив результатов управления рисками);
- проектной документации, в которой зачастую присутствуют неопределенность и допущения.

Методы сбора информации [1]: Мозговой штурм, метод Дельфи, опросы, идентификация основной причины, анализ сильных и слабых сторон, возможностей и угроз (анализ SWOT).

По окончании процесса идентификации рисков получаем описание и причины возникновения идентифицированных рисков. При проведении идентификации рисков по отдельным проектам микроэлектроники необходимо руководствоваться систематикой таких проектов, основанной на их тематической направленности:

1. Работы, направленные на эффективное управление проектами ЭКБ.

Эффективное управление проектами ЭКБ связано с выбором приоритетов развития технологии, технических средств, материалов, способных обеспечить высокую радиационную стойкость и надежность разрабатываемой ЭКБ для современных проектных норм.

Реализация данного вида работ сталкивается с неопределенностями, вызванными сложностями принятия решений по проекту и недостаточной информированностью о существующих решениях в области обеспечения радиационной стойкости, надежности и качества ЭКБ. Наступление риска приведет не только к срыву и изменению срока реализации отдельного проекта, но и негативно скажется на работах других направлений.

2. Работы, создающие научный фундаментальный задел и осуществляющие поиск прикладного применения.

При реализации данных работ возникают неопределенности, связанные с выбором направления исследований; обеспечением проекта высококвалифицированными специалистами, необходимым оборудованием и материалами, отвечающими современным требованиям. Риск получения отрицательного научного результата, обусловленный представленным набором неопределенностей по одному из проектов, не влияет на выполнение работ в других направлениях, однако расходование ресурсов (материальных, трудовых, финансовых, временных), которые могли быть использованы в других работах, является негативным фактором.

3. Работы, реализуемые с целью создания технологии разработки новой ЭКБ и технических средств, обеспечивающих ее.

В процессе реализации таких работ возникают неопределенности, связанные с выбором структуры, основных составляющих и характеристик технологических операций разработки ЭКБ и сложностями создания технологического оборудования. Следствием прекращения, увеличения сроков исполнения или выхода из бюджета отдельных проектов явится невозможность серийного освоения новой ЭКБ или сдвиг срока начала освоения на более поздний срок, что приведет к прямым финансовым потерям и негативно скажется на реализации проектов разработки и модернизации вооружений и военной техники (ВВТ).

4. Работы, направленные на разработку новых и модернизацию существующих видов ВВТ.

Реализация таких работ осуществляется посредством создания новой, модернизации существующей или копирования иностранной ЭКБ, что вызывает неопределенности, связанные с: разработкой конструкции изделия с заданными тактико-техническими характеристиками (ТТХ); подбором технологии, оборудования и материала, способных обеспечить заданные параметры.

Срыв или отклонение проекта от заданных параметров не повлияют на работы в других направлениях, но могут привести к нарушению обеспечения современными ВВТ и создать потенциальную угрозу обороноспособности государства.

Следующий этап после идентификации рисков – оценка рисков, включающая, оценку как качественных, так и количественных показателей рисков.

**Качественная оценка рисков планирования и реализации проектов микроэлектроники.**

Каждый разрабатываемый проект микроэлектроники имеет набор специфических рисков, характерных только для данного конкретного случая. Это связано с широким варьированием проектов микроэлектроники по различным тематическим направлениям, которые являются определяющими целесообразность наличия в системе тех или иных признаков. Однако существует и общий набор рисков, характерных для большинства проектов:

- финансовый риск – риск неполного финансирования или прекращения финансирования проекта, как правило, связан с несостоятельностью заказчика;
- юридический риск – риск невыполнения контрагентом обязательств по договору НИОКР, связанный с нарушением формы заключения сделки, либо изменением законодательства (признание сделки недействительной);
- управленческий риск – риск, вызванный некачественным планированием проекта, либо неэффективным принятием решений в процессе работы над проектом;
- риск неопределенности результатов проекта – риск, связанный со сложностью решаемых научно-технических задач в рамках проекта и непредсказуемостью результатов.

Качественная оценка позволяет определить вероятность возникновения риска, его влияние на результат проекта и последствие такого влияния. В основе такой оценки лежит план управления рисками, перечень идентифицированных рисков, текущее состояние проекта, надежность и достоверность исходной информации. Основные методы качественной оценки рисков:

- оценка последствий рисков – негативные воздействия для угроз и позитивные воздействия для благоприятных возможностей. Как правило, последствия рисков оценивают с точки зрения негативных воздействий по шкале угроз: минимальные, низкие, средние, высокие, максимальные;
- оценка рисков по вероятности проявления (слабовероятные – событие может произойти в исключительных случаях, маловероятные – редкое событие, вероятные – наличие повода предполагать возможность возникновения события, весьма вероятные – событие может произойти, почти возможные – ожидается, что событие произойдет);
- оценка тенденции возникновения риска и влияния его последствий на проект, на основе изученной информации и имеющегося опыта.

Информации о рисках, хранящейся в базах данных организации и относящейся к прошлым проектам, может быть недостаточно (или она совсем отсутствует), поэтому оценку вероятности и последствий рисков проводят для каждого идентифицированного риска с привлечением экспертов. При анализе мнений экспертов применяют самые разнообразные статистические методы. Выбор адекватных математических методов обработки экспертных оценок – сложная задача, требующая тщательного изучения и проработки.

Основные широко используемые в настоящее время методы математической обработки экспертных оценок – это проверка согласованности мнений экспертов (или классификация экспертов, если нет согласованности) и усреднение мнений экспертов внутри согласованной группы [2].

Оценку вероятности наступления негативных событий можно отнести к классификационной задаче, а оцениваемую вероятность следует рассматривать как величину интервальной неопределенности.

Экспертная оценка рисков позволяет ранжировать риски в соответствии с их влиянием на проект. Риски с низкой степенью вероятности возникновения и воздействия не принято оценивать количественно, в дальнейшем за ними ведется наблюдение.

Оценка приоритетности рисков для обработки обычно осуществляется при помощи таблицы соответствия или матрицы вероятности и последствий [1] (табл. 1).

Таблица 1 – Матрица вероятности и последствий (негативные воздействия)

Вероятность наступления риска ( $v$ )	Негативные последствия в результате наступления риска ( $p$ )				
	очень низкая 0,05	низкая 0,10	умеренная 0,20	высокая 0,40	очень высокая 0,80
$0 < v \leq 0,1$	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08
$0,1 < v \leq 0,4$	0,02	0,03	0,06	0,12	0,24
$0,4 < v \leq 0,6$	0,03	0,05	0,1	0,2	0,4
$0,6 < v \leq 0,9$	0,04	0,07	0,14	0,28	0,56
$0,9 < v \leq 1,0$	0,05	0,09	0,18	0,36	0,72

Матрица содержит комбинацию вероятности и негативных последствий, при помощи которой определяют уровень риска:

- высокий (темно-серый цвет)  $0,18 \leq r \leq 0,72$  – необходимо провести работы по предупреждению риска, либо снижению его последствий;
- умеренный (серый цвет)  $0,06 \leq r \leq 0,14$  – достаточно наблюдения за рисками;
- низкий  $0,01 \leq r \leq 0,05$  – риски добавлены в резерв непредвиденных обстоятельств.

Уровень риска устанавливается для каждого риска по каждому проекту. В отношении потенциальных или существенно влияющих на свойства проекта рисков проводят количественную оценку.

**Количественная оценка рисков на этапах планирования и реализации проектов микроэлектроники.**

В процессе количественного анализа рисков оценивается вероятность наступления того или иного события, способного негативно повлиять на исход проекта, а также последствия такого события (эффект рискового события).

Пусть событие  $R$  – реализация проекта по созданию (развитию) ЭКБ с заданными тактико-техническими характеристиками (ТТХ) в пределах финансирования проекта. Вероятность события  $R$  при наличии интегрированной унифицированной базы данных (БД) рисков на предприятиях микроэлектроники можно рассчитать как долю реализованных проектов от

общего числа запланированных проектов:  $P(R) = \frac{n_R}{n}$ , где  $n_R$  – число своевременно реализованных проектов с заданными ТТХ в рамках финансовых ассигнований;  $n$  – общее число запланированных проектов.

В качестве основных мер риска выступают такие статистические процедуры [3], как  $\varepsilon(F)$  – математическое ожидание случайной величины  $x$ ,  $\delta^2(F)$  – дисперсия функции распределения случайной величины,  $\gamma(F)$  – комбинационный показатель, смесь дисперсии и математического ожидания случайной величины  $x$ ,  $v(F)$  – квантиль функции распределения случайной величины,  $\rho(F)$  – мера ожидаемой полезности,  $\pi(F)$  – мера возмущенной вероятности функции распределения случайной величины. Эти характеристики определяются функцией распределения случайного ущерба, соответствующего рассматриваемому риску. При практическом использовании этого подхода перечисленные характеристики оцениваются по статистическим данным.

Однако отсутствие единых доступных БД, содержащих результаты выполнения проектов микроэлектроники, не дает возможности применения статистических процедур при оценке риска и, тем самым, усложняет саму задачу количественного анализа рисков. Поэтому для количественной оценки будем использовать вероятностные события в рамках возможных сценариев реализации проектов.

Пусть обратным для события  $R$  будет событие, связанное со срывом реализации проекта ЭКБ (невыполнение хотя бы одной характеристики проекта: сроки, объем финансирования, результат) –  $\bar{R}$ . Тогда  $R$  и  $\bar{R}$  – это противоположные несовместные события ( $R \cap \bar{R}$ ), согласно правилу сложения вероятностей  $P(R) = 1 - P(\bar{R})$ . На событие срыва проекта  $\bar{R}$  могут оказывать влияния, как специфические, так и общие риски проектов.



Исходя из методов качественной оценки рисков, представим риск, как  $r_i(v, p)$ , где  $i = 1 \dots n$  – число потенциально возможных рисков по данному проекту;  $v$  – качественные суждения, обосновывающие вероятность наступления риска,  $v \in (0, 1)$ ;  $p$  – качественные суждения, определяющие степень приемлемости риска, т.е. возможные негативные последствия для проекта в результате наступления риска.

$$P(R) = 1 - P(\bar{R}(\sum_{i=1}^n r_i(v, p))).$$

Рассмотренный показатель может применяться не только для оценки степени риска на этапе планирования по проекту НИОКР в целом, но и при анализе рисков на определенном этапе проведения НИОКР. В этом случае вводится ограничение на состав рисков, присущих проекту НИОКР на изучаемом этапе, с учетом возможного времени их проявления и периода воздействия.

На рисунке 2 представлен алгоритм оценки степени риска реализации проекта ЭКБ.

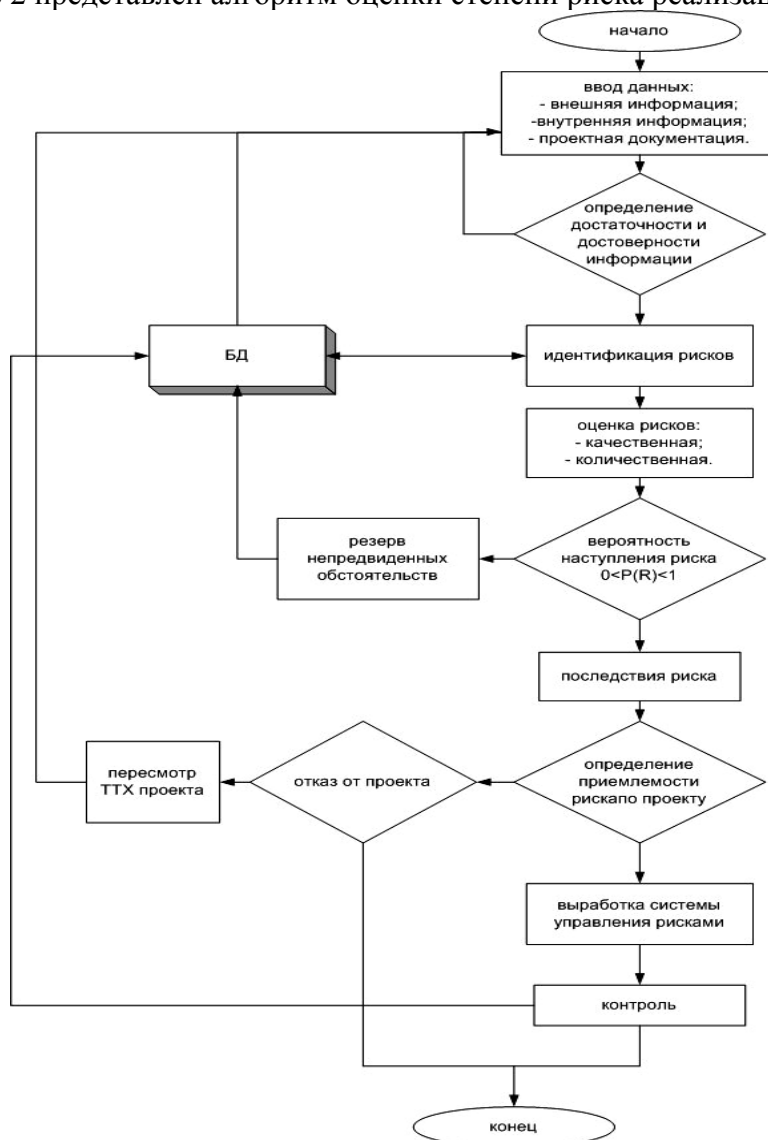


Рисунок 2 – Алгоритм управления рисками проектов реализации ЭКБ

Создание глобальной интегрированной системы управления на базе современных информационных технологий позволит решить не только конкретные задачи отдельных предприятий микроэлектроники, но и объединит всю отрасль для обобщения и беспрепятственного использования имеющейся информации и накопленного опыта управления, планирования и реализации проектов микроэлектроники всеми «потенциальными» участниками жизненного цикла проекта. Одной из задач такой информационной системы управления является

централизованный сбор и обобщение статистических данных об успешно реализованных и сорванных проектах развития ЭКБ посредством использования программно-ориентированных приложений на основе БД. Это даст возможность упростить процедуру оценки вероятности возникновения рисков и степени их влияния на проект, что будет способствовать повышению эффективности управления не только рисками, но и проектами микроэлектроники в целом.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK®) [Текст] : 3-е изд. 248, 2004 Project Management Institute, Four Campus Boulevard, Newtown Square, PA 19073-3299 USA / США (Американский национальный стандарт ANSI/PMI 99-001-2004).
2. Орлов, А.И. Экспертные оценки [Текст] : учеб. пособие / А.И. Орлов. – М., 2002.
3. Кузьмин, А.В. Система автоматизации проведения конкурсов и аудита выполнения специальных проектов создания микросхем двойного применения [Текст] / А.В. Кузьмин, Ю.К. Фортинский, В.М. Антимиров. – Воронеж. : Воронеж. гос. ун-т., 2008. – 137 с.

**Беляева Татьяна Петровна**

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж  
Аспирант кафедры вычислительной техники и информационных систем  
Тел.: 8 951 550 11 07  
E-mail: belyaeva\_tp@mail.ru

**Зольников Владимир Константинович**

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж  
Доктор технических наук, профессор  
кафедра вычислительной техники и информационных систем  
Тел. 8(473)2536705

---

T.P. BELYAEVA, V.K. ZOLNICOV

## **RISK MANAGEMENT METHODS IN MICROELECTRONICS IN PLANNING THE WORK**

*Efficient project management on creation modern ECB impossible without determination influence degree risk on project. This problem dares on stage of the identifications risk, their qualitative and quantitative estimation in management design risk process.*

**Keywords:** risk management, planning the project, microelectronics, algorithm of the estimation degree risk.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Rukovodstvo k Svodu znaniy po upravleniju proektami (Rukovodstvo PMBOK®) [Tekst] : 3-e izd. 248, 2004 Project Management Institute, Four Campus Boulevard, Newtown Square, PA 19073-3299 USA / SShA (Amerikanskij nacional'nyj standart ANSI/PMI 99-001-2004).
2. Orlov, A.I. Jekspertnye ocenki [Tekst] : ucheb. posobie / A.I. Orlov. – M., 2002.
3. Kuz'min, A.V. Sistema avtomatizacii provedenija konkursov i audita vypolnenija special'nyh proektov sozdaniya mikroshem dvojnogo primenenija [Tekst] / A.V. Kuz'min, Ju.K. Fortinskij, V.M. Antimirov. – Voronezh. : Voronezh. gos. un-t., 2008. – 137 s.

**Belyaeva Tat'yana Petrovna**

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh  
Graduate student at Computer Science and Information Systems  
Phone: 8 951 550 11 07  
E-mail: belyaeva\_tp@mail.ru

**Zol'nikov Vladimir Konstantinovich**

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh  
Professor, Ph.D., Head. Department of Computer Science and Information Systems  
Phone: 8(473)2536705

К.А. ЧЕРНЫЙ

## АЭРОИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

*С системных позиций рассматриваются гигиенические и биотехнические вопросы содержания в воздухе рабочей зоны частиц субмикронного аэрозоля диаметром менее 0,1 мкм. На основе решения уравнения аэроионного баланса показана теоретическая взаимосвязь содержания субмикронного аэрозоля с объемной концентрацией легких аэроионов. Представленные теоретические исследования подтверждены на примере специальной модельной аэрозольной среды, формируемой при помощи сильвинитовой руды.*

**Ключевые слова:** сверхтонкая аэрозоль; легкие аэроионы; уравнение ионного баланса.

На современном этапе развития машиностроительных производств в силу особенностей отдельных технологических процессов, применяемых способов производства, характера сырьевых материалов, промежуточных и готовых продуктов актуальными при оценке качества воздушной среды производственных помещений являются вопросы учета так называемых «тонких» параметров, к которым следует отнести наличие сверхтонкой фракции взвешенных в воздухе частиц, в том числе и электрически заряженных. Действительно, в силу все всевозрастающих скоростей обработки материалов, применения обрабатываемых деталей как из высокопрочных сплавов, так и из полимерных синтетических материалов, все более широкого внедрения на различных производствах нанотехнологий настоятельно требуется осуществление мониторинга и контроля за сравнимыми по размерам (порядка нанометра) частицами. Контроль за мельчайшими взвешенными в воздухе частицами необходим с одной стороны для обеспечения безопасных условий труда [1, 2], а также для обеспечения требуемого качества воздуха в технологических зонах, например, в зонах обработки металлов резанием [3, 4].

На практике, наиболее часто инструментальные измерения аэрозольных частиц производятся только в диапазоне диаметров более 0,1–0,3 мкм. Измерение концентраций частиц в диапазоне диаметров менее 0,1 мкм является задачей технически очень сложной. Между тем, мировая практика показывает, что, не смотря на технические трудности в осуществлении мониторинга за такими сверхмалыми объектами, следует постепенно увеличивать полноту контроля за ними. Так Всемирная Организация Здравоохранения (ВОЗ) рекомендует для стран Европы [5] осуществлять постепенный переход к контролю более тонких фракций аэрозольных частиц, поскольку по мелким взвешенным частицам можно точнее спрогнозировать возможные эффекты влияния на здоровье.

Для практического решения указанных задач, в случаях квазистационарности распределения аэрозольных частиц по размерам, в качестве косвенного метода оценки параметров сверхтонкой фракции аэрозольных частиц в воздухе видится возможным применение эмпирических решений уравнения аэроионного баланса, устанавливающего взаимосвязь аэрозольного режима воздушных сред с уровнем ионообразования и величиной объемных счетных концентраций аэроионов с учетом их рекомбинации и осаждения на аэрозольные частицы.

Исходное уравнение аэроионного баланса в предположении, что система «биполярные аэроионы – аэрозольные частицы» является пространственно однородной и концентрации аэроионов обоих знаков равны, запишется в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nu - \alpha n^2 - n \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta(\chi, D) N(\chi, D, t), \quad (1)$$

где  $n$  – объемная счетная концентрация легких аэроионов подвижностью  $\mu=0,5-2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;

$\nu$  – интенсивность ионообразования;

$\alpha$  – коэффициент рекомбинации противоположно заряженных легких аэроионов друг с другом;

$\beta(\chi, D, t)$  – коэффициент слияния легкого аэроиона и аэрозольной частицы диаметром  $D$  и зарядом  $\chi e$ ;

$N(\chi, D, t)$  – объемная счетная концентрация аэрозольных частиц диаметром  $D$  и зарядом  $\chi e$ ;

$e$  – элементарный заряд;

$t$  – время.

Для стационарных условий уравнение (1) преобразуется в

$$v = \alpha n^2 + n \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta(\chi, D) N(\chi, D).$$

Обозначая  $\beta = \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta(\chi, D) N(\chi, D)$  – многочлен, характеризующий время жизни легкого аэроиона до столкновения с аэрозольной частицей, получаем

$$v = \alpha n^2 + \beta n.$$

Решая полученное квадратное уравнение и исключая отрицательное решение, имеем

$$n = \frac{\beta}{2} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{v/\alpha}{(\beta/2\alpha)^2}} \right]. \quad (2)$$

С учетом того, что для нормальных условий интенсивность ионообразования порядка  $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , коэффициент рекомбинации легких аэроионов порядка  $1,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  [6], принимая во внимание, что  $\sqrt{1+x} \approx 1+x/2$  при  $x \ll 1$ , уравнение (2) записывается в виде

$$n \approx \frac{\beta}{2\alpha} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{v}{\alpha} \cdot \frac{4\alpha^2}{\beta^2} \right) \approx \frac{v}{\beta}, \text{ или}$$

$$\beta = \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta(\chi, D) N(\chi, D) = \frac{v}{n}. \quad (3)$$

Коэффициент слияния легких аэроионов и аэрозольных частиц во всем интервале размеров частиц согласно модели Кифи и Нолана [7] можно записать

$$\beta(\chi, D) = 2\pi D D_{\pm} \left( \frac{1 + \sqrt{\pi\gamma}}{1 + \frac{8D_{\pm}}{D c_{\pm}}} \right), \quad (4)$$

где  $c_{\pm}$  – средняя тепловая скорость иона;

$D_{\pm}$  – коэффициент диффузии иона.

В уравнении (4) безразмерный параметр адсорбции  $\gamma$  характеризуют соотношения между электрической и тепловой энергией иона:

$$\gamma = Qq / (2\pi\epsilon_0 DkT),$$

где  $Q = \chi e$ ;

$q = e$  – соответственно заряд аэрозольной частицы и аэроиона;

$k$  – постоянная Больцмана;

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

При размерах аэрозольных частиц  $D < 0,1 \text{ мкм}$  и  $D > 0,1 \text{ мкм}$  и первоначальном отсутствии зарядов на аэрозольных частицах соотношение (4) согласно диффузионно-кинетической модели [8] переходит соответственно в

$$\beta(D) = \frac{1}{4} \pi c_{\pm} D^2 \quad (5)$$

и

$$\beta(D) = 2\pi D_{\pm} D. \quad (6)$$

Выясним конкретный вклад той или иной фракции по размерам аэрозольных частиц в адсорбцию легких аэроионов. Запишем уравнение (3), используя диффузионно-кинетическую модель (соотношения (5) и (6)):

$$\beta = \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta(\chi, D) N(\chi, D) = \int_{D_{\min}}^{D=0,1 \text{ мкм}} \beta(D) N(D) dD + \int_{D=0,1 \text{ мкм}}^{D_{\max}} \beta(D) N(D) dD =$$

$$= \frac{1}{4} \pi c_{\pm} \int_{D_{\min}}^{D=0,1 \text{ мкм}} D^2 N(D) dD + 2\pi n D_{\pm} \int_{D=0,1 \text{ мкм}}^{D_{\max}} D N dD = (B_1 + B_2) = \frac{\nu}{n}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что зная значения интенсивности ионообразования, объемную счетную концентрацию легких аэроионов и характеристики распределения по размерам аэрозольных частиц диаметром  $D > 0,1$  мкм, возможно, определить такой интегральный параметр

аэрозольных частиц сверхтонкой фракции ( $D \leq 0,1$  мкм) как  $B_1 = \frac{\pi c_{\pm}}{4} \int_{D_{\min}}^{D=0,1 \text{ мкм}} D^2 N(D) dD$ , не

прибегая при этом к технически сложным прямым измерениям. Интегральный параметр  $B_1$  характеризует особенности распределения сверхтонкой фракции аэрозольных частиц.

Отметим, что хотя указанный параметр  $B_1$  напрямую и не связан с действующими гигиеническими характеристиками аэрозольного загрязнения воздуха, согласно которым регламентируются либо массовые, либо счетные концентрации частиц, ценность его практического использования видится в возможности применения при решении таких важных прикладных задач как контроль оптической прозрачности воздушной среды, либо задач оперативного контроля изменения размера частиц при фиксированной концентрации  $N$ , например, в чистых комнатах. Кроме того, в качестве параметра аэрозольного загрязнения воздушной среды сверхтонким аэрозолем возможно использовать следующий параметр:

$$P = \frac{(\overline{B_1} - B_1)}{B_1},$$

где  $\overline{B_1}$  – нормальное, а  $B_1$  – конкретное текущее значение параметра.

Представленные выше теоретические обоснования взаимосвязи объемных счетных концентраций легких аэроионов и характеристик распределения по размерам аэрозольных частиц практически проверены на примере специальной модельной воздушной среды сильвинитовых спелеоклиматических камер [9]. Модель была выбрана исходя из следующих соображений. Во-первых, для сильвинитовой спелеоклиматической камеры возможно теоретически рассчитать интенсивность ионообразования, поскольку основным источником легких аэроионов является  $\beta$ -активное ионизирующее излучение изотопа калий-40, входящего в состав сильвинитовой руды. Во-вторых, воздушная среда сильвинитовой спелеоклиматической камеры отличается значительной стабильностью в отношении параметров аэроионного и аэрозольного режима в силу специфических физико-химических свойств аэрозоля калийно-магниевых солей, составляющих основу сильвинита.

Интенсивность ионообразования в сильвинитовой спелеокамере обусловлена как ионизирующими излучениями внутренних отделочных сильвинитовых материалов, так и ионизирующими процессами, происходящими во внешней атмосфере (порядка  $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Согласно исследованиям [10] в условиях сильвинитовых спелеоклиматических камер средняя плотность потока  $\beta$ -частиц изотопов калий-40 с поверхности стен, облицованных блоками из сильвинитовой руды, составляет величина порядка  $0,5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствует интенсивности ионообразования порядка  $80 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . Средняя мощность эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения изотопов калий-40 порядка  $30 \text{ мкР/ч}$ , что соответствует интенсивности ионообразования порядка  $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . Таким образом, общая интенсивность ионизации  $\nu$  воздушной среды сильвинитовой спелеокамеры в результате действия различных ионизирующих процессов составляет величину порядка  $100 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Величина объемной счетной концентрации легких аэроионов  $n$  определялась непосредственными измерениями с помощью счетчика аэроионов УТ-8401, объемной счетной концентрации аэрозольных частиц  $N$  с диаметром более  $0,3$  мкм – с помощью счетчика аэрозольных частиц ПКЗВ-906. Концентрация аэрозольных частиц в диапазоне

диаметров 0,1–0,3 мкм определялась по результатам экстраполяции экспериментальных данных распределения аэрозольных частиц диаметром более 0,3 мкм до частиц диаметром 0,1 мкм с помощью степенного закона Юнге [11]:

$$\frac{\partial N}{\partial \lg D} = A \cdot D^{-c}. \quad (8)$$

Среднее значение коэффициента диффузии аэроионов вычислено из соотношения Эйнштейна-Таунсенда для однозарядных легких аэроионов средней подвижностью  $\mu_{\pm}=1,44 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  [12]:

$$D_{\pm} = \frac{e}{\mu_{\pm} kT} = 0,0364 \text{ см}^2/\text{с}.$$

Экспериментальные данные, полученные в различных сильвинитовых спелеоклиматических камерах и результаты расчетов по уравнению (7), представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Взаимосвязи аэрозольных частиц и легких аэроионов в модельной воздушной среде сильвинитовых спелеоклиматических камер

Объект исследований	$N, \text{ см}^{-3}$ , в диапазоне диаметров частиц $D, \text{ мкм}$								$n, \text{ см}^{-3}$	$B_2 \cdot 10^3$	$B_1 \cdot 10^3$	$\frac{B_2}{(B_1 + B_2)}, \%$
	0,1–0,3	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–1,0	1–2	2–5	5–10	10–100				
Медико-санитарная часть «Калиец» (г.Соликамск)	54400*	890	520	630	20	89	8	22	5000	0,47	19,53	2,34
Санаторий-профилакторий «Алмед» (г.Пермь)	83700*	070	660	280	040	51	1	7	1250	0,67	79,33	0,83
Центральная районная больница с. Карагай (Пермский край)	109000*	890	050	730	150	86	7	8	1450	0,78	68,19	1,13
Муниципальное учреждение «Центр реабилитации детей г. Перми»	114000*	1700	230	100	39	12	0	12	2330	0,84	42,07	1,97
Санаторий-профилакторий ОАО «Пермские моторы»	36100*	110	550	120	62	40	8	6	4150	0,31	23,79	1,27

\* – значения получены экстраполяцией экспериментальных данных с использованием уравнения (12).

Как показывают полученные результаты, доля осаждения аэроионов на аэрозольные частицы диаметром более 0,1 мкм незначительна и составляет для исследованной модельной воздушной среды порядка 1–2 %. Такие результаты согласуются с представленными в [13],

согласно которым одним из характерных позитивных факторов воздушной среды сильвинитовых спелеоклиматических камер является наличие тонкодисперсных аэрозольных частиц калийно-магниевых солей.

Таким образом, на основе уравнения аэроионного баланса показана теоретически, на примере модельной воздушной среды подтверждена практически возможность оценки наличия в воздушной среде аэрозольных частиц сверхтонкой фракции (менее 0,1 мкм), а также возможность оценки соотношения такой фракции с фракцией более крупных частиц (в нашем случае более 0,1 мкм) исходя из величин объемной счетной концентрации легких аэроионов и интенсивности ионообразования. Применение предлагаемого подхода позволяет получить сведения об аэрозольных частицах в воздухе сверхтонкой фракции, не прибегая к технически трудоемким и более затратным непосредственным прямым измерениям.

**Автор выражает глубокую благодарность профессору Г.З.Файнбургу за любезно предоставленные отдельные материалы аэроионных и аэрозольных исследований в сильвинитовых спелеоклиматических камерах.**

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений: СанПиН 2.2.4.1294-03: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Рос. Федерации: утв. Главным государственным санитарным врачом Рос. Федерации 18 апреля 2003 г.
2. Измерение массовых концентраций пыли в воздухе рабочей зоны предприятий горнорудной и нерудной промышленности: МУК 4.1.2468-09: Методические указания: утв. Главным государственным санитарным врачом Рос. Федерации 2 февраля 2009 г.
3. Корчагин, А.В. Исследование процесса резания в газовых контролируемых средах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 18 с.
4. Пагин, М.П. Повышение стойкости режущих инструментов изменением трибологических параметров ювенильных поверхностей направленным воздействием активированных газовых сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 18 с.
5. Air quality guidelines for Europe: second edition. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2000 (WHO Regional Publications, European Series, No. 91).
6. Красногорская, Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения / Н.В. Красногорская. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 323с.
7. Electrical processes in atmospheres: Proceedings of the Fifth International Conference on Atmospheric Electricity held at Garmisch-Patenkirchen, 2-7 September 1974 / Ed. by Dolezalek H., Reyter R., Landsberg H. – Darmstadt: Steinkopff, 1977. – 865 p.
8. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию / Райст П.. – пер. с англ– М.: Мир, 1987. – 280 с.
9. Климатическая камера: пат. 2012306 Рос. Федерация. № 4913631/14; заявл. 21.02.1991; опубл. 15.05.1994.
10. Черный, К.А. Физические параметры и способы формирования биопозитивной воздушной среды в замкнутых помещениях: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь. 1999. – С. 123–134.
11. Юнге, Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы / Х. Юнге. – М.: Мир, 1965. – 425 с.
12. Norgak U. Air ion mobility spectrum at a rural area: PhD thesis. – Tartu: University of Tartu, 2001. – 158 p.
13. Лечение в спелеоклиматической камере из натуральных калийно-магниевых солей Верхнекамского месторождения (Методические рекомендации) / Рычкова М.А., Туев А.В., Красноштейн А.Е., Айрапетова Н.С., Верихова Л.А., Малявин А.Г., Нохрина Л.М., Падерин Ю.Н., Папулов Л.М., Файнбург Г.З. / Утв. Минздравмедпромом РФ 28.04.94. – Москва, 1994. – 20 с.

**Черный Константин Анатольевич**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь  
кандидат технических наук, доцент, начальник отдела метрологии  
614990, г.Пермь, Комсомольский пр., 29  
Тел: (342) 219-80-49  
E-mail: sms@pstu.ru

K.A. CHERNYI

## AIR ION MEASUREMENTS AS A MEANS OF ESTIMATION OF WORK AIR AEROSOL CONTAMINATION

*The system approach addresses issues of hygienic and bio-tech aspects of content in the work air of ultrafine aerosol particles with a diameter less than 0.1 microns. Based on the solution of the air ion balance equation shows the theoretical relationship content of submicron aerosol with a volume concentration of small ions. Presented theoretical studies are confirmed by the example of a special model of the aerosol particles formed by sylvinite.*

**Keywords:** Ultrafine aerosol, small ions, air ion balance equation

### BIBLIOGRAPHY

1. Gigienicheskie trebovaniya k ajeroionnomu sostavu vozduha proizvodstvennyh i obvestvennyh po-mewenij: SanPiN 2.2.4.1294-03: Sanitarno-jepidemiologicheskie pravila i normativy Ros. Federacii: utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom Ros. Federacii 18 aprelja 2003 g.
2. Izmerenie massovyh koncentracij pyli v vozduhe rabochej zony predpriyatij gornorudnoj i ne-rudnoj promyshlennosti: MUK 4.1.2468-09: Metodicheskie ukazaniya: utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom Ros. Federacii 2 fevralja 2009 g.
3. Korchagin A.V. Issledovanie processa rezaniya v gazovyh kontroliruemyh sredah: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. – M., 2009. – 18 s.
4. Pagin M.P. Povysenie stojkosti rezhuvih instrumentov izmeneniem tribologicheskikh parametrov juvenil'nyh poverhnostej napravlennym vozdejstviem aktivirovannyh gazovyh sred: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. – M., 2010. – 18 s.
5. Air quality guidelines for Europe: second edition. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2000 (WHO Regional Publications, European Series, No. 91).
6. Krasnogorskaja N.V. Jelektrichestvo nizhnih sloev atmosfery i metody ego izmerenija. – L.: Gidrometeoizdat, 1972. – 323s.
7. Electrical processes in atmospheres: Proceedings of the Fifth International Conference on Atmospheric Electricity held at Garmisch-Patenkirchen, 2-7 September 1974 / Ed. by Dolezalek H., Reyter R., Landsberg H. – Darmstadt: Steinkopff, 1977. – 865 p.
8. Rajst P. Ajerozoli. Vvedenie v teoriju: Per. s angl. – M.: Mir, 1987. – 280 s.
9. Klimaticheskaja kamera: pat. 2012306 Ros. Federacija. № 4913631/14; zajavl. 21.02.1991; opubl. 15.05.1994.
10. Chernyj K.A. Fizicheskie parametry i sposoby formirovaniya biopozitivnoj vozdušnoj sredy v zamknutyh pomewenijah: dis. ... kand. tehn. nauk. – Perm'. 1999. – S. 123–134.
11. Junge H. Himicheskij sostav i radioaktivnost' atmosfery. – M.: Mir, 1965. – 425 s.
12. Horrak U. Air ion mobility spectrum at a rural area: PhD thesis. – Tartu: University of Tartu, 2001. – 158 p.
13. Lechenie v speleoklimaticheskoy kamere iz natural'nyh kalijno-magnievyyh solej Verhnekamskogo mestorozhdenija (Metodicheskie rekomendacii) / Rychkova M.A., Tuev A.V., Krasnoshtejn A.E., Ajrapetova N.S., Verihova L.A., Maljavin A.G., Nohrina L.M., Paderin Ju.N., Papulov L.M., Fajnborg G.Z. / Utv. Minzdravmedpromom RF 28.04.94. – Moskva, 1994. – 20 s.

#### **Cherny Konstantin A.**

State National Research Polytechnic University of Perm, Perm  
Doctor of Philosophy, Associate Professor, Head of Metrology Department  
29, Komsomolsky Av., Perm, 614990  
Tel: +7 (342) 219-80-49  
E-mail: [sms@pstu.ru](mailto:sms@pstu.ru)



**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями**  
**к оформлению научных статей.**

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 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, 43-48-90  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Григорьева О.Ю.  
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 28.12.2011 г.

Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9.

Тираж 600 экз.

Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.