

**Редакционный совет**

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

**Редакция**

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

Члены редколлегии

**Бабичев А.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Вдовин С.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Дмитриев А.М.** д-р техн. наук, проф., член-кор. РАН  
**Емельянов С.Г.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубарев Ю.М.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубчанинов В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Иванов Б.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Колесников К.С.** д-р техн. наук, проф., академик РАН  
**Копылов Ю.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**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, Нагорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,  
43-48-90

www.ostu.ru

E-mail: met\_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство: ПИ № ФС77-35719 от 24 марта 2009 года

Подписной индекс **29504**

по объединенному каталогу «Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2011

## Содержание

### Естественные науки

<i>Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Якушина С.И.</i> Теоретическая оценка величины практического предела прочности.....	3
<i>Копылов Ю.Р., Ходус В.В.</i> Определение параметров винтовых течений в каналах через касательные напряжения на поверхности с помощью принципа минимума диссипации энергии.....	8
<i>Велиев Ф.Э.</i> Обратная задача термоупругости для твердосплавной волоки, подкрепленной кольцом.....	15
<i>Еиуткин Д.Н., Журавлева А.В., Горин А.В.</i> Моделирование привода статико-динамической машины для бестраншейного строительства трубопроводов.....	20
<i>Матяхин С.П., Козли З.Ж., Магомедов Г.Р., Малий Д.О., Ромашин С.Н.</i> Зависимость характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs от концентрации алюминия в области волновода и эмиттеров.....	26
<i>Колова В.И.</i> Экстракционное поведение ионов ванадия (V) в системе 5,7-дибромоксидинолин – гексанол – хлороформ (1:2).....	36
<i>Малинин В.В.</i> Критические температуры вязко-хрупкого перехода материала и их взаимосвязь с критериями разрушения.....	40
<i>Тихомиров В.П., Чвала А.Н., Кошелев А.В.</i> Анализ и систематизация экспериментальных методов исследования коэффициентов сцепления колеса с рельсом.....	46

### Моделирование технологических процессов

<i>Корнаева Е.П., Савин Л.А.</i> Моделирование течения жидкости в уплотнении малой конусности.....	54
<i>Лазуткин Г.В., Антипов В.А., Петухова М.А., Борзенков М.И., Изранова Г.В.</i> Неуставившиеся колебания виброзащитных систем с конструкционным демпфированием.....	60

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Истоцкий В.В., Протасьев В.Б.</i> Методы современного проектирования групповых зубьев борфрез.....	66
<i>Стариков А.Н.</i> Системный подход к проведению испытаний энергоэффективного автономного электро-механического привода с роликовинтовым исполнительным механизмом.....	70
<i>Шшикарев М.П.</i> Восстановление работоспособности предохранительных фрикционных муфт после срабатывания.....	76

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Марченко Ю.В., Александров А.В., Самодумский Ю.М., Иванов В.В.</i> Анализ методов качественной и количественной оценки шероховатости и разработка прибора для оценки шероховатости поверхности образцов, обработанных в свободных абразивных средах.....	79
<i>Ермаков Ю.М., Степанов Ю.С.</i> Перспективы развития абразивно-алмазной обработки.....	85
<i>Усмонов С.Д., Бурашинов М.А.</i> Математическое описание эффективности очистки поверхностей водяной струей высокого давления.....	91
<i>Тарпанов А.С., Анисимов Р.В.</i> Особенности износа инструмента при зубодолблении колес с внутренними зубьями незвольвентного профиля.....	99

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

<i>Демидова Н.А., Моськина Е.Л., Фомина С.А., Гущина Г.Д.</i> Влияние локальной вибрации на работников раскройного цеха в процессе технологической обработки швейных изделий и ее гигиеническое нормирование.....	105
<i>Кваскова Т.В., Осокина А.А., Проколова Е.В.</i> О модификации конструкции изделия с учетом деформации растяжения трикотажного полотна.....	110
<i>Некрасова Н.С., Некрасов Ю.Н.</i> Оптимизация производственной технологии кожевенного предприятия, на основе внедрения цепочки добавленной ценности.....	114
<i>Родичева М.В., Абрамов А.В., Агайков Е.М., Белова Т.И.</i> Расчет параметров естественной вентиляции при разработке средств индивидуальной защиты.....	120

### Инновации и кадры в машиностроении

<i>Аверченков В.И., Шкумат Е.В., Надуваев В.В.</i> Методология создания электронных образовательных ресурсов по специальным техническим дисциплинам.....	125
<i>Морозова А.В., Дьяченко С.В., Ноздрачева Т.А., Сотников Ю.К.</i> Специфика формирования практикоориентированного содержания подготовки специалистов в области автоматизации машиностроительных производств.....	135

### Приборостроение и биотехнические системы

<i>Зубарев А.С.</i> Исследование параметров ультразвуковой толщинометрии стенок труб внутренних газопроводов жилых зданий при динамических измерениях.....	145
--	-----

### Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Кобзев И.О., Пахолкин Е.В.</i> Методическое обеспечение расчетно-экспериментального электро-резистивного метода оценки максимальной температуры в подшипнике качения.....	150
--	-----



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

**№ 3 (287) 2011**  
May-June

# Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

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

## Editorial council

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

## Editorial Committee

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

## Editor-in-chief Assistants

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

## Member of editorial board

**Babichev A.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Vdovin S.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Dmitriev A.M.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Corresponding Member of RAS*  
**Emelyanov S.G.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Zubarev Y.M.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Subchaninov V.G.** *Doc. Sc. Ph.-Math. Prof.*  
**Ivanov B.R.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*  
**Kolesnikov K.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*  
**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,  
Naugorskoye Chaussee, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
41-98-21  
www.ostu.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Department for Mass Communication. The certificate of registration III № ФС77-35719 from 24.03.2009

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi» 29504

©, 2011

## Contents

### Natural science

<i>Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S., Yakushina S.I.</i> Theoretical assessment of practical limiting accuracy value.....	3
<i>Kopylov Y.R., Hodus V.V.</i> Determination of parameters of helical flows in channels through the shear stresses on the surface using the principle of minimum energy dissipation.....	8
<i>Veliyev F.E.</i> Inverse problem thermoelasticity for hard alloy drawing die, supported by ring.....	15
<i>Eshutkin D.N., Zhuravleva A.V., Gorin A.V.</i> Modelling of static dynamic machine drive for pipeline ditch-free techniques.....	20
<i>Matyuhin S.I., Kozil Z.Zh., Magomedov G.R., Malyi D.O., Romashin S.N.</i> Dependence of semiconductor laser characteristics of double heterostructure rho laser on the basis of algaeas from aluminum concentration in the field of waive guide and emitter.....	26
<i>Komova V.I.</i> Vanadium (V) ions extraction behavior in a system of Dbo - Hexyl Spirit – Chloroform (1:2).....	36
<i>Malinin V.V.</i> Critical temperatures of ductile-brittle material transition and their interrelation with failure criteria.....	40
<i>Tihomirov V.P., Chvala A.N., Koshelev A.V.</i> Analysis and systematization of experimental methods of coefficient of traction researches.....	46

### Process modeling

<i>Kornaeva E.P., Savin L.A.</i> Fluid flow modeling in seal systems with small conicity.....	54
<i>Lazutkin G.V., Antipov V.A., Petukhova M.A., Borzenkov M.I., Izranova G.V.</i> Unsteady oscillations of vibroprotective systems with structural damping.....	60

### Construction, calculation, material

<i>Istotsky V.V., Protasyev V.B.</i> Modern designing methods for group teeth of drilling mills.....	66
<i>Starikov A.N.</i> System approach to carrying out tests of energy efficient independent electromechanical drive with roller actuator.....	70
<i>Shishkarev M.P.</i> Restoration of safety friction clutch efficiency after operation.....	76

### Machine building technology and toolware

<i>Marchenko Y.V., Alexandrov A.V., Samodumsky J.M., Ivanov V.V.</i> Analysis of methods for qualitative and quantitative estimation of roughness and development of devices for surface roughness estimation of samples processed in free abrasive environment.....	79
<i>Yermakov Y.M., Stepanov Y.S.</i> Prospects in abrasion development.....	85
<i>Usmonov S.D., Burnashov M.A.</i> Mathematical formulation of surface cleaning effectiveness with water jet.....	91
<i>Tarapanov A.S., Anisimov R.V.</i> Features of tool deterioration at gear shaping cog-wheels with internal teeth of non-involute profile.....	99

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

<i>Demidova N.A., Moskina E.L., Fomina S.A., Gushchina G.D.</i> Local vibration effect on cutting department workers at technological processing garments and its hygienic normalization.....	105
<i>Kvaskova T.V., Osokina A.A., Prokopova E.V.</i> Modification of product design taking into account tensile strain of stockinet.....	110
<i>Nekrasova N.S., Nekrasov Y.N.</i> Industrial technology optimization of tanning enterprise based on introduction of added value chain.....	114
<i>Rodicheva M.V., Abramov A.V., Agashkov E.M., Belova T.I.</i> Natural ventilation factor computation at individual defence development.....	120

### Innovation and frame in machine building

<i>Averchenkov V.I., Shkumat E.V., Naduvayev V.V.</i> Methodology for creation of electronic educational resources in special engineering subjects.....	125
<i>Morozova A.V., Dyachenko S.V., Nozdrachyova T.A., Sotnikov Yu. K.</i> Formation specificity in practice-oriented contents for expert training for mechanical engineering automation.....	135

### Instrument making and biotechnological system

<i>Zubarev A.S.</i> Research of parameters of ultrasonic measurement of a thickness of walls of pipes of internal gas pipelines of residential buildings at dynamic measurements.....	145
---	-----

### Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Kobzev I.O., Pakholkin E.V.</i> Methodical support of the rated-experimental electroresistive valuation method of the maximum temperature in the rolling bearing.....	150
--	-----

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

**ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

УДК 539.3

Л.Ю. ФРОЛЕНКОВА, В.С. ШОРКИН, С.И. ЯКУШИНА

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ**

*Предложен метод оценки реального, практического предела прочности на основе информации о значениях теоретического предела прочности, поверхностной энергии и длины микротрещин, присутствующих в толще материала. Теоретический предел прочности и поверхностную энергию предлагается вычислять с помощью предложенной ранее модели материала второго порядка, длина микротрещин предполагается известной.*

*Ключевые слова:* практический и теоретический предел прочности, теория Гриффитса, трещина, несплошность адгезионного и когезионного соединений.

**ВВЕДЕНИЕ**

Испытание упругих материалов на разрыв с теоретической точки зрения требует напряжения  $\sigma_f$ , которое можно оценить теоретически, путем рассмотрения растяжения межатомных связей [1] или с помощью модели сплошной среды, основанной на учете потенциального двух и трехчастичного взаимодействия частиц сплошной среды [2, 3]. Обе модели предлагают оценку величины  $\sigma_f$ , соизмеримую с величиной  $(E/5)$ , где  $E$  – модуль упругости рассматриваемого изотропного однородного хрупкого материала.

Однако, как отмечено в [1], хрупкие тела обычно разрываются при напряжении  $\sigma_s \sim E/500$ . Классическое решение проблемы несоответствия значений  $\sigma_f$  и  $\sigma_s$  дано теорией трещин Гриффитса [4], опирающейся (из-за отсутствия надежных сведений о прочности межатомных связей) на энергетические рассуждения. В результате оказалось [1], что в случае справедливости оценки  $W_p \sim Ea/30$  ( $a$  – межатомное расстояние) обычно наблюдаемое значение прочности  $\sigma_s \sim E/500$  можно объяснить, исходя из соотношения

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{2E W_p}{\pi l}}, \quad (1)$$

в котором значение длины  $2l$  трещин Гриффитса имеет порядок  $2l \approx 10^{-6}$  м.

Модель Гриффитса не устанавливает прямой связи между  $\sigma_f$  и  $\sigma_s$ , и не дает возможности оценить трещиноватость (количество трещин отмеченной выше длины), приводящую к разрушению хрупкого материала под действием растягивающих напряжений  $\sigma_s$ . Дальнейшие рассуждения посвящены решению этих задач.

**ПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН**

1. Рассматривается бесконечно протяженная, однородная, линейно упругая среда, деформированное состояние которой описывается не одним, а двумя градиентами перемещений. При этом напряженное состояние характеризуется также двумя тензорами, каждый из которых состоит из двух слагаемых: постоянного слагаемого, независимого от деформаций, и слагаемого, зависящего от них. Постоянные составляющие тензоров напряжения и тензоры, характеризующие упругие свойства среды, вычисляются посредством известных потенциалов парного и тройного взаимодействия частиц упругой среды. В данной работе рассматриваем вариант модели, использованный в работе [5] для оценки несплошности (трещиноватости) адгезионного контакта двух тел, состоящих из разных материалов.

2. Допускается, что как напряженное состояние материала, подверженного растяжению внешней равномерно распределенной (с интенсивностью  $\sigma$ ) нагрузкой, так и его деформированное состояние являются одномерными, равномерными.

3. При приложении к бесконечно протяженному телу упомянутой в пункте 2 нагрузки в плоскостях, перпендикулярных направлению ее действия, равномерно распределенных (с шагом  $2l_0$ ), появляются микротрещины, представляющие собой квадратные разрезы с площадью  $(4l_{0c}^2) = (1 - \alpha)4l_0^2$ , где  $\alpha$  – относительная величина сохраненной в выделенной плоскости сплошности. Каждая плоскость с квадратными разрезами имеет периодическую ячеистую структуру. Ее элементарная ячейка – квадрат со стороной  $2l_0$ , в одном из углов которого расположен конгруэнтный с ним разрез – трещина со стороной  $2l_{0c} = 2l_0\sqrt{1 - \alpha}$ . Трещины-квадраты расположены в параллельных слоях друг под другом.

4. Величина  $\alpha$  в работе [5] вычисляется для случая, когда вдоль плоскости, на которой появляются описанные выше микротрещины (с той лишь разницей, что в нашем случае  $l_0$  конечно, а в работе [5]  $l_0 \rightarrow 0$ ), контактируют изотропные, однородные, упругие, полубесконечные тела, состоящие из разных материалов, с помощью выражения:

$$\alpha = \left( 1 + \frac{W_{\alpha\alpha} - 0,5W_{\alpha(1-\alpha)}}{W_{(1-\alpha)(1-\alpha)} - 0,5W_{\alpha(1-\alpha)}} \right)^{-1}. \quad (2)$$

В этом выражении величины  $W_{km}$  ( $k, m = \alpha, 1 - \alpha$ ) являются значениями суммарных (по обоим контактирующим телам) работ внутренних обобщенных сил, развивающихся вблизи участка  $k$  на обобщенных перемещениях, развивающихся на соседнем (или совпадающем) с ним участке  $m$ , приходящимися на единицу площади области контакта. Если материал контактирующих тел одинаков, а внешние воздействия отсутствуют, согласно [5] величина  $\alpha = 1$ . Но если материалы контактирующих тел разные, или на объединенные тела действуют отличные от нуля силы, величина  $\alpha$  оказывается меньше единицы, но больше нуля. Это свидетельствует о появлении микротрещин ( $1 - \alpha \neq 0$ ). Вместе с тем обрыва связи между телами нет, так как  $\alpha \neq 0$ ,  $0 < \alpha < 1$ .

Выражение (2) построено по аналогии с построением условия Гриффитса, определяющего значение длины микротрещины, обеспечивающее стационарность функции энергии, равной разности упругой энергии и появившейся поверхностной энергии.

5. Допускается, что величина  $\alpha$  в рассматриваемой ситуации, когда  $l_0 = const$ , определяется тем же выражением (2), что та же величина  $\alpha$  при условии  $l_0 \rightarrow 0$ .

6. В работах [6, 7] показано, что слой материала, прилегающий к свободной границе тела, в котором в отсутствии внешних воздействий наблюдаются большие градиенты перемещений, при величине последних много меньше межатомного расстояния, имеет толщину, соизмеримую с этим расстоянием. Учитывая это, в соответствии с [8] допускаем, что вплоть до границы материал проявляет объемные свойства, а его поверхностная энергия распределена вдоль двухмерной (не имеющей толщины) границы с постоянной интенсивностью  $W_p$ .

7. Слой материала между двумя параллельными трещинами-разрезами считается аналогом слоя  $(1 - \alpha)$  работы [5]. Он ограничен свободной поверхностью, на которой распределена свободная энергия. В соответствии с положением пункта 6 в этом слое деформации и перемещения частиц полностью отсутствуют, напряжения равны нулю.

Слой материала между плоскостями, в которых расположены трещины, дополняющий слой  $(1 - \alpha)$  до полной элементарной ячейки структуры, образовавшейся после появления трещин, считается аналогом слоя  $\alpha$  работы [5]. Для него считается, что напряжения после образования трещин и деформации распределены равномерно и имеют классический характер.

8. Как и в теореме Гриффитса первоначально сплошной материал растягивается увеличивающимся напряжением  $\sigma$  до тех пор, пока  $\sigma$  не достигает значения практического предела прочности  $\sigma = \sigma_g$ , превышение которого приводит к катастрофическому развитию трещин, приводящих к разрушению тела на две части. Но при этом должна разрушиться сплошная часть  $\alpha$  ячейки структуры трещин. Следовательно, в этой части, в момент появления

трещин Гриффитса развивается напряжение  $\sigma = \sigma_f$ . Неравномерность распределения напряжений в перешейке между трещинами, их концентрация в вершинах трещины ввиду оценочного характера предлагаемой модели трещинообразования не учитывается. В то время как в части  $(1-\alpha)$  вся упругая энергия превращается в поверхностную энергию  $F_\varepsilon = 2W_p 2l_0(1-\alpha)$ . С учетом этого можно записать балансовое соотношение

$$\frac{\sigma_\varepsilon^2}{2E} 4l_0^2 = 4(1-\alpha)l_0W_p + 4\alpha \frac{\sigma_f^2}{2E} l_0^2. \quad (3)$$

При этом оказывается, что

$$W_{(1-\alpha)(1-\alpha)} = 2W_p; \quad W_{\alpha\alpha} = \frac{\sigma_f^2}{2E} l_0; \quad W_{\alpha(1-\alpha)} = 0. \quad (4)$$

В результате величина  $\alpha$  определяется выражением

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_f^2 l_0}{4W_p E}}. \quad (5)$$

Если учесть, что

$$\sigma_\varepsilon = \chi \sigma_f, \quad (6)$$

а величины  $E$ ,  $\sigma_f$ ,  $W_p$  поддаются расчету с помощью модели среды, представленной в [9], то подставляя (6) в (3) и определив предварительно на основании (5) величину  $\alpha$ , можно рассчитать величину  $\chi = \sigma_\varepsilon / \sigma_f$  при известной длине микротрещин материала.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ**

В работе [1] приведена оценка величины поверхностной энергии:  $W_p = Ea/30$ , где  $a$  – среднее межатомное расстояние. Там же приводятся используемые на практике оценки для  $\sigma_\varepsilon$  и  $\sigma_f$ :  $\sigma_\varepsilon = E/500$ ;  $\sigma_f = E/5$ .

Расчет длины трещины Гриффитса, проведенный на основании этих оценок, представленный в [1] приводит ориентировочно к их длине  $2l_0 \sim 10^{-6}$  м.

Используем это значение, а также приведенные оценки для  $W_p$ ,  $\sigma_f$  и оценку  $a \sim 10^{-10}$  м для оценки величины  $\chi$  на основании (4) – (6).

Для величины  $\alpha$  получаем:  $\alpha \sim 10^{-4}$ , а для  $\chi$ :  $\chi = \sqrt{2\alpha} \sim 10^{-2}$ .

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результат расчета величины  $\chi$  полностью соответствует соотношению между  $\sigma_\varepsilon$  и  $\sigma_f$ , представленному в [1], и свидетельствует о практической пригодности представленной модели трещинообразования и оценки величины отношения практического предела прочности к теоретическому для инженерных расчетов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Петч, Н. Металлографические аспекты разрушения [Текст] / Н. Петч // Разрушение. Ред. Либовиц Г. – М.: Мир, 1973. – Т. 1. – С. 376 – 420.
2. Азаров, А.С. Учет влияния трехчастичного взаимодействия в сплошной упругой среде на ее механические характеристики [Текст] / А.С. Азаров, В.С. Шоркин // Сборник трудов 47 Международной конференции "Актуальные проблемы прочности". – Н.-Новгород, 2008. – Ч. 2. – С. 163 – 165.
3. Фроленкова, Л.Ю. Методика расчета энергии адгезии с учетом тройного взаимодействия частиц среды [Текст] / Л.Ю. Фроленкова // Известие ОрелГТУ, серия "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии", № 4, 2009. – С. 22 – 26.
4. Работнов, Ю.Н. Введение в механику разрушения [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.

5. Витковский, И.В. Теоретическая оценка несплошности адгезионного контакта элементов жидкометаллического blankets термоядерного реактора [Текст] / И.В. Витковский, А.Н. Конев, В.С. Шоркин, С.И. Якушина. // Журнал технической физики, 2007. – Т. 77. – Вып. 6. – С.28 – 33.

6. Векилов, Ю.Х. Электронная структура контакта поверхностей переходных металлов [Текст] / Ю. Х. Векилов, В. Д. Вернер, М. Б. Самсонова // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 151. – Вып 2. – С. 341 – 376.

7. Фроленкова, Л.Ю. Инженерные методы определения адгезионной прочности соединения твердых тел [Текст] / Л.Ю. Фроленкова [Текст] // Известия ОрелГТУ, серия "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии", № 1/273 (559), 2009. – С. 53 – 60.

8. Ландау, Л.Д. Статистическая физика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е. М.Лифшиц. – М.: Наука, 1976. – Т. 5. – 584 с.

9. 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 // Материаловедение, 2011. № 2, С. 2 – 7.

**Фроленкова Лариса Юрьевна**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры "Физика"

Тел. (4862) 41-98-44

E-mail: LaraFrolenkova@yandex.ru

**Шоркин Владимир Сергеевич**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой "Физика"

Тел. (4862) 41-98-44

E-mail: VSorkin@yandex.ru

**Якушина Светлана Ивановна**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

старший преподаватель кафедры "Высшая математика"

Тел. (4862) 41-98-48

---

L.Yu. FROLENKOVA, V.S. SHORKIN, S.I. YAKUSHINA

**THEORETICAL ASSESSMENT OF PRACTICAL LIMITING ACCURACY VALUE**

*The method of an estimation of real, practical breaking point on the basis of the information on values of theoretical breaking point, surface energy and length of the microcracks, which are present at thickness of a material, is offered. Theoretical breaking point and surface energy is offered to be calculated by means of offered before model of a material of the second order. The length of microcracks is supposed known.*

**Key words:** *practical and theoretical breaking point, Griffiths theory, crack, discontinuity flaw of adherence and cohesive junctions.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Petch, N. Metallograficheskie aspekty razrusheniya [Текст] / N. Petch // Razrushenie. Red. Libovic G. – М.: Mir, 1973. – Т. 1. – С. 376 – 420.

2. Azarov, A. S. Uchet vlijaniya trekhchastichnogo vzaimodejstviya v sploshnoj uprugoj srede na ee mekhanicheskie harakteristiki [Текст] / A. S. Azarov, V. S. Shorkin // Sbornik trudov 47 Mezhdunarodnoj konferencii "Aktual'nye problemy prochnosti". – N.-Novgorod, 2008. – Ch. 2. – С. 163 – 165.

3. Frolenkova, L. Ju. Metodika rascheta jenerгии adgezii s uchetom trojnogo vzaimodejstviya chastic sredy [Текст] / L. Ju. Frolenkova // Izvestie OrelGTU, serija "Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii", № 4, 2009. – С. 22 – 26.

4. Rabotnov, Ju. N. Vvedenie v mekhaniku razrusheniya [Текст] / Ju. N. Rabotnov. – М.: Nauka, 1987. – 80 с.

5. Vitkovskij, I. V. Teoreticheskaja ocenka nesploshnosti adgezionnogo kontakta jelementov zhidkometallicheskogo blanketa termojadernogo reaktora [Текст] / I. V. Vitkovskij, A. N. Konev, V. S. Shorkin, S. I. Jakushina. // Zhurnal tehnichekoj fiziki, 2007. – Т. 77. – Вып. 6. – С.28 – 33.

6. Vekilov, Ju. H. Jelektronnaja struktura kontakta poverhnostej neperehodnyh metallov [Текст] / Ju. H. Veki-

lov, V. D. Verner, M. B. Samsonova // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1987. – T. 151. – Vyp 2. – S. 341 – 376.

7. Frolenkova, L. Ju. Inzhenernye metody opredelenija adgezionnoj prochnosti soedinenija tverdyh tel [Tekst] / L. Ju. Frolenkova [Tekst] // Izvestija OrelGTU, serija "Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii", № 1/273 (559), 2009. – S. 53 – 60.

8. Landau, L. D. Statisticheskaja fizika [Tekst] / L. D. Landau, E. M. Lifshic. – M.: Nauka, 1976. – T. 5. – 584 s.

9. Shorkin, V. S. Uchet vlijanija trojnogo vzaimodejstvija chastic sredy na poverhnostnye i adgezion-nye svoystva tverdyh tel [Tekst] / V. S. Shorkin, L. Ju. Frolenkova, A. S. Azarov // Materialovedenie, 2011. № 2, S. 2 – 7.

**Frolenkova Larisa Yuryevna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of physico-mathematical science, associate professor, associate professor of department “Physics”

Tel.: 4862-41-98-44

e-mail: LaraFrolenkova@yandex.ru

**Shorkin Vladimir Sergeevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Doctor of physico-mathematical science, professor, head of department “Physics”

Tel.: 4862-41-98-44

e-mail: VSorkin@yandex.ru

**Yakushina Svetlana Ivanovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Senior teacher of department “High mathematics”

Tel.: 4862-41-98-48

Ю.Р. КОПЫЛОВ, В.В. ХОДУС

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ ЧЕРЕЗ КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПРИНЦИПА МИНИМУМА ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ

*Для турбулентных безотрывных течений в каналах потери мощности на трение сосредоточены в пограничном слое. Величина потерь определяется интегрированием по поверхности произведения касательных напряжений на скорость за пределами пограничного слоя. Распределение потерь полного давления между статической и динамической составляющими полного давления определяется с использованием принципа наибольшего расхода. Предложенный подход использован для расчета течений в гидроциклонах.*

**Ключевые слова:** касательные напряжения трения, гидроциклон, потери полного давления, пограничный слой, принцип наибольшего расхода.

Уравнения Навье-Стокса, несмотря на свою сложность, описывают только ламинарные режимы течения ньютоновских жидкостей. Для турбулентных потоков в настоящее время вообще не существует замкнутой системы дифференциальных уравнений. Отсюда возможно существование нескольких непротиворечивых расчетных моделей. Такое положение вынуждает искать нетрадиционные подходы, позволяющие редуцировать расчетные модели с целью приближения к инженерной практике. В соответствии с теорией Л. Прандтля, чем больше число Рейнольдса, тем ближе течение в ядре потока к законам идеальной жидкости и тем большая часть потерь сосредоточена в пограничном слое (ПС).

В некоторых частных случаях течение жидкостей в каналах можно приближенно описать через касательные напряжения трения в пограничном слое на твердых границах потока. Известное выражение для стационарного адиабатного течения в канале с трением

$$WdW = -VdP - dL_{mp}$$

в котором  $W$ ,  $P$  и  $L_{mp}$  – соответственно скорость, давление и работа, совершаемая против сил трения, можно преобразовать к виду

$$dP^* \cdot Q = -dN_{mp} \quad (1)$$

где  $P^*$  – полное давление потока, т.е. сумма статического  $P$  и динамического давлений

$$P^* = P + \frac{\rho W^2}{2}$$

где  $Q$  – объемный расход,

$\rho$  – плотность жидкости,

$N_{mp}$  – мощность, теряемая на трение.

В дальнейшем считаем, что преобладающая часть потерь имеет место на стенках канала, что справедливо при развитом турбулентном течении. При продольном течении жидкости в канале постоянного сечения справедливо выражение, полученное из уравнения Дарси [1]:

$$\tau = \frac{\lambda}{8} \rho W^2 \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения в формуле Дарси,

$W$  – средняя скорость по сечению.

При  $lg(Re) > 5 \dots 6$   $\lambda$  зависит только от шероховатости. Закон Дарси можно использовать для каналов произвольного сечения, заменив диаметр  $D$  эквивалентным гидравлическим

диаметром  $D_r = \frac{4F}{\Pi}$ , где  $F$  – площадь поперечного сечения канала,  $\Pi$  – смоченный периметр.

Подставляя в уравнение Дарси с учетом (2), получаем:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{D_r} \cdot \rho \cdot \frac{W^2}{2} = \lambda \cdot \frac{\Pi \cdot l}{4F} \cdot \rho \cdot \frac{W^2}{2} = \tau \cdot \frac{S}{F}$$

Таким образом, потери давления на длине  $l$  равны **произведению касательного напряжения на отношение величины омываемой поверхности  $S$  к площади поперечного сечения  $F$** . При некоторых допущениях через касательные напряжения на стенке можно также определить падение давления и окружной скорости винтового потока вдоль оси цилиндрического канала. Вкладом осевой скорости в потери пренебрегаем. Считаем, что потери энергии в ядре потока отсутствуют. При этом соблюдается закон «свободного вихря»:

$$W_\varphi = W_{\varphi R} \cdot \frac{R}{r},$$

где  $R$  и  $r$  – радиус цилиндра и текущий радиус,

$V_{\varphi R}$  – окружная скорость вблизи стенки на границе с ПС.

В дальнейшем индекс « $\varphi$ » опускаем. Толщиной ПС пренебрегаем. В начальном сечении задаемся значениями избыточного давления  $P_{R0}$ , и скорости  $V_{R0}$  на периферии потока. Объемный расход вдоль оси равен  $Q$ . В сильно закрученном потоке вдоль оси образуется воздушный столб (ВС), радиус которого определяется из условия, что на его границе скоростной напор равен полному давлению на периферии:

$$r_{cm} = R \cdot \sqrt{\frac{\rho W_R^2}{2P + \rho W_R^2}} \quad (3)$$

В уравнении (2) использовалась **средняя** по сечению скорость. При больших Рейнольдсовых числах скорость жидкости вблизи стенки канала за пределами ПС близка к средней скорости жидкости. Предполагаем, что и для винтового движения без больших погрешностей можно использовать окружную скорость за пределами ПС. Для потока с распределением окружной скорости по закону «свободного вихря»  $P^*$  постоянно по сечению потока. Подставив в (2) составляющие  $P^*$  на периферии потока, получаем:

$$dP_R + \rho W_R dW_R = \frac{dN_{mp}}{Q} = -\frac{\tau \cdot dF \cdot W_R}{Q} = -\frac{\lambda}{4Q} \rho W_R^3 \cdot \pi R dl \quad (4)$$

Компоненты дифференциала полного давления в левой части могут снижаться за счет трения по-разному. Введем коэффициент распределения потерь между статической и динамической составляющими полного давления

$$k = \frac{dP}{dP + \rho W dW},$$

В (4) две неизвестные – давление и скорость, и проинтегрировать его по длине можно только при дополнительных допущениях, например, о характере распределения потерь между статической и динамической составляющими полного давления. При постоянном значении  $k$  (4) имеет решение

$$W_{R1} = \frac{1}{\frac{1}{W_{R0}} + \frac{\lambda \cdot \pi \cdot R \cdot l \cdot (1 - k)}{8Q}} \quad (5)$$

В ситуации неопределенности можно использовать вариационный принцип минимума диссипации механической энергии, являющийся одним из выражений общего философского принципа экстремума организации системы [2]. Если допустимо не единственное состояние системы (процесса), а целая совокупность состояний, согласных с законами сохранения и связями, наложенными на систему (процесс), то реализуется то её состояние, которому отвечает минимальное рассеяние энергии. Такой подход особенно актуален для турбулентного

потока, для которого не существует замкнутой системы уравнений. Если есть несколько непротиворечивых теорий или систем уравнений, то более вероятно решение, которое соответствует минимуму диссипации энергии и максимуму расхода. При этих допущениях

$$\Delta P^* = \frac{\rho \cdot (W_{R0}^2 - W_{R1}^2)}{2 \cdot (1 - k)} \quad (6)$$

Минимуму потерь соответствует  $k=0$ . При этом полное давление уменьшается только за счет уменьшения скоростного напора.

Так как на длине  $l$  динамическое давление уменьшается, а статическое нет, в соответствии с (3) уменьшается диаметр ВС. Из-за этого в приосевой части возникает продольный градиент статического давления и возникает обратный ток жидкости, имеющей меньший момент количества движения по сравнению с прямым потоком. При взаимодействии прямого и обратного потоков в приосевой зоне происходит снижение окружной скорости относительно закона «свободного вихря».

Другой крайний случай - когда  $k = \text{const} = P_{R0} / P_{R0}^*$ . Тогда в каждом сечении имеет место подобие скоростей и давлений, радиус воздушного столба не изменяется по длине, и нет условий для возникновения интенсивных обратных токов. Выше не рассматривались граничные условия в конце цилиндрического канала. Если на выходе канал открыт в атмосферу, возникнет интенсивное продольное течение и не будет выполнено исходное допущение. Второй вариант истечения в атмосферу – через отверстие (рис.1).

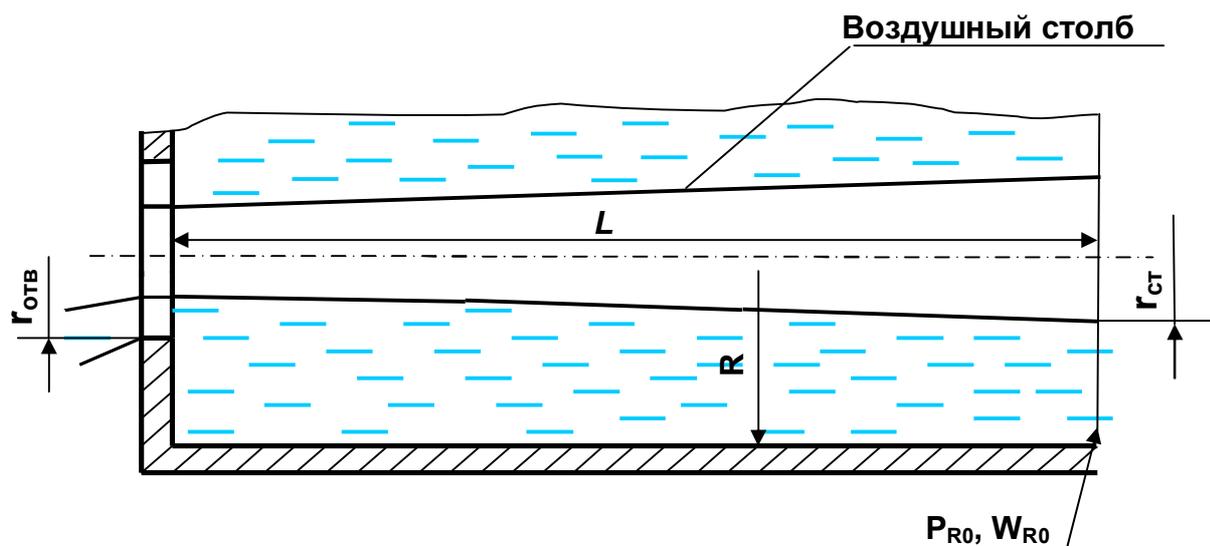


Рисунок 1 – Течение вращающейся жидкости в цилиндрическом канале с отверстием в торцевой стенке  $P_{R0}, W_{R0}$  – начальные значения давления и окружной скорости на периферии потока,  $R$  – радиус цилиндрического канала,  $r_{отв}$  и  $r_{ст}$  – радиусы отверстия и воздушного столба,  $L$  – длина расчетного участка

Расход через отверстие определяется с учетом положений теории центробежных форсунок [3]:

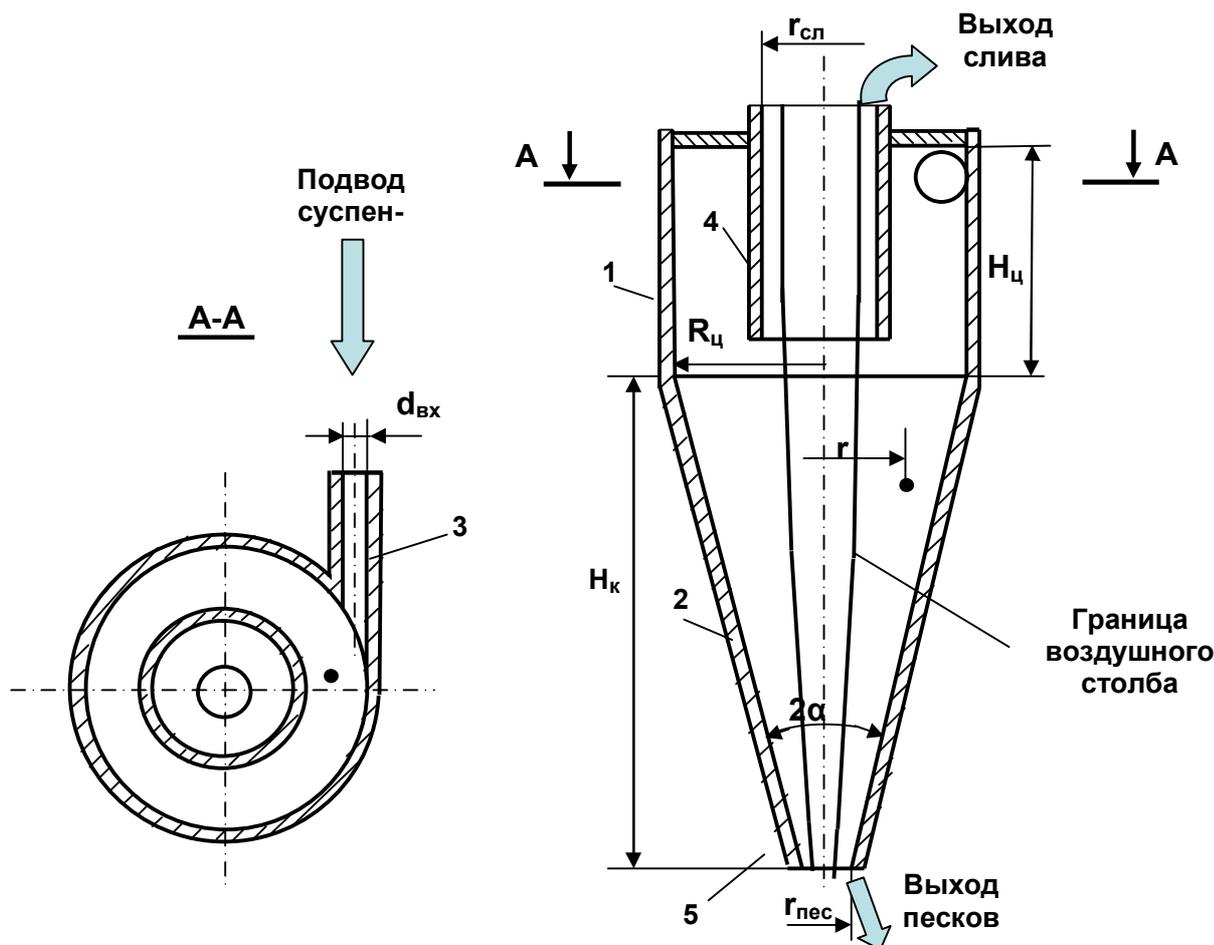
$$Q = \mu \cdot F \sqrt{\frac{2P_1^*}{\rho}}, \quad (7)$$

где коэффициент расхода  $\mu = \sqrt{\frac{\varphi^3}{2 - \varphi}}$ ,

$\varphi = 1 - \left(\frac{r_{cm1}}{R}\right)^2$  – коэффициент живого сечения (доля сечения отверстия, заполненного жидкостью).

Расход имеет максимум при минимальном диаметре воздушного столба, т.е. при  $k=0$ . Из совместного решения уравнений (3) и (5)...(7) можно при отсутствии учета трения на торцевой стенке приближенно определить скорость и полное давление перед торцевой стенкой, диаметр воздушного столба и расход жидкости.

Учет трения на поверхности позволил значительно снизить погрешность расчета гидроциклонов (ГЦ)– аппаратов с вращающимся потоком суспензии для очистки ее от твердых включений (рис.2). В ряде случаев суспензию можно рассматривать как ньютоновскую жидкость, отличающуюся от дисперсионной среды только повышенной плотностью и вязкостью. Несмотря на огромное число опубликованных работ, среднеквадратичная погрешность расчета зависимости расхода ГЦ от геометрических параметров составляет для лучших методик 20-25% по общему расходу и  $\approx 50\%$  по расходу в нижний слив.



**Рисунок 2 – Схема гидроциклона**

1 – цилиндрическая часть корпуса, 2 – коническая часть корпуса,  
 3 – тангенциальный подвод, 4 – сливной патрубков,  
 5 – песковое (шламовое) отверстие,  $R$ –радиус стенки  
 (наружный радиус потока),  $r_{сл}$  и  $r_{пес}$ – радиусы сливного  
 и пескового отверстий,  $d_{вх}$  - диаметр входного отверстия,  
 $H_ц$  и  $H_к$  – высота цилиндрической и конической части,  
 $\alpha$  – угол,  $r$  – текущее значение радиуса

При прочих равных условиях расход, особенно в нижний слив, возрастает с ростом шероховатости поверхности. Так, при увеличении искусственно заданной шероховатости с 2 до 170 мкм экспериментально зафиксировано увеличение расхода в нижний слив в 11 раз, что обусловлено уменьшением диаметра воздушного столба. Его диаметр в сечении верхнего слива составляет обычно 60-70 % диаметра отверстия. Диаметр нижнего слива часто в 2-4 раза меньше, чем диаметр верхнего, и истечение в нижний слив возможно только за счет уменьшения диаметра столба книзу.

В монографии [4] решается задача о взаимодействии вихря с торцевой плоскостью. В ГЦ вместо торцевой стенки имеется конус, а закон «свободного вихря» не соблюдается. Радиальное распределение окружных скоростей, по экспериментальным данным, можно аппроксимировать степенной функцией

$$W_{\varphi} = W_{\varphi R} \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^n, \quad (8)$$

где, по экспериментальным данным разных авторов,  $n = 0,3 \dots 0,8$ . При  $n = 1$  выражение (8) переходит в закон «свободного вихря». При  $n < 1$  полное давление снижается к оси пропорционально отклонению  $n$  от единицы:

$$P^*(r) = P_R^* - (1-n) \cdot \frac{\rho W_R^2}{2n} \cdot \left( \left(\frac{R}{r}\right)^{2n} - 1 \right) \quad (9)$$

Величина  $n$  определялась из условия равенства потерь на поверхности  $N_{mp} = \int_F \frac{\lambda}{8} \rho W^3 dF$  потерям мощности потока от входа (на периферии) до выходных отверстий за счет отклонения  $n$  от единицы  $\Delta N = \Delta P^* \cdot Q$ , где  $Q$  – расход питания [6,7]. Предполагалось, что окружная скорость на периферии изменяется по высоте, но показатель степени не меняется.

Из многочисленных экспериментальных данных известно, что закрученный поток после входа в ГЦ движется к основанию конуса. В конической части поток постепенно разворачивается в сторону верхнего слива. Условно считаем, что расход уменьшается от расхода питания до расхода в нижнее сливное отверстие по степенному закону с показателем степени

$$q = \log \frac{Q}{Q_n} / \log \frac{R}{R_n}.$$

Начальное значение давления и окружной скорости потока у основания конуса полагались известными.

Изменение полного давления при движении вдоль конической образующей на участке  $dL = \frac{dR}{\sin(\alpha/2)}$  складывается из изменения полного давления за счет трения в соответствии с (4) и изменения полного давления за счет отклонения окружной скорости в радиальном направлении в соответствии с (9) от закона «свободного вихря» ( $n < 1$ ).

Изменение статического давления на этом же участке складывается из изменения за счет действия центробежных сил и доли  $k$  статической составляющей в потерях полного давления. С учетом этого получена следующая система дифференциальных уравнений:

$$dP^* = - \left[ (1-n) \cdot \frac{\rho \cdot W_R^2}{R} + \frac{\lambda \cdot \pi \cdot \rho}{4 \sin \alpha} \cdot \frac{R \cdot W_R^3}{a \cdot R^q} \right] \cdot dR$$

$$dP = - \frac{\rho \cdot W_R^2}{R} \cdot dR + kdP^*$$

$$dP^* - dP = \rho W_R dW_R$$

Анализ уравнений показывает, что при  $k=0$  имеет место наибольшее уменьшение диаметра воздушного столба к вершине конуса. Одновременно при  $k=0$ , как показано выше, потери полного давления принимают минимальное значение. При этом на радиусе нижнего слива одновременно получают максимальное значение полного давления и минимальный диаметр воздушного столба, а, следовательно, и максимальный расход. При  $k=0$  можно исключить давление и получить уравнение, связывающее скорость у конической поверхности и радиус поверхности:

$$\rho \cdot W_R \cdot dW_R = (1-n) \cdot \frac{\rho \cdot W_R^2}{R} dR + \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \rho \cdot R \cdot W_R^3}{\text{Sin}(\alpha/2) \cdot a \cdot R^q} dR - \frac{\rho \cdot W_R^2}{R} dR$$

После сокращения на  $\rho W_R$  и замены переменной  $X = W_R \cdot R^{q-1}$  получается уравнение, относящееся к классу дифференциальных уравнений Бернулли. Решение этого уравнения

$$W_R = \frac{n+q-2}{\frac{n+q-2}{W_{R0}} \cdot \left(\frac{R}{R_0}\right)^n + \left(R^{2-q} - \frac{R^n}{R_0^{n+q-2}}\right) \cdot \frac{\lambda \cdot \pi}{4a \text{Sin}(\alpha/2)}} \quad (10)$$

При  $k=0$  вблизи стенки  $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$ . При этом можно определить статическое давление на срезе нижнего слива, интегрируя изменение давления от действия центробежных сил вдоль образующей конуса как в радиальном направлении:

$$P_n = P_0 - \int_{R_n}^{R_0} \rho \frac{W_R^2}{R} dR \quad (11)$$

При известных значениях статического давления и скорости на радиусе нижнего слива с помощью (7) определяется расход в нижний слив.

Несмотря на то, что (10) и (11) определяют параметры только у поверхности конуса, с помощью (8) и (9) можно в любом поперечном сечении определить распределение скоростей и давлений по радиусу, а также радиус воздушного столба и таким образом определить параметры в объеме потока конической зоны. С учетом приведенных уравнений была составлена математическая модель течения однородной жидкости в гидроциклоне, основанная на балансе потерь в пограничном слое и ядре потока с привлечением принципа наибольшего расхода. Данная модель, не содержащая никаких эмпирических соотношений, за исключением общеизвестных выражений для коэффициента гидравлического трения  $\lambda$ , позволила повысить точность расчета расходных параметров гидроциклонов. В частности, среднеквадратичная погрешность расчета расхода в нижний слив снизилась по сравнению с наиболее точной методикой [5] с 55% до 33% (по экспериментальным параметрам 40 различных ГЦ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В некоторых частных случаях можно описывать изменение параметров при течениях потоков в каналах через касательные напряжения на стенке, определяемые из уравнения Дарси. Наиболее корректен такой подход для автомоделных течений. Если возможно несколько непротиворечивых моделей, согласных с законами сохранения и связями, наложенными на систему, в соответствии с принципом минимума диссипации энергии следует выбирать решение, дающее наибольшее значение расхода.

Подход с определением потерь полного давления от трения в пограничном слое успешно применен к гидроциклонам, для которых существующие методики расчета не учитывают трение на развитой поверхности аппарата. Радиальный закон распределения окружных скоростей аппроксимировался такой степенной функцией, при которой потеря механической мощности из-за трения на твердых границах потока равна потере мощности потока от входного до выходных отверстий из-за отклонения профиля окружных скоростей от закона «свободного вихря». При этом не учитывались дополнительные потери после отрыва, поэтому предложенный метод можно считать упрощенным вариантом модели с идеальной жидкостью в ядре потока и вязким пограничным слоем. В гидроциклонах с малым содержанием твердой фазы потери в пограничном слое по расчетным оценкам составляют больше половины всех потерь, поэтому даже простейший их учет, описанный в настоящей работе, позволил снизить погрешность расчета относительно более теоретически точных моделей, не учитывающих трение в пограничном слое.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973.
2. Моисеев, Н.Н. Алгоритмы развития / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1987.
3. Дитякин, Ю.Ф. Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, В.И. Ягодкин / М.: Машиностроение, 1977.
4. Гольдштик, М.А. Вихревые потоки / М.А. Гольдштик. – Новосибирск.: Наука, Сибирское отделение, 1981.
5. Терновский, И.Г. Графоаналитический метод расчета гидроциклонов / И.Г. Терновский // Теоретические основы химической технологии. – 1991. – №3.
6. Валюхов, С.Г. О гидродинамических парадоксах гидроциклонов / С.Г. Валюхов, В.В. Ходус // Конверсия в машиностроении. – 2006. – №6.
7. Ходус, В.В. Повышение точности расчета гидроциклонов за счет учета взаимодействия пограничного слоя с ядром потока / В.В. Ходус // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. – №2.

### **Копылов Юрий Романович**

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. 8 (4732) 93-09-29

### **Ходус Виталий Викторович**

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
соискатель кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. 8 (4732) 93-09-29  
E-mail: Vit-khodus@yandex.ru

Y.R. KOPYLOV, V.V. HODUS

## **DETERMINATION OF PARAMETERS OF HELICAL FLOWS IN CHANNELS THROUGH THE SHEAR STRESSES ON THE SURFACE USING THE PRINCIPLE OF MINIMUM ENERGY DISSIPATION**

*For turbulent flows in channels attached power losses due to friction is concentrated in the boundary layer. The magnitude of loss is determined by integrating over the surface of the product of shear stress on the speed outside the boundary layer. Distribution of total pressure losses between the static and dynamic components of the total pressure is determined using the principle of maximum flow. The proposed approach is used to calculate the flow in hydrocyclones.*

**Key words:** shear stress of friction, a hydrocyclone, the loss of total pressure, boundary layer, the principle of maximum flow.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Lojcjanskij, L.G. Mehanika zhidkosti i gaza / L.G. Lojcjanskij. – М.: Nauka, 1973.
2. Moiseev, N.N. Algoritmy razvitija / N.N. Moiseev. – М.: Nauka, 1987.
3. Ditjakin, Ju.F. Raspylivanie zhidkостей / Ju.F. Ditjakin, L.A. Kljachko, B.V. Novikov, V.I. Jagodkin / М.: Mashinostroenie, 1977.
4. Gol'dshtik, M.A. Vihrevye potoki / M.A. Gol'dshtik. – Novosibirsk.: Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1981.
5. Ternovskij, I.G. Grafoanaliticheskij metod rascheta gidrociklonov / I.G. Ternovskij // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii. – 1991. – №3.
6. Valjuhov, S.G. O gidrodinamicheskikh paradokсах gidrociklonov / S.G. Valjuhov, V.V. Hodus // Kon-versija v mashinostroenii. – 2006. – №6.
7. Hodus, V.V. Povyshenie tochnosti rascheta gidrociklonov za schet ucheta vzaimodejstvija pogranično-go sloja s jadrom potoka / V.V. Hodus // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2009. – №2.

### **Kopylov Yury Romanovich**

Voronezh state technical university, Voronezh  
Doctor of technical science, professor of department “Mechanical engineering technology”  
Tel.: 8-4732-93-09-29

### **Khodus Vitaliy Viktorovich**

Voronezh state technical university, Voronezh  
Doctoral candidate of department “Mechanical engineering technology”  
Tel.: 8-4732-93-09-29  
E-mail: vit-khodus@yandex.ru

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ТВЕРДОСПЛАВНОЙ ВОЛОКИ, ПОДКРЕПЛЕННОЙ КОЛЬЦОМ

*На основе модели шероховатой поверхности трения и принципа равнопрочности проведен теоретический анализ по определению функции натяга для соединения подкрепляющего кольца с твердосплавной волокой, обеспечивающей минимизацию напряжений во внутреннем контуре волоки. Считается, что волока нагружена силовой и тепловой нагрузкой. Найденный натяг запрессовки обеспечивает повышение несущей способности твердосплавной волоки.*

**Ключевые слова:** *твердосплавная волока; подкрепляющее кольцо; натяг запрессовки; шероховатая внутренняя поверхность волоки; нормальная и касательная нагрузки; температурные напряжения.*

При волочении проволоки и прутков круглого сечения используется расчетная схема собранного с натягом многокомпонентного кольца под давлением. Как известно, температура поверхностных слоев волоки при волочении повышается под влиянием контактного трения. При наличии большого перепада температур по сечению волоки резко изменяется характер напряженного состояния. В сочетании с растягивающими напряжениями от усилия волочения создается «жесткая» схема напряженного состояния, приводящая к разрушению твердосплавного инструмента. Опыт показывает [1, 2], что при этом разрушение твердосплавных волок с подкрепляющим кольцом происходит часто из-за одной или двух краевых диаметральных трещин, образующихся на границе рабочей и калибрующей зон. В связи с этим представляет теоретический и практический интерес разработка эффективной расчетной методики по снижению уровня напряженного состояния волоки с кольцом.

Рассмотрим обратную задачу термоупругости для волоки с подкрепляющим кольцом. Пусть требуется определить натяг для запрессовки подкрепляющего кольца твердосплавной волоки с учетом действия нормальной и касательной к внутреннему контуру нагрузок и температурных напряжений. Принято, что внутренний контур отверстия волоки близок к круговому. Отнесем двухкомпонентное кольцо к полярной системе координат  $r\theta$ , выбрав начало координат в центре концентрических окружностей  $L_0, L, L_2$  с радиусами  $R_0, R, R_2$  (рис. 1).

Рассмотрим некоторую реализацию шероховатой внутренней поверхности волоки. При волочении на внутренней поверхности волоки на площадке контактного трения с проволокой (заготовкой) действует поверхностный источник тепла, вызванный внешним трением. Касательные усилия  $\tau = fp$  ( $p$  – давление на внутренней поверхности волоки,  $f$  – коэффициент трения пары волока–заготовка) способствуют тепловыделению в зоне контакта инструмента и заготовки в процессе волочения. Причем общее количество тепла в единицу времени пропорционально мощности трения. В результате такого взаимодействия происходит повышение температуры волоки.

В случае установившегося теплообмена определение температурного поля в волоке и кольцевой оправе можно свести к решению следующей сопряженной краевой задачи в волоке

$$\Delta T = 0 \quad (1)$$

в подкрепляющем кольце

$$\Delta T_0(r, \theta) = 0 \quad (2)$$

$$\text{при } r = R \quad T_0 = T; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial n} \quad (3)$$

$$\text{при } r = \rho \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -Q(\theta) \quad \text{на контактной площадке} \quad (4)$$

$$\text{при } r = R_2 \quad \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial n} + \alpha_2(T_0 - T_2) = 0 \quad (5)$$

где  $T$  и  $T_0$  – соответственно температура в упругой изотропной волоке и кольцевой оправе;  
 $\lambda, \lambda_0$  – соответственно, коэффициенты теплопроводности волоки и оправы;  
 $\Delta$  – оператор Лапласа;  
 $T_2$  – температура окружающей среды;  
 $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи с наружной цилиндрической поверхности оправы с внешней средой;  
 $Q(\theta)$  – интенсивность поверхностного источника тепла, приходящегося на волоку.

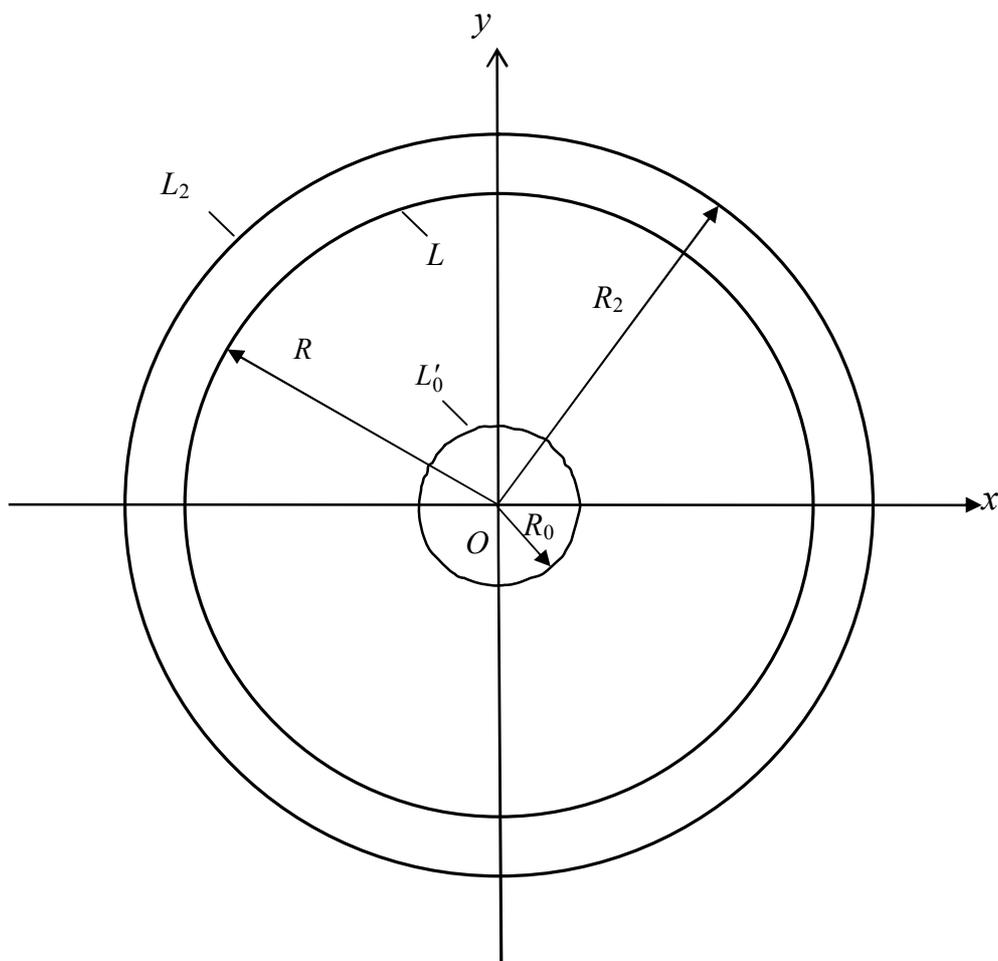


Рисунок 1 – Расчетная схема волоки с подкрепляющим кольцом

Для функции  $Q(\theta)$  имеем

$$Q(\theta) = \alpha f p V$$

где  $V$  – скорость волочения;

$\alpha$  – коэффициент распределения теплового потока для волоки.

Краевые условия задачи о подкреплении волоки кольцом имеют вид

$$\begin{aligned} \text{при } r=\rho(\theta) \quad \sigma_n &= -p; \quad \tau_m = -fp; \\ \text{при } r=R_2 \quad \sigma_r &= 0; \quad \tau_{r\theta} = 0; \\ \text{при } r=R \quad \sigma_r^0 - i\tau_{r\theta}^0 &= \sigma_r^b - i\tau_{r\theta}^b; \quad v_r^0 - iv_\theta^0 = v_r^b - iv_\theta^b - g(\theta). \end{aligned} \quad (6)$$

Представим границу внутреннего контура  $L'_0$  волоки в следующем виде

$$\rho = R_0 + \varepsilon H(\theta), \quad H(\theta) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos k\theta + b_k \sin k\theta) \quad (7)$$

где  $\varepsilon = R_{\max}/R_0$  – малый параметр;

$R_{\max}$  – наибольшая высота (впадины) неровности профиля внутреннего контура

от окружности  $r=R_0$ .

Температуру в волоке и оправе ищем в виде

$$T = T^{(0)} + \varepsilon T^{(1)} \dots$$

$$T_0 = T_0^{(0)} + \varepsilon T_0^{(1)} \dots$$

в которых пренебрегаем, для простоты, членами содержащими малый параметр  $\varepsilon$  в степени выше первой. Здесь  $T^{(0)}, T_0^{(0)}$  – температуры нулевого приближения, а  $T^{(1)}, T_0^{(1)}$  – соответственно, температуры первого приближения. Каждое из приближений удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа (теории теплопроводности). Значения составляющих температуры при  $r=\rho(\theta)$  найдем, разлагая в ряд выражения температуры в окрестности  $r=R_0$ . В каждом приближении решение задачи теплопроводности ищется методом разделения переменных. Распределение температуры в волоке и кольце найдено в [3]. После определения температуры в волоке и кольце можно перейти к решению задачи термоупругости. Используем принцип суперпозиции. Решение задачи термоупругости можно представить в виде суммы

$$\sigma_r^{(0)} = \sigma_r^{(0)u} + \sigma_r^{(0)T}, \quad \sigma_\theta^{(0)} = \sigma_\theta^{(0)u} + \sigma_\theta^{(0)T}, \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = \tau_{r\theta}^{(0)u} + \tau_{r\theta}^{(0)T}, \quad (8)$$

$$\sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(1)u} + \sigma_r^{(1)T}, \quad \sigma_\theta^{(1)} = \sigma_\theta^{(1)u} + \sigma_\theta^{(1)T}, \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = \tau_{r\theta}^{(1)u} + \tau_{r\theta}^{(1)T}$$

где первые слагаемые представляют напряжения в случае изотермической задачи, а вторые слагаемые есть температурные напряжения.

Методом степенных рядов [4] получили решение изотермической задачи и задачи о температурных напряжениях. Ниже приводятся соотношения для нормального тангенциального напряжения, которое понадобится для решения задачи оптимального проектирования

$$\sigma_\theta^{(0)T} = A_1^0 - \frac{A_2^0}{\rho^2} - \alpha E T^{(0)} + \frac{\alpha E}{\rho^2} \left\{ C_1^0 \left( \frac{\rho^2 - \rho_0^2}{2} \right) + C_2^0 \left( \frac{\rho^2}{2} (\ln \rho - 1) - \frac{\rho_0^2}{2} (\ln \rho_0 - 1) \right) \right\}$$

где  $\rho=r/R; \rho_0=R_0/R$ .

Постоянные  $A_1^0, A_2^0$  определяются из краевых условий задачи о температурных напряжениях в нулевом приближении.

$$\sigma_\theta^{(1)T} = \left( 6Ar + \frac{2B}{r^3} - \frac{B_1}{r} \right) (b_1 \cos \theta + d_1 \sin \theta)$$

$$\text{Здесь } b_1 = C_2^{(1)}; d_1 = A_2^{(1)}; B_1 = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha G; B_1^0 = \frac{1+\mu_0}{1-\mu_0} \alpha_0 G_0.$$

Постоянные  $A, B$  определяются из краевых условий задачи о температурных напряжениях в первом приближении.

$$\sigma_\theta^{(0)u} = p + 2 \left\{ d_0 + \bar{d}_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} R_0^k (d_k + \bar{d}_k) \cos k\theta + 2 \sum_{k=1}^{\infty} R_0^{-k} (d_{-k} + \bar{d}_{-k}) \cos k\theta + \right. \quad (9)$$

$$\left. + 2i \sum_{k=1}^{\infty} \left[ R_0^{-k} (\bar{d}_{-k} - d_{-k}) - R_0^k (d_k - \bar{d}_k) \right] \sin k\theta \right\}.$$

$$\sigma_\theta^{(1)u} = 2 \left\{ d_0^{(1)} + \bar{d}_0^{(1)} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} R_0^k (d_k^{(1)} + \bar{d}_k^{(1)}) \cos k\theta + 2 \sum_{k=1}^{\infty} R_0^{-k} (d_{-k}^{(1)} + \bar{d}_{-k}^{(1)}) \cos k\theta + \right. \quad (10)$$

$$\left. + 2i \sum_{k=1}^{\infty} \left[ R_0^{-k} (\bar{d}_{-k}^{(1)} - d_{-k}^{(1)}) - R_0^k (d_k^{(1)} - \bar{d}_k^{(1)}) \right] \sin k\theta \right\}.$$

В формуле (9) коэффициенты  $d_k$  зависят от величин  $A_k^{H0}$  ряда Фурье искомой функции  $g^{(0)'(\tau)}$  натяга в нулевом приближении. Аналогично, в формуле (10) коэффициенты  $d_k^{(1)}$  зависят от величин  $A_k^{H(1)}$  ряда Фурье искомой функции  $g^{(1)'(\tau)}$  натяга в первом приближении.

Для построения недостающих уравнений, позволяющих определить коэффициенты  $A_k^{H0}$ ,  $A_k^{H(1)}$  требуем, чтобы обеспечивалась минимизация напряжений во внутреннем контуре волокна. Снижение концентрации напряжений, т.е. оптимальное проектирование твердосплавной волокна осуществляется путем минимизации критерия

$$\sum_{i=1}^M [\sigma_{\theta}(\theta_i) - \sigma]^2 = U \rightarrow \min \quad (11)$$

где

$$\sigma_{\theta}|_{r=\rho} = \sigma_{\theta}|_{r=R_0}^{(0)} + \varepsilon \left[ \frac{\partial \sigma_{\theta}^{(0)}}{\partial r} H(\theta) + \sigma_{\theta}^{(1)} \right]_{r=R_0},$$

$\sigma$  – оптимальное значение нормального тангенциального напряжения во внутреннем контуре волокна, подлежащее определению в процессе решения задачи оптимизации.

Разбиваем отрезок  $[0, 2\pi]$  на  $M$  равных частей. В узлах разбиения  $\theta_i$  вычисляем значения функции  $\sigma_{\theta}(\theta_i)$ . Функция  $U$  представляет собой функцию, линейно зависящую от управляющих переменных  $A_k^{H0}$ ,  $A_k^{H(1)}$  и  $\sigma$ . Согласно методу наименьших квадратов наилучшими коэффициентами  $A_k^{H0}$ ,  $A_k^{H(1)}$  и  $\sigma$  считаются те, для которых функция  $U$  будет принимать минимальные значения. Используя необходимое условие экстремума функции нескольких переменных, получаем бесконечную линейную систему уравнений для определения величин  $\sigma$ ,  $A_k^{H0}$ ,  $A_k^{H(1)}$

$$\frac{\partial U}{\partial \sigma} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial A_k^{H0}} = 0; \quad \dots; \quad \frac{\partial U}{\partial A_k^{H(1)}} = 0 \quad (k=0,1,2,\dots); \quad (12)$$

Система уравнений (12) упрощается, так как функция  $\sigma_{\theta}(\theta, A_k^{H0}, A_k^{H(1)})$  линейны относительно параметров  $A_k^{H0}$  и  $A_k^{H(1)}$ . Система уравнений (12) позволяет определить оптимальный натяг подкрепления волокна, напряженно-деформированное состояние волокна и обоймы, а также оптимальное значение нормального тангенциального напряжения во внутреннем контуре волокна. Для численной реализации изложенного способа были проведены расчеты методом Гаусса с выбором главного элемента. В рассматриваемой задаче имеется много параметров. Это различные механические характеристики материалов, параметры качества поверхности внутреннего контура волокна, давление на внутреннем контуре, геометрические размеры волокна и оправы. Поэтому форма волок бралась №9, 11, 13 (ГОСТ 9453-75) [1]. Внутренне давление  $p$  изменяли в пределах 392-1960 МПа с шагом 196 МПа. Механические характеристики материала волокна (твердый сплав ВК6) и оправы (среднеуглеродистая сталь) принимались равными  $E=6,28 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu=0,22$  и  $E_0=2,06 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu_0=0,28$ . Для волокна формы №9 было принято  $2R_2=40$  мм;  $2R=15,5$  мм;  $2R_0=3,0$  мм. Для волокна формы №11 было принято  $2R_2=50$  мм;  $2R=21,5$  мм;  $2R_0=3,2$  мм. Для волокна формы №13 было принято  $2R_2=65$  мм;  $2R=29,5$  мм;  $2R_0=5,7$  мм. Коэффициент трения был принят  $f=0,05$ . При расчетах применяли метод редукции. Бесконечные системы урезались до пяти уравнений. Результаты расчетов коэффициентов разложения функции натяга  $g(\theta)$  приведены в таблицах 1, 2 (значения коэффициентов даны в мм). Исследование показало, что подкрепляющее кольцо значительно увеличивает предельные значения допустимых давлений по сравнению со случаем отсутствия подкрепления.

Полученная система уравнений позволяет численными методами на стадии проектирования выбирать оптимальные параметры функции натяга для запрессовки подкрепляющей обоймы волокна, обеспечивающие равномерное распределение напряжений на внутреннем контуре.

Таблица 1 – Коэффициенты разложения функции натяга при  $p=392$  МПа

Форма волокни	$A_2^H$	$A_1^H$	$A_0^H$	$A_{-1}^H$	$A_{-2}^H$
9	-0,034	0,042	0,082	0,042	0,014
11	-0,038	0,044	0,087	0,031	0,015
13	-0,048	0,052	0,093	0,029	0,018

Таблица 2 – Коэффициенты разложения функции натяга при  $p=784$  МПа

Форма волокни	$A_2^H$	$A_1^H$	$A_0^H$	$A_{-1}^H$	$A_{-2}^H$
9	-0,042	0,054	0,093	0,051	0,018
11	-0,044	0,058	0,110	0,049	0,020
13	-0,051	0,061	0,118	0,046	0,023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самойлов, В.С. Металлообрабатывающий твердосплавный элемент / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
2. Каменев, Н.М. Особенности разрушения твердосплавных волок / Н.М. Каменев, Л.И.Александрова, В.И. Белопицкий, В.И. Ведерников // Сверхтвердые материалы. – 1981. – №5. – С. 44-48.
3. Велиев, Ф.Э. Определение температурного поля в твердосплавной волоке, подкрепленной оправой / Ф.Э. Велиев // Elmi əsərlər – fundamental əsərlər. – 2010. – №4. – С. 86-89.
4. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.

**Велиев Фарид Эльхан оглы**

Азербайджанский Технический университет, г.Баку

аспирант

E-mail: f.valiev@hotmail.com

тел. + (994) 55-511-51-29

F.E. VELIYEV

## INVERSE PROBLEM THERMOELASTICITY FOR HARD ALLOY DRAWING DIE, SUPPORTED BY RING

*Based on the model of rough surface friction and the equalstrength principle a theoretical analysis on the determination of tightness for connecting reinforcing ring with a hard alloy drawing die, provides a minimum of stress on the inner circuit dies has been performed. It is believed that hard alloy drawing die loaded with force and heat load. Found preload mounting enhances the bearing capacity of a hard alloy drawing die.*

**Keywords:** *hard alloy drawing die; reinforcing ring; mounting tightness; roughness of the inner surface of the dies; the normal and tangential loads; thermal stresses.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Samojlov, V.S. Metalloobrabatyvajuviy tverdosplavnyy jelement / V.S. Samojlov, Je.F. Jehmans, V.A. Fal'kovskij i dr. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 368 s.
2. Kamenev, N.M. Osobennosti razrusheniya tverdosplavnyh volok / N.M. Kamenev, L.I.Aleksandrova, V.I. Belolipeckij, V.I. Vedernikov // Sverhtverdye materialy. – 1981. – №5. – S. 44-48.
3. Veliev, F.Je. Opredelenie temperaturnogo polja v tverdosplavnoj voloke, podkreplennoj opravoj / F.Je. Veliev // Elmi əsərlər – fundamental əsərlər. – 2010. – №4. – S. 86-89.
4. Mushelishvili, N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti / N.I. Mushe-lishvili. – М.: Nauka, 1966. – 707 s.

**Veliyev Farid Elkhan oglu**

Azerbaijan Technical University, Baku

Postgraduate student

Tel. + (994) 55-511-51-29

E-mail: f.valiev@hotmail.com

Д.Н. ЕШУТКИН, А.В. ЖУРАВЛЕВА, А.В. ГОРИН

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДА СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ БЕСТРАНШЕЙНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ТРУБОПРОВОДОВ

*Рассмотрено модельное представление работы статико-динамических машин для бестраншейного строительства трубопроводов. Предложена математическая модель, позволяющая оценить режимы движения статико-динамической машины.*

**Ключевые слова:** статико-динамическая машина, движение, вибрация, фазы движения, математическая модель.

К числу основных требований, предъявляемых к гидравлическим статико-динамическим машинам для бестраншейного строительства трубопроводов в стеснённых городских условиях относятся малая энергоёмкость строительства, щадящее воздействие на близлежащие социальные и производственные объекты города. Наибольшее влияние на предъявляемые требования оказывают режимы движения статико-динамической машины.

В настоящей работе рассмотрено движение гидравлической статико-динамической машины для бестраншейного строительства трубопроводов типа СДМ 1, которая была разработана совместными усилиями кафедры «Теоретической и прикладной механики» и научно-исследовательской лаборатории «Импульсные технологии».

Расчётная схема динамической модели привода напорного механизма с периодическими импульсными воздействиями представлена на рис. 1.

Объёмный гидравлический насос подаёт рабочую жидкость в напорную магистраль с постоянной производительностью  $Q_0 = const$ . Приведённая к напорному гидроцилиндру (или двум гидроцилиндрам) скорость жидкости равна

$$V_0 = \frac{Q_0}{S_p}$$

где  $S_p$  – активная площадь напорного гидроцилиндра.

Упругие свойства гидропередачи характеризуются её приведённой к напорному гидроцилиндру жёсткостью  $C$  [1]

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_{НА}} + \frac{1}{C_{Ж}} + \frac{1}{C_{НГ}}$$

где  $C_T$  – жёсткость упругих трубопроводов,

$C_{НА}$  – жёсткость гидроаккумулятора напорной магистрали,

$C_{Ж}$  – жёсткость жидкости,

$C_{НГ}$  – жёсткость напорного гидроцилиндра.

Масса рабочего органа  $m$  включает в себя массу трубы, напорного гидроцилиндра, ударного механизма и инструмента [2]. Участвующая в движении совместно с инструментом масса грунта учитывается с помощью коэффициента

$$\mu_{Г} = \frac{m_{ГР}}{m}$$

Тогда суммарная масса рабочего органа и грунта будет равна:

$$M = m + m_{ГР} = m(1 + \mu_{Г})$$

Упрощённый вид диаграммы сил сопротивления грунта представлен на рис.1. Принимаем, что сила сопротивления  $R_C$  изменяется по закону:

$$R_C = R_0 + C_1 X,$$

где  $C_1$  – жёсткость грунта

$R_0$  – начальная величина силы сопротивления.

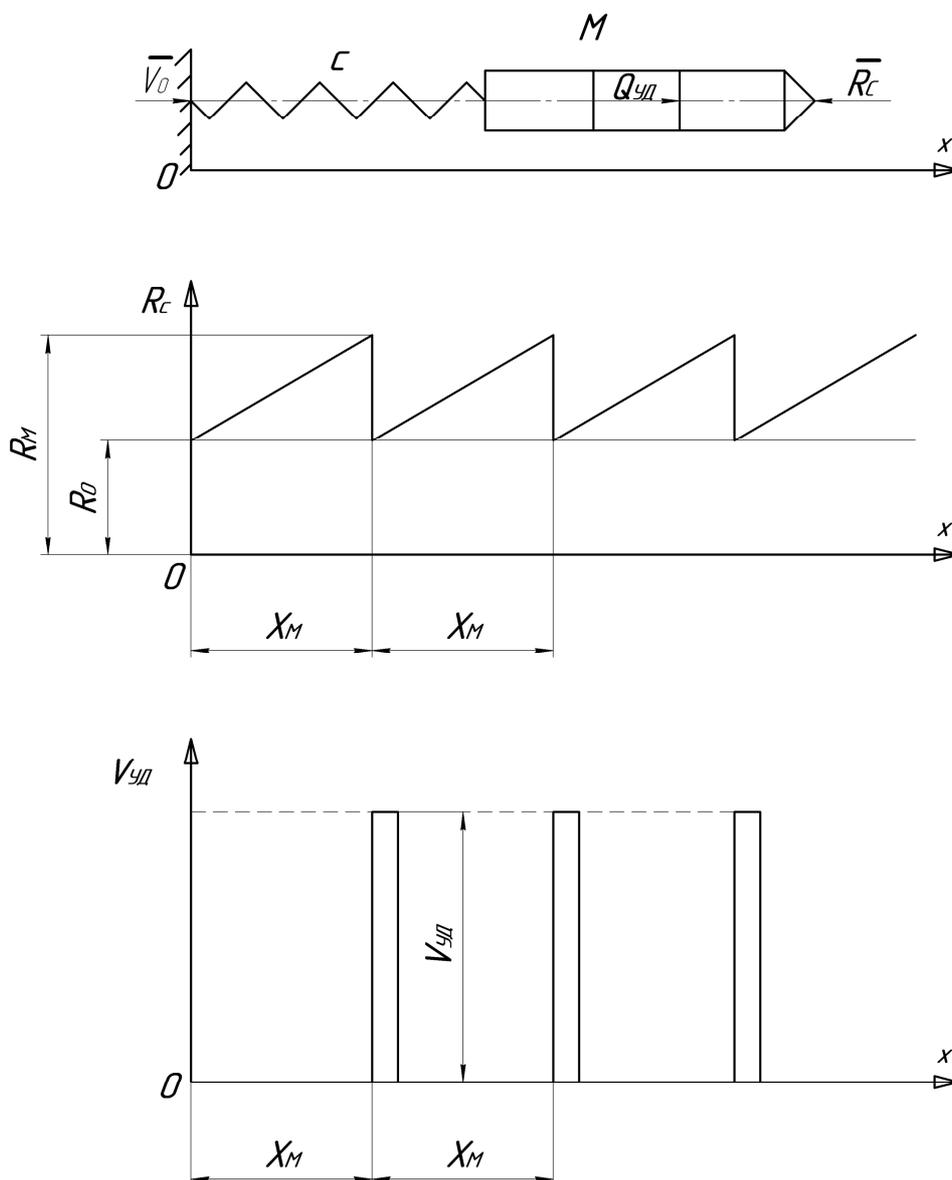


Рисунок 1 – Динамическая модель привода напорного механизма с периодическими импульсными воздействиями

Ударные импульсы величиной  $Q_{уд}$  передаётся на инструмент периодически в момент времени когда сила сопротивления достигает максимальной величины  $R_m$ , при этом рабочий орган получает (мгновенно) в направлении движения скорость  $V_{уд}$ .

Дифференциальное уравнение движения тела массой  $M$  будет иметь вид:

$$M\ddot{X} = (V_0 t - X)C - R_0 - C_1 X$$

Считаем, что движение начинается в момент времени  $t_0$ , когда усилие в напорном гидроцилиндре достигнет уровня  $R_0$ , т.е.  $R_0 = CV_0 t_0$ . Этот момент времени примем за начало отсчёта времени, тогда дифференциальное уравнение движения примет вид:

$$\ddot{X} + K^2 X = K_1^2 V_0,$$

где  $K^2 = \frac{C + C_1}{M}$ ,  $K_1^2 = \frac{C}{M}$ .

Общее решение дифференциального уравнения будем искать как сумму двух решений:

$$X = X_1 + X_2,$$

где  $X_1$  – общее решение однородного дифференциального уравнения

$X_2$  – частное решение неоднородного дифференциального уравнения

$$\ddot{X} + K^2 X = 0$$

Общее решение  $X_1$  представить в виде:

$$X_1 = c_1 \cos Kt + c_2 \sin Kt,$$

где  $c_1$  и  $c_2$  постоянные интегрирования.

Частное решение  $X_2$  примем в следующем виде:

$$X_2 = \frac{K_1^2}{K^2} V_0 t$$

$$\frac{K_1^2}{K^2} = \frac{C}{C + C_1} = C_0$$

Тогда общее решение примет вид:

$$X = c_1 \cos Kt + c_2 \sin Kt + C_0 V_0 t$$

$$\dot{X} = c_1 K \sin kt + c_2 K \cos kt + C_0 V_0$$

Рассмотрим (вариант) начало движения рабочего органа при нулевых начальных условиях, т.е. при  $t=0$   $X(0) = 0$  и  $\dot{X}(0) = 0$

Тогда

$$c_1 = 0,$$

$$c_2 = -\frac{C_0 V_0}{K}$$

В этом случае решения будут следующими:

$$X = C_0 V_0 t - \frac{C_0 V_0}{K} \sin t$$

$$\dot{X} = C_0 V_0 - C_0 V_0 \cos Kt$$

При этом сила, создаваемая рабочим органом, будет определяться по закону:

$$R = R_0 + C(V_0 t - X)$$

Из уравнения следует, что скорость инструмента изменяется по закону  $\dot{X} = C_0 V_0 (1 - \cos Kt)$  и может принимать нулевые значения при  $t = t_1$ ,  $\dot{X}(t_1) = 0$ , это будет соответствовать моментам времени когда  $\cos Kt_1 = 1$ , что означает

$$t_1 = \frac{2\pi}{K}; \frac{4\pi}{K}; \frac{6\pi}{K} \dots$$

Примем первое из этих значений  $t_1 = \frac{2\pi}{K}$ , тогда перемещение инструмента за это время составит:

$$X_M = C_0 V_0 \frac{2\pi}{K}, \text{ или } X_1 = 2\pi V_0 \frac{CM^{\frac{1}{2}}}{(C + C_1)^{\frac{3}{2}}}$$

Максимальная сила на инструменте

$$R_m = R_0 + C V_0 \frac{2\pi}{K} (1 - C_0)$$

Давление жидкости в напорном гидроцилиндре, соответствующее этому времени

$$P_m = \frac{R_m}{S_\Gamma}$$

Возможен следующий режим работы машины: в соответствии с настройкой реле давления на величину  $P_m$  в этот момент времени включается в работу ударный механизм и инструмент получает ударный импульс в направлении движения  $Q_{уд}$ , что сводится к получению им мгновенной скорости  $V_{уд}$ . Такой режим движения механизма назовём следящим приводом с обратной связью по давлению (СД). После получения ударного импульса сопротивления грунта уменьшается до уровня  $R_0$ , а его движение будет происходить в соответ-

вии с уравнением только при начальных условиях  $X(0) = 0$ ,  $\dot{X}(0) = V_{вд}$ , тогда постоянные интегрирования  $c_1$  и  $c_2$  будут следующими:

$$c_1 = 0, c_2 = \frac{V_{вд} - C_0V_0}{K}$$

Координаты и скорость инструмента будут изменяться по закону:

$$X = C_0V_0t + \frac{(V_{вд} - C_0V_0)}{K} \sin Kt \tag{1}$$

$$\dot{X} = C_0V_0 + V_{вд} \cos Kt - C_0V_0 \cos Kt \tag{2}$$

Сила давления жидкости в напорном гидроцилиндре:

$$R = R_0 + C \left[ V_0t(1 - C_0) + \frac{(V_{вд} - C_0V_0)}{K} \sin Kt \right] \tag{3}$$

Приравняв силу  $R$  к её максимальной величине, соответствующей уровню настройки реле давления, получим трансцендентное уравнение для определения времени движения  $t_2$  рабочего инструмента на этом участке:

$$V_0(1 - C_0) \left( t_2 - \frac{2\pi}{K} \right) = \frac{C_0V_0 - V_{вд}}{K} \sin Kt_2$$

Найдём зависимость для определения перемещения инструмента:

$$X_2 = V_0 \left[ \frac{2\pi}{K} (1 - C_0) + t_2 (2C_0 - 1) \right]$$

Скорость инструмента в момент времени  $t_2$  будет определяться по формуле:

$$\dot{X}(t_2) = C_0V_0 - \sqrt{(C_0V_0 - V_{вд})^2 - K^2V_0^2(1 - C_0)^2 \left( t_2 - \frac{2\pi}{K} \right)^2}$$

Из уравнения находим:

$$\sin Kt_2 = \frac{V_0(1 - C_0) \left( t_2 - \frac{2\pi}{K} \right) K}{(C_0V_0 - V_{вд})}$$

Откуда

$$\cos Kt_2 = \frac{\sqrt{(C_0V_0 - V_{вд})^2 - K^2V_0^2(1 - C_0)^2 \left( t_2 - \frac{2\pi}{K} \right)^2}}{(C_0V_0 - V_{вд})}$$

Тогда найдём скорость инструмента, соответствующую времени  $t_2$ .

Предположим такой режим работы (СДМ-1) при котором  $\dot{X}(t_2) = 0$ , это означает, что последующие движения инструмента будут периодически повторяться и происходить в соответствии с уравнениями (1) и (2). Условием выполнения такого режима работы будет следующее:

$$t_2 = \frac{2\pi}{K} \pm \frac{\sqrt{V_{вд}(V_{вд} - 2C_0V_0)}}{KV_0(1 - C_0)}$$

или

$$t_2 = \frac{1}{K} \left[ 2\pi \pm \frac{\sqrt{V_{вд}(V_{вд} - 2C_0V_0)}}{V_0(1 - C_0)} \right]$$

Производительность машины (скорость проходки скважины) при таком режиме работы:

$$V_{пп} = \frac{X_2}{t_2}$$

или с учётом предыдущих формул:

$$V_{\text{пр}} = V_0(2C_0 - 1) + \frac{2\pi V_0^2(1 - C_0)^2}{2\pi(1 - C_0) \pm \sqrt{V_{\text{уд}}(V_{\text{уд}} - 2C_0V_0)}}$$

Совокупность уравнений (1), (2) и (3) представляют математическую модель данного режима движения машины:

$$\begin{aligned} X &= C_0V_0t + \frac{(V_{\text{уд}} - C_0V_0)}{K} \sin Kt \\ \dot{X} &= C_0V_0 + V_{\text{уд}} \cos Kt - C_0V_0 \cos Kt \\ R &= R_0 + C \left[ V_0t(1 - C_0) + \frac{(V_{\text{уд}} - C_0V_0)}{K} \sin Kt \right] \end{aligned}$$

Используя предложенную математическую модель, проводится анализ движения гидравлической статико-динамической машины для бестраншейного строительства трубопроводов. Расчеты позволяют выбрать оптимальные режимы работы в зависимости от параметров отдельных частей привода.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ешуткин, Д.Н. Высокопроизводительные гидропневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций [Текст]: учебное пособие для вузов / Д.Н.Ешуткин, Ю.М.Смирнов, В.И.Цой, В.Л.Исаев. – М.: Стройиздат, 1990. – 171с., ил.
2. Ешуткин, Д.Н. Прикладная теория гидравлических машин ударного действия [Текст] : монография / Котылев Ю.Е., Ешуткин Д.Н.. – М.: Машиностроение - 1, 2007. – 176с., ил.

#### Ешуткин Дмитрий Никитович

ФГОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел  
Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»  
Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29  
Тел. (4862) 419846  
E-mail: termeh@ostu.ru

#### Журавлева Анжелика Викторовна

ФГОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел  
Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29  
Тел. (4862) 419872  
E-mail: termeh@ostu.ru

#### Горин Андрей Владимирович

ФГОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел  
Аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
Адрес: Россия, 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29  
Тел. 89102600267  
E-mail: termeh@ostu.ru

D.N. ESHUTKIN, A.V. ZHURAVLEVA, A.V. GORIN

## MODELLING OF STATIC DYNAMIC MACHINE DRIVE FOR PIPELINE DITCH-FREE TECHNIQUES

*Constructive features of the new propelled machines with hydraulically impulsive driver for non-trench pipelining are considered in this thesis. This developed mathematical model allows estimating a limiting mode of the case's movement.*

**Key words:** *hydraulic statodynamic machines, movement, vibration, phases of movement, mathematical model.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Eshutkin, D.N. Vysokoproizvoditel'nye gidropnevmaticheskie udarnye mashiny dlja prokladki in-zhenernyh kommunikacij [Tekst]: uchebnoe posobie dlja vuzov / D.N.Eshutkin, Ju.M.Smirnov, V.I.Coj, V.L.Isaev. – M.: Strojizdat, 1990. – 171s., il.

2. Eshutkin, D.N. Prikladnaja teorija gidravlicheskih mashin udarnogo dejstvija [Tekst] : monografija / Kotylev Ju.E., Eshutkin D.N.. – M.: Mashinostroenie - 1, 2007. – 176s., il.

**Eshutkin Dmitry Nikitovich**

State University – Education – Science - Production, Orel

Doc.Sc.Tech., the chief of faculties «Theoretical and applied mechanics», the professor

29 Naugorskoye shosse, Orel, Russia, 302020

Ph. (4862) 419846,

E-mail: termeh@ostu.ru

**Zhuravlyova Anzhelika Viktorovna**

State University – Education – Science - Production, Orel

Candidate Sc. Ph.-Math., the senior lecturer of faculty «Theoretical and applied mechanics»

29, Naugorskoye shosse, Orel, Russia, 302020

Ph. (4862) 419872,

E-mail: termeh@ostu.ru

**Gorin Andrei Vladimirovith**

State University – Education – Science - Production, Orel

Postgraduate student of faculties «Theoretical and applied mechanics»

29, Naugorskoye shosse, Orel, Russia, 302020

Ph. 89102600267,

E-mail: termeh@ostu.ru

С.И. МАТЮХИН, З.Ж. КОЗИЛ, Г.Р. МАГОМЕДОВ, Д.О. МАЛЫЙ, С.Н. РОМАШИН

## ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДГС РО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ AlGaAs ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ АЛЮМИНИЯ В ОБЛАСТИ ВОЛНОВОДА И ЭМИТТЕРОВ

*Методами компьютерного моделирования в пакете программ Sentaurus TCAD компании Synopsys исследовано влияние концентрации алюминия в волноводной и эмиттерных областях полупроводникового AlGaAs лазера с двойной гетероструктурой и отдельным ограничением (ДГС РО) на его вольт-амперную и ватт-амперную характеристики. Изучена зависимость от содержания алюминия в этих областях коэффициента полезного действия (КПД) лазерного диода и вертикальной расходимости лазерного излучения в области дальнего поля. Показано, что существуют оптимальные концентрации алюминия в волноводе и эмиттерах, при которых пороговый ток лазерной генерации будет минимальным, а КПД лазера – максимальным.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер на основе AlGaAs; двойная гетероструктура; отдельное ограничение; концентрация алюминия; вольт-амперная характеристика; ватт-амперная характеристика; коэффициент полезного действия; компьютерное моделирование; Sentaurus TCAD.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полупроводниковые лазеры находят применение в устройствах чтения и записи компакт-дисков (CD, DVD), телекоммуникации, в системах прецизионного измерения перемещений и спектроскопии высокого разрешения, для накачки твердотельных лазеров, а также в областях, связанных с обработкой материалов (резка, микросварка), и в медицине (лазерная хирургия, дерматология). При этом, начиная с 1990 г., практически все промышленные образцы полупроводниковых лазеров, по сути, являются инжекционными лазерами с двойной гетероструктурой и отдельным ограничением (ДГС РО) с квантово-размерной активной областью [1, 2].

Благодаря относительной простоте и отработанности технологии изготовления наибольшее распространение получили ДГС РО лазеры на основе GaAs, в которых в качестве широкозонных полупроводников используются твердые растворы  $Al_xGa_{1-x}As$ . Достижение пороговой плотности тока таких лазеров менее  $1 \text{ кА/см}^2$  при комнатной температуре открыло широчайшие перспективы их практического применения и послужило поворотным моментом в их производстве. Однако дальнейшее продвижение в этом направлении существенно осложняется проблемами, связанными с оптимизацией конструкции лазерных диодов и, в частности, с выбором ширины активной и волноводной области, значений мольной концентрации  $x$  алюминия в этих областях и в области эмиттеров, а также уровня легирования различных областей лазерного диода.

В настоящей работе методами компьютерного (имитационного) моделирования исследовано влияние концентрации алюминия в волноводной и эмиттерных областях полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs на его вольт-амперную (ВАХ) и ватт-амперную (ВтАХ) характеристики, а также на вертикальную расходимость лазерного излучения в области дальнего поля. Изучена зависимость от содержания алюминия в этих областях коэффициента полезного действия (КПД) лазерного диода. Показано, что существуют оптимальные концентрации алюминия в волноводе и эмиттерах, при которых пороговый ток лазерной генерации будет минимальным, а КПД лазера – максимальным.

### 2 МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования влияния концентрации алюминия в области волновода и эмиттеров на характеристики ДГС РО лазера на основе AlGaAs в настоящей работе использовался пакет программ приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD компании Synopsys [3], который позволяет моделировать все основные процессы твердотельной элек-

троники, объединять их в технологические маршруты, получать в результате произвольные приборные структуры и анализировать их электрофизические и схемотехнические параметры. Фактически этот пакет на практике реализует концепцию виртуального производства и позволяет существенно сократить расходы на проектирование и разработку технологических маршрутов изготовления полупроводниковых приборов. Кроме того, программы этого пакета позволяют исследовать физические явления и процессы, протекающие в объеме полупроводников, а также анализировать влияние этих процессов на характеристики приборов.

В качестве прототипа для моделирования и прибора, предназначенного для калибровки компьютерной модели, был выбран мощный лазерный диод на основе двойной гетероструктуры AlGaAs/GaAs, излучающий на длине волны 808 нм. Такие лазеры, а также линейки и решетки на их основе производятся в ФГУП НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха (г.Москва) [4, 5] и широко используются для накачки твердотельных неодимовых лазеров, а также волоконных усилителей.

Стандартная структура лазерных диодов, которая обеспечивает уверенное получение приборов указанного спектрального класса, описана в таблице 1 [5]. На основе этой структуры обычно изготавливаются чипы многомодовых лазеров, работающих в непрерывном режиме, с полосковыми контактами, сформированными мелким травлением. Ширина полоска  $W = 100$  мкм, длина резонатора  $L = 1000$  мкм.

Таблица 1 – Стандартная структура ДГС РО лазера на основе AlGaAs

Номер слоя	Слой	Состав	Уровень легирования, см <sup>-3</sup>	Толщина, мкм
1	<i>n</i> -подложка	<i>n</i> -GaAs (100)	$2 \cdot 10^{18}$	350
2	<i>n</i> -буфер	<i>n</i> -GaAs	$1 \cdot 10^{18}$	0.4
3	<i>n</i> -эмиттер	Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	$8 \cdot 10^{17}$	1.6
4	волновод	Al <sub>0.33</sub> Ga <sub>0.67</sub> As	не легирован ( $n \approx 10^{15}$ см <sup>-3</sup> )	0.2
5	активная область (КЯ)	Al <sub>0.08</sub> Ga <sub>0.92</sub> As	не легирован ( $n \approx 10^{15}$ см <sup>-3</sup> )	0.012
6	волновод	Al <sub>0.33</sub> Ga <sub>0.67</sub> As	не легирован ( $n \approx 10^{15}$ см <sup>-3</sup> )	0.2
7	<i>p</i> -эмиттер	Al <sub>0.5</sub> Ga <sub>0.5</sub> As	$8 \cdot 10^{17}$	1.6
8	контактный <i>p</i> -слой	<i>p</i> -GaAs	$4 \cdot 10^{19}$	0.5

Моделирование структуры описанного диода осуществлялось при помощи программы Mdraw, а его электрофизических характеристик – при помощи программы Dessis пакета Sentaurus TCAD компании Synopsys. При этом для сокращения времени численного счета контактный *p*-слой, *n*-буфер и *n*-подложка заменялись эквивалентными сопротивлениями, а коэффициенты отражения граней резонатора  $R_1$  и  $R_2$  выбирались равными 0.05 и 0.95 соответственно. Температура лазерного диода  $T$  считалась равной 300 К.

Для лазеров указанного типа длина волны лазерного излучения  $\lambda = 808$  нм, пороговое напряжение  $U_T = 1.56$ – $1.6$  В, дифференциальное сопротивление  $r = 50$  –  $80$  мОм, пороговый ток  $I_{th} = 290$  –  $360$  мА, наклон ВтАХ  $S = 1.15$  –  $1.25$  Вт/А, вертикальная расходимость излучения в области дальнего поля  $\Theta_{\perp} = 42^{\circ}$  [4, 5]. Калибровка компьютерной модели позволила получить следующие значения этих величин при моделировании в Sentaurus TCAD:  $\lambda_0 = 808.2$  нм,  $U_{T0} = 1.61$  В,  $r_0 = 77$  мОм,  $I_{th}^0 = 308$  мА,  $S_0 = 1.25$  Вт/А,  $\Theta_{\perp 0} = 40^{\circ}$ .

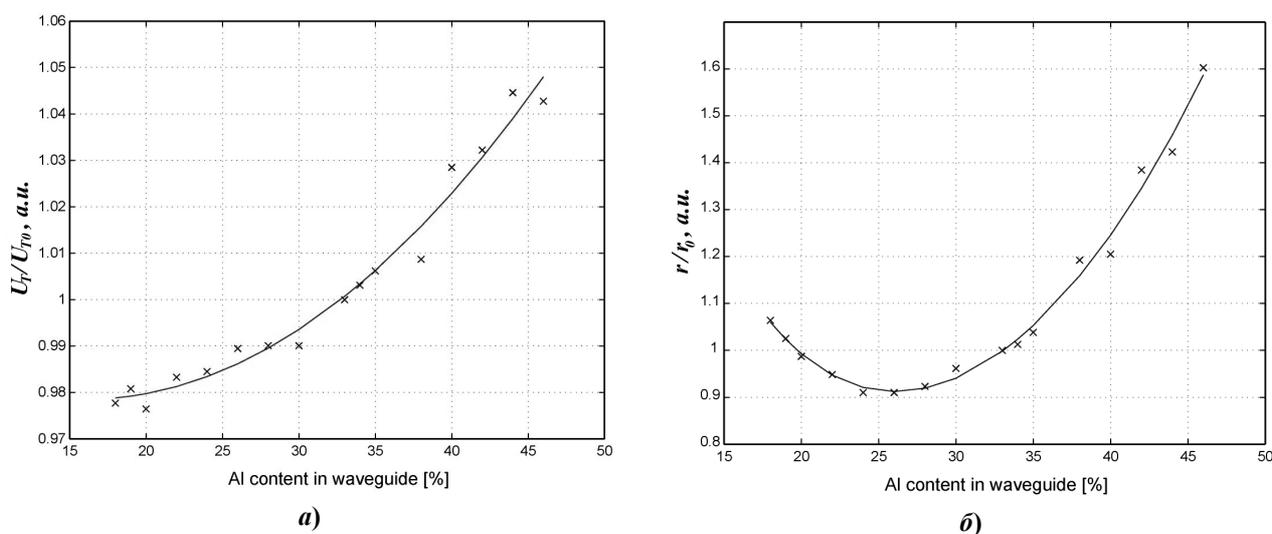
В ходе проведенного моделирования изучалась зависимость  $U_T$ ,  $r$ ,  $I_{th}$ ,  $S$ , КПД лазера  $\eta$ , равного отношению мощности лазерного излучения к электрической мощности, а также вертикальной расходимости  $\Theta_{\perp}$  от концентрации алюминия в волноводной и эмиттерных областях лазерного диода.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

#### 3.1 Зависимость характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs от концентрации алюминия в области волновода

Результаты исследования зависимости порогового напряжения  $U_T$  и дифференциального сопротивления  $r$  лазерного диода от концентрации алюминия в области волновода

представлены на рисунке 1. Как показывает этот рисунок, изменение содержания алюминия в волноводе практически не сказывается на  $U_T$  ( $U_T/U_{T0} \sim 0.98 \div 1.05$ ), но существенно изменяет сопротивление  $r$  лазерного диода. Это объясняется тем, что величина  $U_T$  определяется, в основном, контактной разностью потенциалов в области p<sup>+</sup>-p-, p-n- и n<sup>+</sup>-n-переходов, а сопротивление  $r$  существенно зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника в области слабо легированного волновода. Таким образом, пороговое напряжение  $U_T$  в конечном итоге определяется только уровнем легирования различных областей лазерного диода, а сопротивление  $r$  должно расти (рис. 1, б) с увеличением концентрации алюминия в волноводе вследствие увеличения ширины запрещенной зоны AlGaAs и связанного с этим уменьшения концентрации свободных носителей заряда в волноводе. Увеличение же  $r$  в области низких концентраций алюминия (менее 25 %), по-видимому, обусловлено процессами рассеяния свободных носителей на носителях при больших значениях их концентрации в волноводе и уменьшением вследствие этого их подвижности.



**Рисунок 1 – Пороговое напряжение (а) и дифференциальное сопротивление (б) ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от концентрации алюминия в области волновода**

Следует отметить, что частота излучения  $\omega$  ДГС РО лазера на основе AlGaAs практически не зависит от концентрации алюминия в области волновода и определяется, в основном, содержанием алюминия в квантовой яме (КЯ) активной области и её шириной [6]. Вследствие этого наибольший интерес с точки зрения оптимизации конструкции лазерных диодов вызывает зависимость от концентрации алюминия в волноводе их порогового тока и наклона ВтАХ. Результаты исследования этой зависимости представлены на рисунке 2.

Как показывает этот рисунок, наклон ВтАХ  $S$ , а с ним и квантовый выход лазерных диодов  $eS/\hbar\omega$ , в широком диапазоне концентраций алюминия в волноводе остаются практически постоянными. Более того, как показывает рисунок 3, б, эти величины во многом определяются не абсолютным значением концентрации алюминия в волноводе, а разностью его концентраций в волноводе и эмиттерах, так как от этой разности зависит скачек показателя преломления на границе волновода и, как следствие, коэффициент оптического ограничения  $\Gamma$  лазерного диода. С уменьшением этой разности до 8 – 9 % наклон ВтАХ и квантовый выход падают (рис. 2, б и 3, б). Что касается поведения порогового тока, то при изменении концентрации алюминия в волноводе оно является более сложным, чем у  $S$  (рис. 2, а и 3, а).

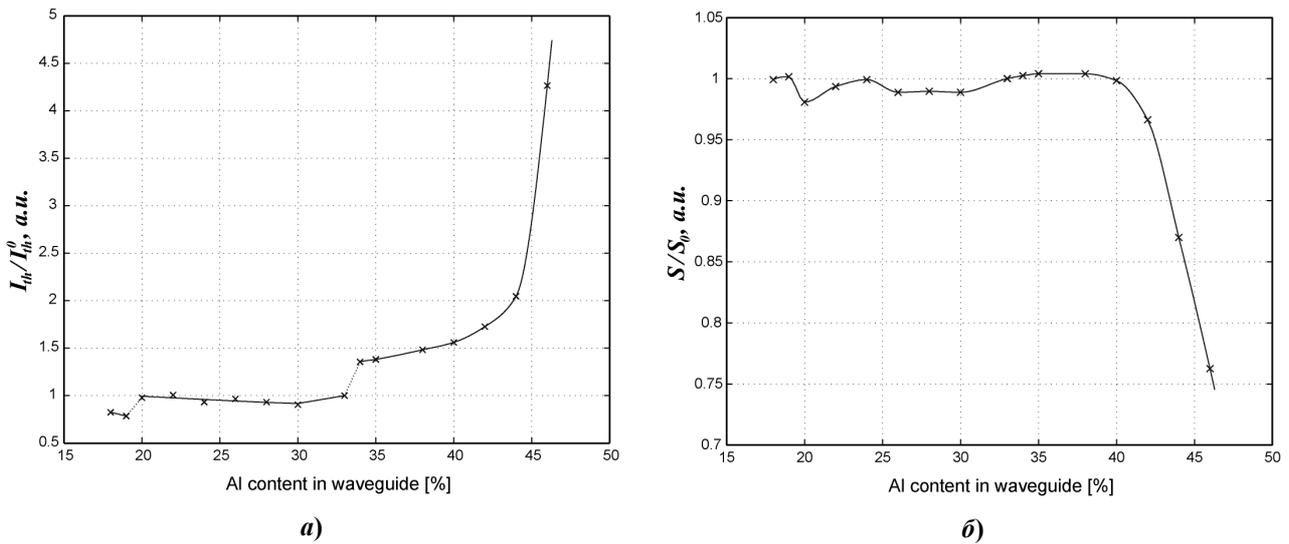


Рисунок 2 – Пороговый ток (а) и наклон ВмАХ (б) ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от концентрации алюминия в области волновода

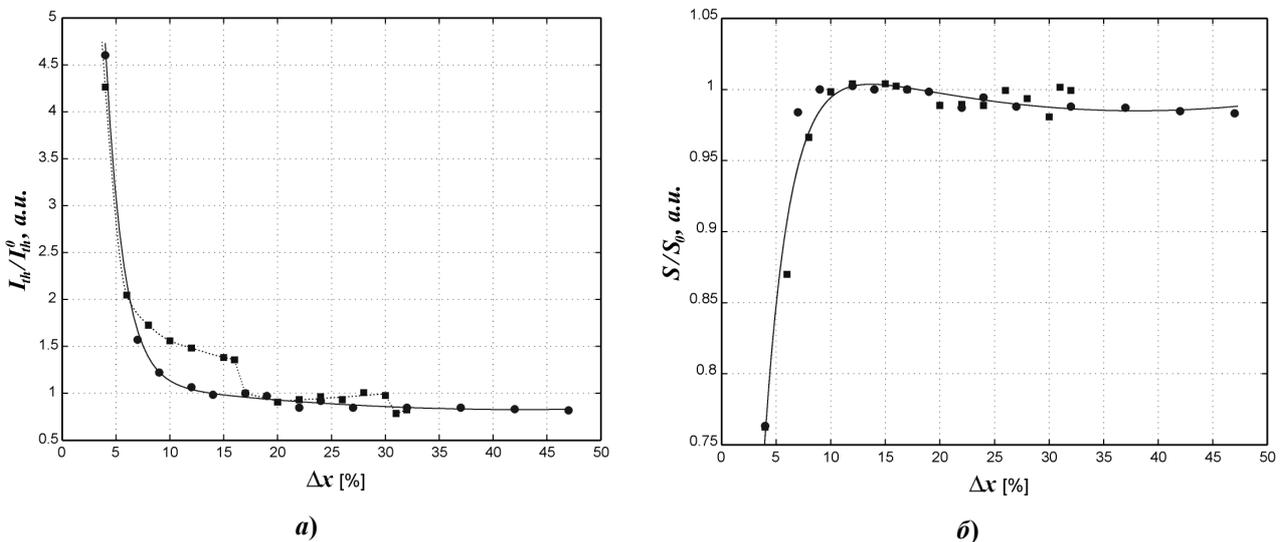
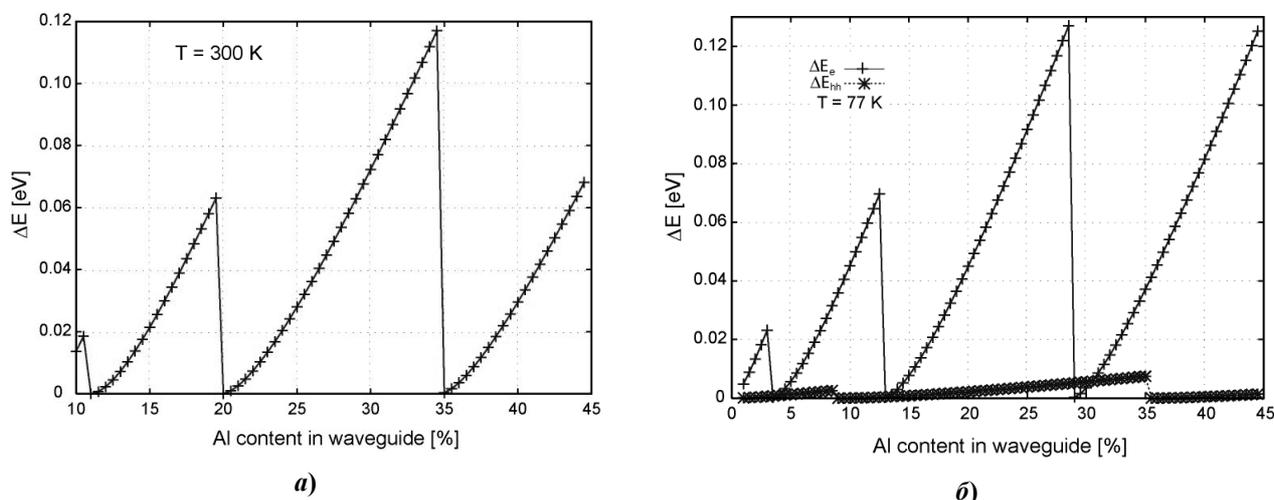


Рисунок 3 – Пороговый ток (а) и наклон ВмАХ ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от разности концентраций алюминия в волноводной области и в области эмиттеров  
 ● – результаты моделирования при постоянной концентрации алюминия в области волновода;  
 ■ – результаты моделирования при постоянной концентрации алюминия в эмиттерной области

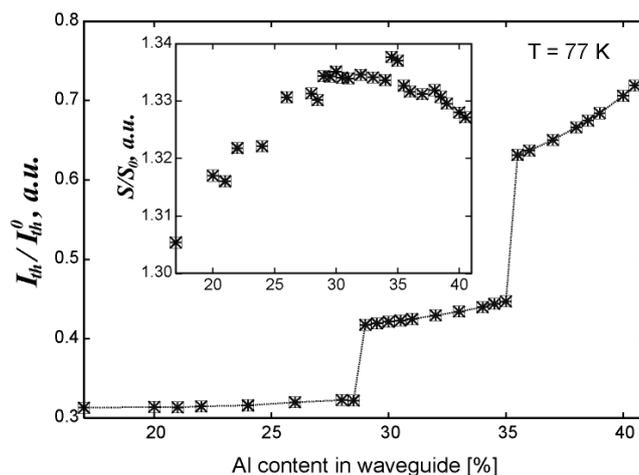
С одной стороны, вследствие уменьшения коэффициента оптического ограничения пороговый ток растет с уменьшением разности мольных концентраций алюминия  $\Delta x$  в волноводной области и в области эмиттеров. Причем, этот рост наблюдается как при изменении содержания алюминия в волноводе, так и при изменении содержания алюминия в эмиттерах (рис. 3, а). С другой стороны, при изменении концентрации алюминия в волноводе в поведении порогового тока наблюдаются скачки (рис. 2, а и 3, а), и связь между пороговым током и концентрацией алюминия в волноводе становится немонотонной.

Как показали наши исследования, немонотонный характер поведения порогового тока при изменении концентрации алюминия в волноводе связан с тем, что от этой концентрации зависит глубина КЯ и, как следствие, число квантовых уровней, на которых могут размещаться электроны и дырки, участвующие в процессах лазерной генерации. С увеличением содержания алюминия в волноводе число таких уровней растет, что приводит к скачкообразному росту порогового тока вследствие уменьшения вероятности излучательной рекомбинации в активной области. При этом, как показывают рисунки 3, а и 4, а, при достаточно высо-

ких температурах основной вклад в увеличение порогового тока дают электронные квантовые уровни, так как наблюдается однозначная корреляция между появлением этих уровней и скачкообразным ростом порогового тока при увеличении концентрации алюминия в волноводе. При низких же температурах вклад в скачкообразное поведение порогового тока могут вносить как электронные, так и дырочные квантовые уровни (рис. 4, б и 5).



**Рисунок 4 – Расстояние между краем ямы и верхними квантовыми уровнями электронов (а) и электронов и дырок (б) в КЯ ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от концентрации алюминия в области волновода при температурах  $T = 300$  К (а) и  $T = 77$  К**



**Рисунок 5 – Пороговый ток и наклон ВтАХ ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от концентрации алюминия в области волновода при  $T = 77$  К**

Следует отметить, что скачки, обусловленные изменением числа квантовых уровней носителей заряда в КЯ, характерны не только для порогового тока  $I_{th}$ , но и для наклона ВтАХ лазерного диода (рис. 2, б и 5). Однако в случае наклона ВтАХ такое поведение в зависимости от содержания алюминия в волноводе является менее выраженным, чем в случае порогового тока и, как следствие, КПД лазерного диода (рис. 6).

Что касается вертикальной расходимости лазерного излучения, то она, в отличие от порогового тока и наклона ВтАХ, изменяется монотонно (рис. 7) и, как того и следовало ожидать, зависит не от абсолютного значения концентрации алюминия в волноводе, а от разности его концентраций в волноводной и эмиттерной областях лазерного диода.

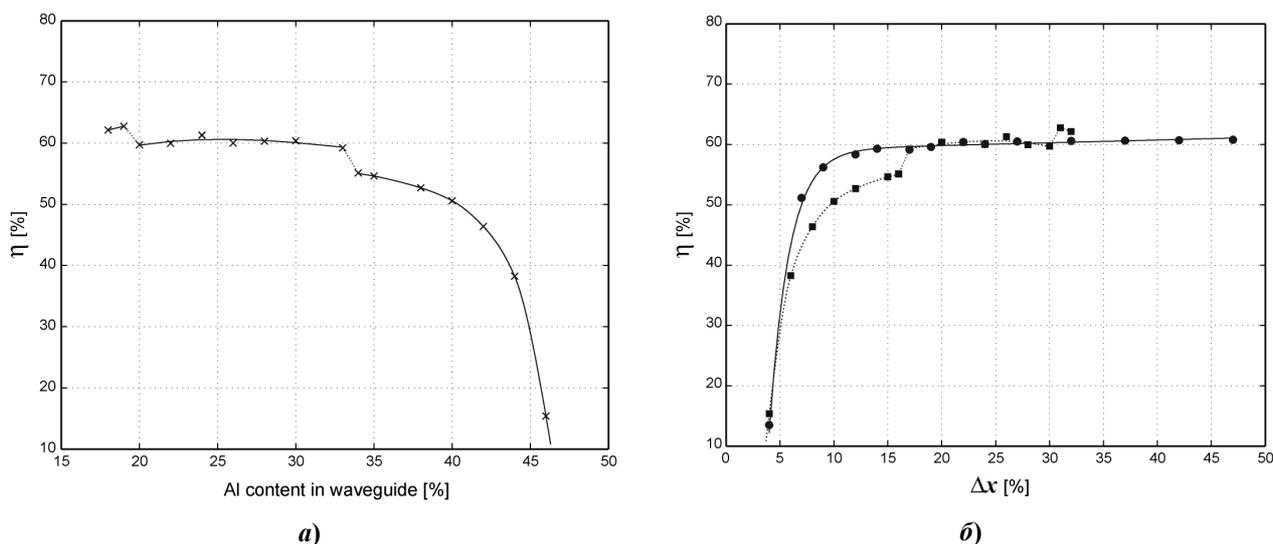


Рисунок 6 – КПД полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs при токе  $I = 1.9$  А и температуре  $T = 300$  К в зависимости от концентрации алюминия в области волновода (а) и от разности концентраций алюминия в области волновода и эмиттеров (б)

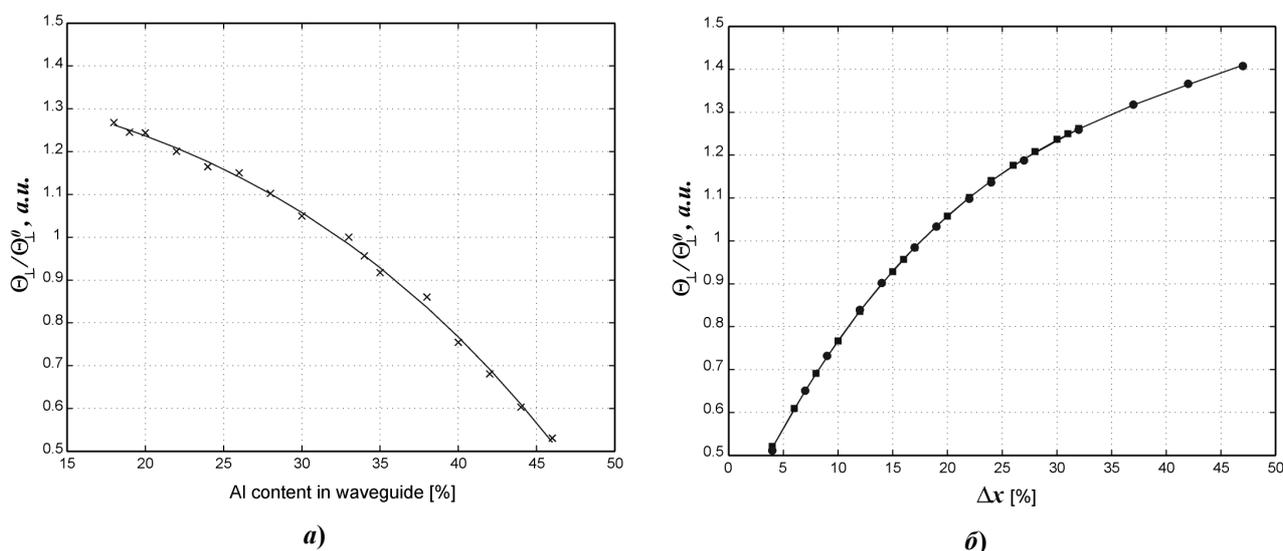


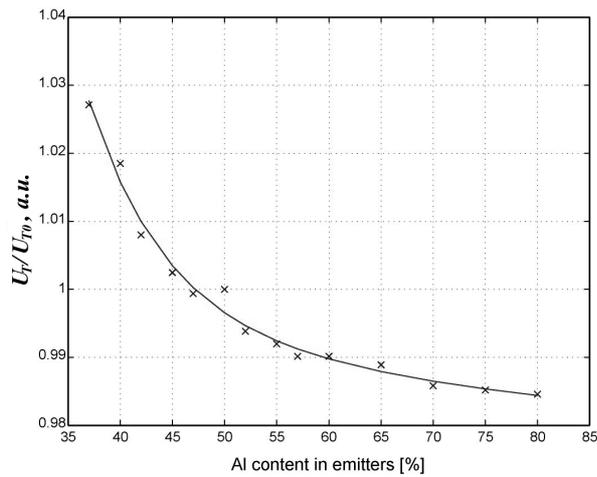
Рисунок 7 – Вертикальная расходимость излучения ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от концентрации алюминия в области волновода (а) и от разности концентраций алюминия в области волновода и эмиттеров (б)

### 3.2 Зависимость характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs от концентрации алюминия в эмиттерной области

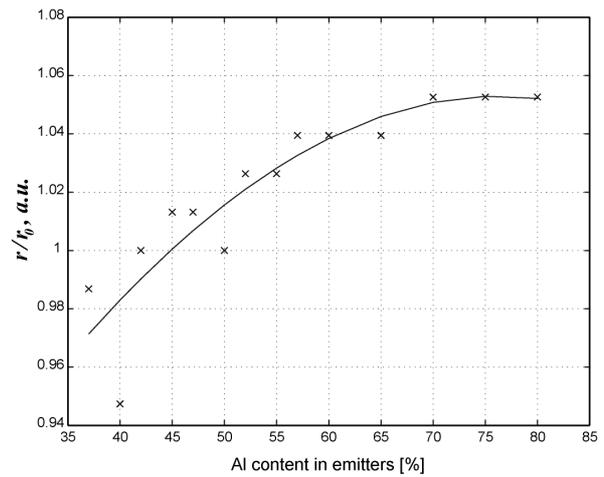
Результаты исследования зависимости напряжения отсечки, дифференциального сопротивления, порогового тока и наклона ВтАХ лазерного диода от мольной концентрации алюминия в области эмиттеров представлены на рисунках 8 – 9. На рисунке 10 изображены кривые зависимости от этой концентрации КПД диода и вертикальной расходимости лазерного излучения в области дальнего поля.

Как показывают эти рисунки, при увеличении концентрации алюминия в эмиттерной области пороговый ток и дифференциальное сопротивление лазерного диода практически не меняются, а пороговый ток падает, что приводит к небольшому росту КПД в области концентраций алюминия, больших 50 %. Постоянство порогового напряжения диода, как и в случае изменения содержания алюминия в волноводе, обусловлено тем, что это напряжение в основном определяется контактной разностью потенциалов в области переходов и зависит только от уровня легирования различных областей лазерного диода. Слабое изменение дифференциального сопротивления диода обусловлено высоким уровнем легирования эмит-

теров, вследствие чего их сопротивление определяется, главным образом, концентрацией активных примесей и практически не зависит от содержания алюминия в эмиттерах.

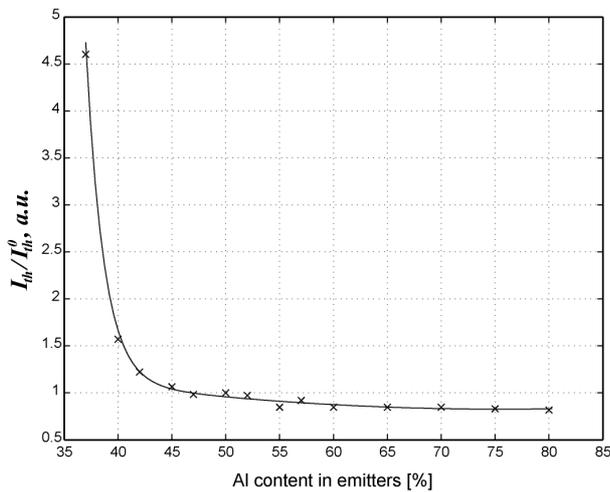


а)

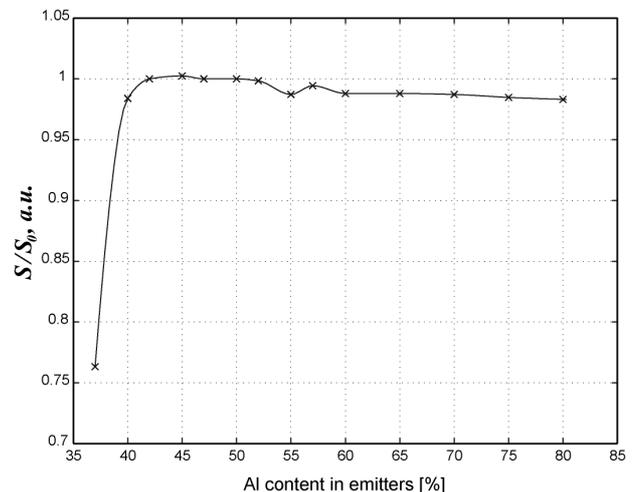


б)

Рисунок 8 – Пороговое напряжение (а) и дифференциальное сопротивление (б) ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от концентрации алюминия в области эмиттеров

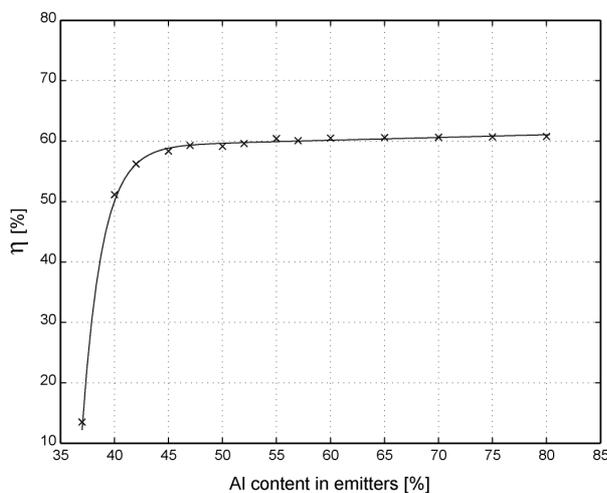


а)

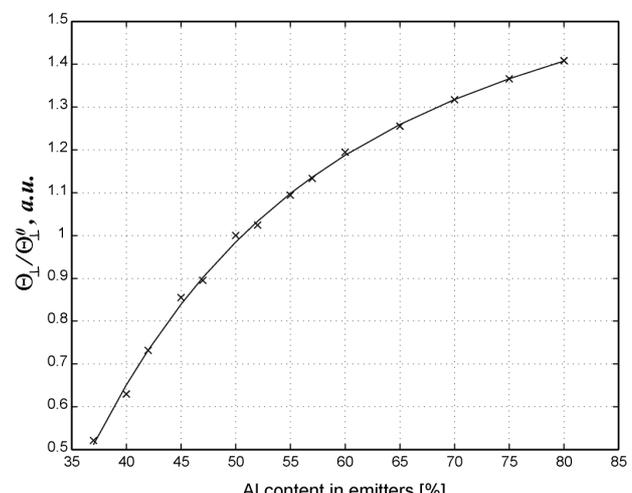


б)

Рисунок 9 – Пороговый ток (а) и наклон ВмАХ (б) ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от концентрации алюминия в области эмиттеров



а)



б)

Рисунок 10 – КПД при токе  $I = 1.9$  А (а) и вертикальная расходимость излучения (б) ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от концентрации алюминия в области эмиттеров

Связанное с увеличением концентрации алюминия в эмиттерах падение порогового тока объясняется тем, что с ростом этой концентрации увеличивается разность показателей преломления на границе волновода и, как следствие, коэффициент оптического ограничения  $\Gamma$  лазерного диода. Таким образом, пороговый ток, а с ним и наклон ВТАХ, изображенный на рисунке 9, б, как это уже было показано в предыдущем разделе, при изменении концентрации алюминия в эмиттерах определяются не абсолютными значениями этой концентрации, а разностью концентраций алюминия в области волновода и эмиттеров (рис. 3).

Это же в полной мере относится и к вертикальной расходимости излучения лазерных диодов  $\Theta_{\perp}$  (рисунок 10, б), зависимость которой от разности концентраций алюминия в волноводной области и в области эмиттеров представлена на рисунке 7, б.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Как показывают полученные в ходе проведенного моделирования результаты, существуют мольные концентрации алюминия в волноводной и эмиттерных областях ДГС РО лазеров на основе AlGaAs, оптимальные с точки зрения понижения порогового тока лазерной генерации и повышения КПД лазерных диодов. В частности, для лазеров с квантоворазмерной активной областью, работающих на длине волны  $\lambda = 808$  нм, оптимальной концентрацией алюминия в волноводе является величина, равная 33 %, а в области эмиттеров – 50 ÷ 52 %.

При такой концентрации алюминия в области волновода полупроводниковый лазер на основе AlGaAs будет обладать минимальным пороговым током при максимальном наклоне ВТАХ (рисунок 2), что приводит к максимально возможному КПД (рис. 6, а) при минимальной вертикальной расходимости (рис. 7, а). При этом концентрация алюминия в области эмиттеров, равная 50 ÷ 52 %, будет обеспечивать скачек концентрации алюминия на границе волновода  $\Delta x = 17 \div 19$  %, что является оптимальной величиной с точки зрения коэффициента оптического ограничения (рис. 3, 6, б и 7, б).

Как показывают рисунки 9 – 10, это работает и на то, чтобы при максимальном наклоне ВТАХ сделать пороговый ток минимальным, то есть получить максимально возможный КПД при минимальной вертикальной расходимости. Дальнейшее увеличение КПД лазерных диодов на основе AlGaAs возможно только за счет существенного увеличения этой расходимости.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № П2514).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Alferov Zh.I. The Double Heterostructure Concept and Its Applications in Physics, Electronics, and Technology // Rev. Mod. Phys. 2001. V.73. No.3. P.767-782.
2. Елисеев, П.Г. Полупроводниковые лазеры – от гомопереходов до квантовых точек / П.Г. Елисеев // Квантовая электроника. – 2002. – Т.32. – С.1085-1098;
3. Sentaurus TCAD User Guide [Электронный ресурс]. – Synopsys, 2005. – Режим доступа: [www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx](http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx)
4. Андреев, А.Ю. Мощные лазеры ( $\lambda = 808 - 850$  нм) на основе асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения / А.Ю. Андреев, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, М.А. Хомылев, И.С. Тарасов // ФТП. – 2006. – Т.40. – Вып.5. – С.628-632;
5. Андреев, А.Ю. Мощные лазеры ( $\lambda = 808$  нм) на основе гетероструктур раздельного ограничения AlGaAs/GaAs / А.Ю. Андреев, С.А. Зорина, А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.В. Мурашева, Т.А. Налет, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, Д.Р. Сабитов, В.А. Симаков, С.О. Слипченко, К.Ю. Телегин, В.В. Шамахов, И.С. Тарасов // ФТП. – 2009. – Т.43. – Вып.4. – С.543-547;
6. Матюхин, С.И. Спектральные характеристики полупроводниковых AlGaAs лазеров с двойной гетероструктурой и раздельным ограничением / С.И. Матюхин, З.Ж. Козил, С.Н. Ромашин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №6 (284). – С.20-27.

**Матюхин Сергей Иванович**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

Доктор физико-математических наук, декан Естественнонаучного факультета

Тел. (4862) 41-98-81

E-mail: sim1@mail.ru

**Козил Збигнев Жозеф**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

Ph.D., ведущий инженер-физик лаборатории приборно-технологического моделирования в микро- и нанoeлектронике

Тел. (4862) 41-98-89

E-mail: softquake@gmail.com

**Магомедов Гаджи Рашидович**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

Студент Учебно-научно-исследовательского института информационных технологий

Тел. (4862) 41-98-89

E-mail: maggadr@gmail.com

**Малый Денис Олегович**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

Студент Учебно-научно-исследовательского института информационных технологий

Тел. (4862) 41-98-89

E-mail: bloodymc@mail.ru

**Ромашин Сергей Николаевич**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»

Тел. (4862) 41-98-89

E-mail: rosen@ostu.ru

---

S.I. MATYUHIN, Z.Zh. KOZIL, G.R. MAGOMEDOV, D.O. MALYY, S.N. ROMASHIN

**DEPENDENCE OF SEMICONDUCTOR LASER CHARACTERISTICS OF DOUBLE HETEROSTRUCTURE RHO LASER ON THE BASIS OF ALGAS FROM ALUMINUM CONCENTRATION IN THE FIELD OF WAIVE GUIDE AND EMITTER**

*Influence of Al concentration in the waveguide and emitter regions of a AlGaAs semiconductor laser with separate confinement heterostructures (SCH) on the laser I-V- and light-current-curves is investigated by the methods of computer simulation in the Synopsys' Sentaurus TCAD software. The optical efficiency of the laser and vertical divergence of laser radiation in the far field region as functions of Al content are studied. It's shown, that there are optimal concentrations of aluminum when the threshold current of lasing is minimal and the optical efficiency is maximal.*

**Key words:** semiconductor laser on the base of AlGaAs; double heterostructure; separate confinement; aluminum concentration; I-V-curve; light-current-curve; optical efficiency; computer simulation; Sentaurus TCAD.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Alferov Zh.I. The Double Heterostructure Concept and Its Applications in Physics, Electronics, and Technology // Rev. Mod. Phys. 2001. V.73. No.3. P.767-782.
2. Eliseev, P.G. Poluprovodnikovye lazery – ot gomoperehodov do kvantovyh toчек / P.G. Eliseev // Kvantovaya jelektronika. – 2002. – T.32. – S.1085-1098;
3. Sentaurus TCAD User Guide [Jelektronnyj resurs]. – Synopsys, 2005. – Rezhim dostupa: www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx
4. Andreev, A.Ju. Mownye lazery ( $\lambda = 808 - 850$  nm) na osnove asimmetrichnoj geterostruktury raz-del'nogo ogranichenija / A.Ju. Andreev, A.Ju. Leshko, A.V. Ljuteckij, A.A. Marmaljuk, T.A. Nalet, A.A. Padalica, N.A. Pihtin, D.R. Sabitov, V.A. Simakov, S.O. Slipchenko, M.A. Homylev, I.S. Tarasov // FTP. – 2006. – T.40. – Vyp.5. – S.628-632;
5. Andreev, A.Ju. Mownye lazery ( $\lambda = 808$  nm) na osnove geterostruktur razdel'nogo ogranichenija Al-GaAs/GaAs / A.Ju. Andreev, S.A. Zorina, A.Ju. Leshko, A.V. Ljuteckij, A.A. Marmaljuk, A.V. Murasheva, T.A. Nalet, A.A. Padalica, N.A. Pihtin, D.R. Sabitov, V.A. Simakov, S.O. Slipchenko, K.Ju. Telegin, V.V. Shamahov, I.S. Tarasov // FTP. – 2009. – T.43. – Vyp.4. – S.543-547;

6. Matjuhin, S.I. Spektral'nye harakteristiki poluprovodnikovyh AlGaAs lazerov s dvojnoj gete-rostrukuroj i razdel'nym ograničeniem / S.I. Matjuhin, Z.Zh. Kozil, S.N. Romashin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – №6 (284). –S.20-27.

**Matjuhin Sergey Ivanovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Doctor of physico-mathematical science, Dean of Faculty of Natural science  
Tel.: 4862-41-98-81  
E-mail: sim 1@mail.ru

**Kozil Zbignev Zhozef**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Ph.D., lead engineer- physicist of instrument-technological modeling laboratory in micro- and nanoelectronics  
Tel.: 4862-41-98-89  
E-mail: softquake@gmail.com

**Magomedov Gadzhi Rashidovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Student of education science research institute of information technologies  
Tel.: 4862-41-98-89  
E-mail: maggadr@gmail.com

**Malyy Denis Olegovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Student of education science research institute of information technologies  
Tel.: 4862-41-98-89  
E-mail: bloodymc@mail.ru

**Romashin Sergey Nickolaevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of physico-mathematical science, associate professor of department “Physics”  
Tel.: 4862-41-98-89  
E-mail: rosen@ostu.ru

В.И. КОМОВА

## ЭКСТРАКЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ИОНОВ ВАНАДИЯ (V) В СИСТЕМЕ 5,7-ДИБРОМОКСИХИНОЛИН – ГЕКСАНОЛ – ХЛОРОФОРМ (1:2)

Установлено, что извлечение ванадия (V) хлороформным раствором ДБО значительно возрастает в присутствии небольших добавок гексилового спирта.

**Ключевые слова:** экстракция, коэффициент распределения, константа распределения, комплексное соединение.

Изучая экстракционное равновесие в системе ванадий (V) – ДБО – гексанол – хлороформ, было установлено, что извлечение ванадия (V) хлороформным раствором ДБО значительно возрастает в присутствии небольших добавок гексилового спирта. При этом наблюдается рост коэффициентов распределения ванадия (V) между двумя несмешивающимися фазами [1].

Важным параметром, характеризующим экстракцию ванадия (V), является константа распределения ( $P_o$ ), определяющая экстрагирующую способность растворителя по отношению к данному распределяемому веществу. В качестве растворителя была использована смесь гексанола с хлороформом (1:2). Для нахождения константы распределения нами были построены зависимости  $C_o$  от  $C_b$ ,  $C_o/C_b$  от  $C_b$  и  $\lg C_o$  от  $\lg C_b$ . Экспериментальные данные представлены в таблице 1 и на рисунках 1, 2, 3.

Таблица 1 – Распределение ванадия между водной и органической фазами при 20° С

$C_o$ , моль/л	$C_b$ , моль/л	$\lg C_o$	$\lg C_b$	$C_o/C_b$
$4,89 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	-3,31	- 4,64	21,26
$7,33 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	-3,13	- 4,47	21,56
$9,77 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	-3,01	- 4,34	21,24
$1,22 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	-2,91	- 4,24	21,40
$1,71 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	-2,77	- 4,10	21,38
$1,95 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	-2,71	- 4,04	21,48

ср.  $21,39 \pm 0,05$   
( $P = 0,95$ )

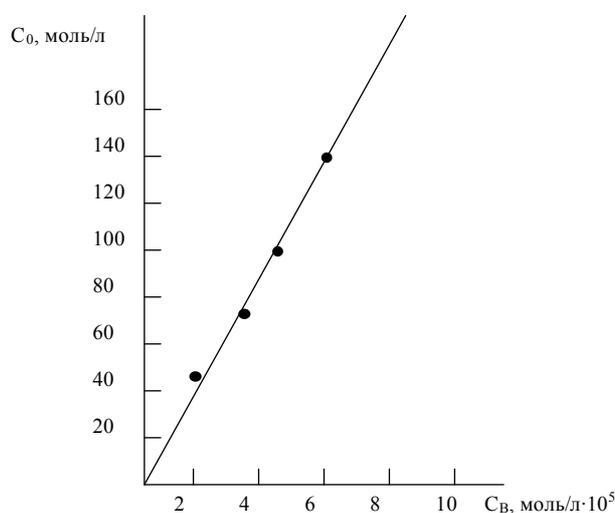


Рисунок 1 – Взаимосвязь между равновесными концентрациями ванадия (V) в органической и водной фазах

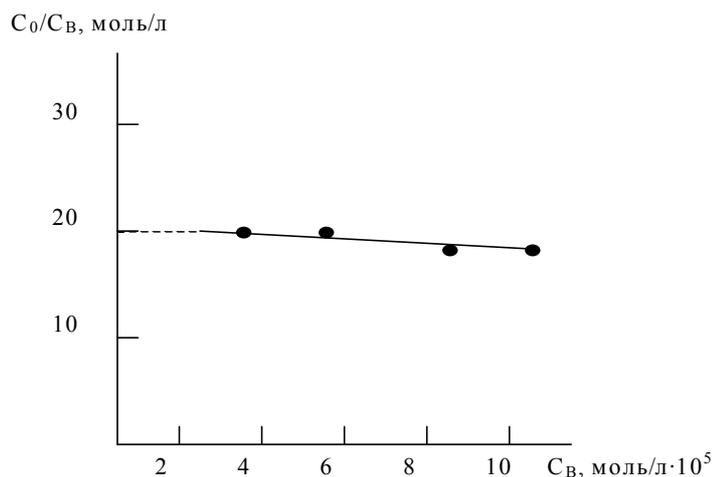


Рисунок 2 – Взаимосвязь между равновесными концентрациями ванадия (V) в органической и водной фазах

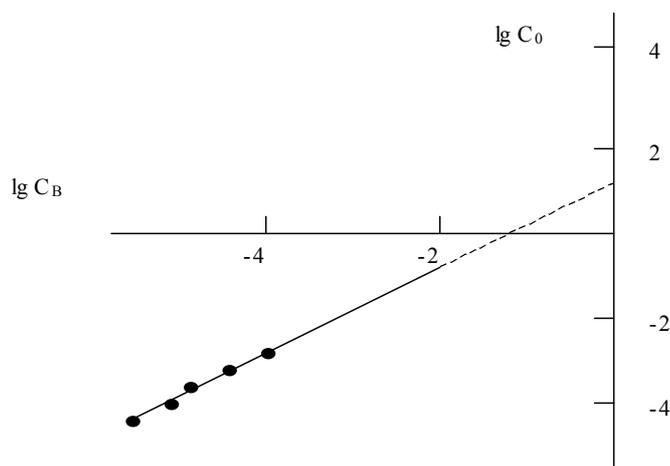


Рисунок 3 – Логарифмическая зависимость равновесной концентрации ванадия (V) в органической фазе от его равновесной концентрации в водной

Рисунки показывают, что в области изучаемых нами концентраций ванадия (V), экстрагируемое вещество не образует ассоциатов ни в водной, ни в органической фазах. В этом случае зависимость  $C_0$  от  $C_B$  графически представляет прямую. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс равен константе распределения:

$$C_0/C_B = P_0 = \operatorname{tg} \alpha \quad \text{или} \quad C_0 = P_0 \cdot C_B$$

В нашем случае  $P_0 = 21,39$ . Следовательно, изотерма экстракции описывается уравнением  $C_0 = 21,39 \cdot C_B$ . При расчетах использовали способ наименьших квадратов. Коэффициент корреляции равен 0,997. Это свидетельствует о том, что наблюдаемая зависимость действительно описывается найденным уравнением прямой.

При экстракции из водного раствора в фазу экстрагента кроме распределяющегося вещества переходит и некоторое количество воды. В литературе известно, что с увеличением концентрации экстрагируемого вещества, например, органической кислоты НА, увеличивается и содержание воды в органической фазе. Это дает основание считать, что экстрагируемое вещество может находиться в органической фазе в форме гидрата  $НА \cdot H_2O$ . При введении иона металла в органическую фазу, последний может быть связан с водой и количество воды в органической фазе будет увеличиваться. На рисунке 4 представлена зависимость содержания воды от концентрации соли ванадия (V), полученная из экспериментальных данных.

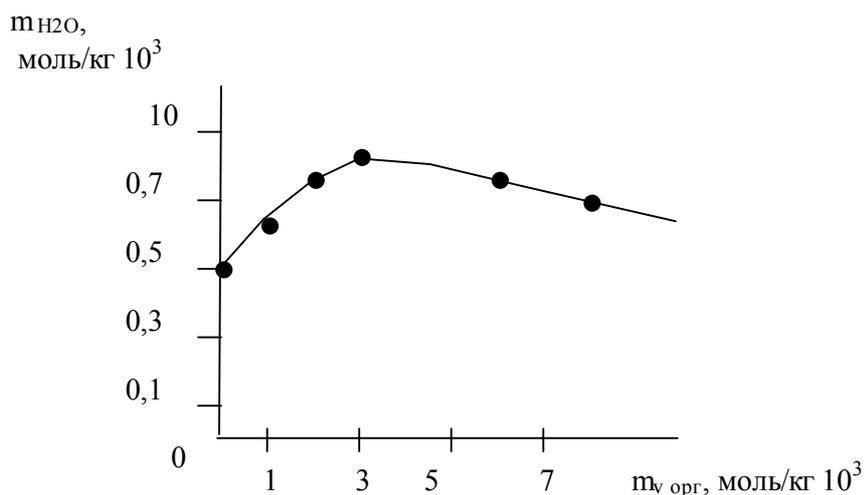


Рисунок 4 – Зависимость содержания воды в органической фазе от содержания ионов ванадия (V) в этой же фазе

**Чтобы надежно оценить вклад соли ванадия в соэкстракцию воды, органическая фаза предварительно приводилась в равновесие с водной фазой в оптимальных условиях кислотности  $\text{pH} = 2,0$  [2].**

Содержание воды в органической фазе определяли по методу Фишера. В работе использовали продажный реактив Фишера. Титр реактива (мг  $\text{H}_2\text{O}/\text{мл}$  реактива) определялся по навеске воды, которая взвешивалась на микроаналитических весах с точностью до  $0,00001 \text{ г}$ . Отбор проб органической фазы, представляющей собой экстракт, содержащий хелат ванадия(V) с ДБО в органическом растворителе (гексанол – хлороформ 1:2) осуществлялся следующим образом: пробирка со стеклянным шлифом, наполненная пробой, помещалась в стаканчик с сухой пипеткой, закрытой колпачком. Вся система взвешивалась на аналитических весах, затем пипеткой отбиралась проба и вносилась в анализатор. Влажная пипетка вновь помещалась в стакан, после чего система взвешивалась вновь. По разности веса до отбора пробы и после отбора, определялась навеска экстракта с точностью до  $0,00001 \text{ г}$ .

Рассматривая зависимость концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  в органической фазе от концентрации ванадия (V) в той же фазе, видим, что сначала наблюдается линейное увеличение содержания воды, отвечающее соэкстракции воды с хелатом. Если данный участок аппроксимировать линейной зависимостью:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = m^{\circ}(\text{H}_2\text{O}) + h m\text{VO}(\text{OH})(\text{ДБО})_2,$$

где  $m(\text{H}_2\text{O})$  – общая моляльная концентрация воды в органической фазе;

$m^{\circ}(\text{H}_2\text{O})$  – концентрация воды в органической фазе, отвечающая соэкстракции ее с ДБО и собственной растворимости ее, в смеси растворителей;

$m\text{VO}(\text{OH})(\text{ДБО})_2$  – концентрация воды, вводимой с хелатом ванадия (V) в органическую фазу, моль/кг;

$h$  – число гидратации, т.е. среднее число молекул воды, соэкстрагирующееся в органическую фазу с одной молекулой хелата, то по тангенсу угла наклона можно оценить величину  $h$ , которая составляет 6.

При более высоких концентрациях ванадия (V) наблюдается область «насыщения» с некоторой тенденцией к снижению концентрации воды в органическом слое, что может быть обусловлено ростом концентрации ассоциированных форм ванадия в органической фазе, например, вследствие его полимеризации.

Полученные нами результаты, позволяют сделать ряд выводов об экстракции в системе  $V_{(v)}$  – ДБО – гексанол – хлороформ. При взаимодействии ионов ванадия (V) с ДБО в органическом растворителе образуется соединение хелатного типа, в котором ванадий вступает в координационную связь с азотом азота.

ДБО входит во внутреннюю сферу комплекса с катионом  $\text{VO}(\text{OH})^{2+}$ . Оставшиеся координационные места во внутренней координационной сфере чаще всего занимает такой лиганд, как вода, которая при определенных условиях может замещаться другими лигандами. Чтобы обеспечить экстракцию подобных «координационно-ненасыщенных» соединений, необходимо вытеснить воду или заблокировать ее молекулами активного в координационном отношении органофильного вещества, способного вытеснить воду, либо давать с ней прочные водородные связи. Таким компонентом в изучаемой системе и явился гексиловый спирт, введение которого в систему ДБО-хлороформ, вызывает значительное увеличение коэффициентов распределения ванадия (V). Полученные результаты становятся вполне закономерными, если рассматривать n-гексиловый спирт в качестве активной добавки в системе ДБО – гексанол – хлороформ. В условиях экстракции гидратированный хелат ванадия (V) постепенно становится более гидрофобным вследствие замещения воды нейтральным лигандом, т.е. гексиловым спиртом. Полученные экспериментальные данные о соотношении компонентов в экстрагируемом соединении, позволяют предположить существование в органической фазе сольвата следующего состава:



### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комова, В.И. Исследование механизма экстракции ванадия (V) в системе 5,7-дибромоксинолин в смеси растворителей в целях разработки методов контроля и диагностики сточных вод титано-магниевого производства на содержание ионов ванадия (V) / В.И. Комова // Известия ОрелГТУ.– Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – №4/ 276(575). – С. 101-104.
2. Дубровина, Л.Т. Об экстракции ионов ванадия (V) в системе 5,7-дибромоксинолин – гексанол – хлороформ / Л.Т. Дубровина, В.И. Комова, В.А. Лугинин, И.А. Церковницкая // ЛГУ им. А.А. Жданова. – Л., ЛГУ, 1987. – Деп. ВНИИТэхим 03.02.87, № 89-ХII-87.

#### Комова Вера Ивановна

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.(4862)419892;  
E-mail: chemistry@ostu.ru

V.I. KOMOVA

### VANADIUM (V) IONS EXTRACTION BEHAVIOR IN A SYSTEM OF DBO - HEXYL SPIRIT – CHLOROFORM (1:2)

*It is established, that the extraction of vanadium (V) by chloroformic solution DBO considerably grows at the presence of hexyl spirit small additives.*

**Key words:** extraction, distribution coefficient, distribution constant, complex compound.

### BIBLIOGRAPHY

1. Komova, V.I. Issledovanie mehanizma jekstrakcii vanadija (V) v sisteme 5,7-dibromoksihinolin v smesi rastvoritelej v celjah razrabotki metodov kontrolja i diagnostiki stocnyh vod titano-magnievogo proizvodstva na so derzhanie ionov vanadija (V) / V.I. Komova // Izvestija OrelGTU.– Serija «Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii». – 2009. – №4/ 276(575). – S. 101-104.
2. Dubrovina, L.T. Ob jekstrakcii ionov vanadija (V) v sisteme 5,7-dibromoksihi-nolin – geksanol – hloroform / L.T. Dubrovina, V.I. Komova, V.A. Luginin, I.A. Cerkovnickaja // LGU im. A.A. Zhdanova. – L., LGU, 1987. – Dep. VNIITjehim 03.02.87, № 89-ХII-87.

#### Komova Vera Ivanovna

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of chemical science, associate professor of department „Chemistry“  
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
Tel.: 4862-41-98-92  
E-mail: chemistry@ostu.ru

## КРИТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА МАТЕРИАЛА И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С КРИТЕРИЯМИ РАЗРУШЕНИЯ

*В статье рассмотрен подход к оценке температуры вязко-хрупкого перехода в окрестности макроконцентратора напряжений, учитывающий влияние зон структурных концентраторов.*

**Ключевые слова:** макроконцентратор, хрупкое, квазихрупкое и вязкое разрушение, критерии предельного состояния.

Из экспериментальных исследований известно, что один и тот же материал в макроднородном напряженном состоянии демонстрирующий ярко выраженные пластические свойства, при наличии макроконцентраторов может проявлять хрупкий характер разрушения. В зависимости от вида концентратора напряжений, степени локализации пластической деформации, уровня повреждаемости в окрестности макроконцентратора характер разрушения материала может существенно изменяться. При формулировке критерия разрушения вышеуказанные обстоятельства необходимо учитывать.

Рассмотрим возможные подходы, используемые при анализе влияния макроконцентраторов на характер разрушения материала.

*1 Хрупкое, квазихрупкое и вязкое разрушение.* Под хрупким состоянием материала в конструкции понимается механическое состояние материала, деформации которого подчиняются закону Гука до тех пор, пока максимальное растягивающее напряжение  $\sigma_1^*$  не превысит сопротивления отрыву  $\tau_0$

$$\sigma_1^* < \tau_0 (\sigma_1 < S_k), \quad q_1 < q_{np}, \quad (1)$$

при выполнении условия упругости в форме ограничения интенсивности напряжений  $\sigma_i^*$  пределом текучести  $\sigma_T$

$$\sigma_i^* < \sigma_T, \quad (2)$$

или в форме ограничения максимальных касательных напряжений

$$|\tau_1^*| = |\sigma_2^* - \sigma_3^*|/2 < \tau_T; \quad |\tau_2^*| = |\sigma_3^* - \sigma_1^*|/2 < \tau_T; \quad |\tau_3^*| = |\sigma_1^* - \sigma_2^*|/2 < \tau_T, \quad (3)$$

где  $\sigma_1^*$   $\sigma_2^*$   $\sigma_3^*$  – главные эффективные макронапряжения, расположенные в порядке убывания;

$\sigma_T$  – предел текучести при растяжении стандартных гладких образцов;

$\tau_T$  – предел текучести при сдвиге, равный  $\tau_T = \sigma_T / 2$  для условия пластичности Треска - Сен-Венана и  $\tau_T = \sigma_T / \sqrt{3}$  для условия пластичности Губера-Мизеса;

$S_k$  – предельное напряжение для сварных соединений металлоконструкций, определяемое нормами дефектоскопического контроля;

$\sigma_i^*$  – интенсивность напряжений;

$q_1$  и  $q_{np}$  – относительные инварианты векторной интенсивности собственного магнитного поля рассеяния (СМПП) [1,2].

$$\sigma_i^* = \left( (\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2 \right)^{1/2} / \sqrt{2}$$

$$\tau_{\max}^* = \max(\tau_1^*, \tau_2^*, \tau_3^*)$$

В материалах или элементах изделий в хрупком состоянии, если нарушается условие (1) при выполнении условий (2) или (3), возникают трещины нормального отрыва. В хрупком теле могут возникнуть трещины поперечного сдвига, если нарушается условие внутреннего трения

$$\max(\tau_{\max}^* \text{Sing} \tau_m^* + \eta \sigma_n^*) < \tau_S, \quad \text{при} \quad q_1 = q_{np} \quad (4)$$

Квазихрупкое разрушение наблюдается, если возникают поверхности скольжения и нарушается условие (2) или (3) прежде, чем будет нарушено условие (1), что соответствует подготовленности структуры, при этом выполнится кинетическое условие  $q_1 = q_{np}$  [1,2].

Хрупкое разрушение в условиях неоднородного поля деформаций при наличии концентраторов напряжений начинается в результате образования трещин при исчерпании макропрочности в наиболее напряженном структурном элементе при выполнении кинетического и силового критериев хрупкого разрушения (1), (2), если только в других структурных элементах нет пластических деформаций. В противном случае, разрушение указанного объема будет квазихрупким или вязким, в зависимости от степени пластического деформирования. Для образовавшихся или существующих в теле (конструкции) трещин, их распространение определяется условием нарушения макропрочности (нарушением условия (1)) в концевой зоне трещины. В элементе конструкции возникнут пластические деформации, если в предстательном объеме эффективное максимальное касательное макронапряжение  $\tau_{max}^*$  достигнет величины сопротивления сдвигу  $\tau_T$ , а нормальные макронапряжения не достигнут напряжения сопротивления отрывом, т.е. если нарушается условие (2) или условие (3) при сохранении условия прочности (1).

*Характеристические температуры  $T_{k1}$  и  $T_{k2}$ .* Необходимо отметить, что проблеме учета влияния неоднородности макронапряженного состояния в окрестности концентраторов напряжений на механические свойства материала уделяется большое внимание, как в отечественных, так и зарубежных публикациях. Существуют различные эмпирические и теоретические подходы для оценки влияния концентраторов напряжений на характер разрушения. Наиболее распространен подход на основе введения характеристических температур. Так в работах С.В. Серенсена, Н.А. Махутова [3,7] различают температуры хрупкости:  $T_{k1}$  - соответствует переходу от вязких к квазихрупким разрушениям, и  $T_{k2}$  - соответствует переходу от квазихрупких к хрупким разрушениям, где хрупкими называют разрушения, происходящие в нетто-сечениях при напряжениях меньше предела текучести  $\sigma_T$ . Эти температуры определяются по результатам испытаний плоских надрезанных образцов и могут быть введены в расчет для оценки способности реальных элементов конструкций сопротивляться хрупкому разрушению. Температуре  $T \leq T_{k2}$  соответствует падение номинальных разрушающих напряжений ниже предела текучести и резкое снижение сопротивления разрушению (коэффициента интенсивности напряжения  $K_{Ic}$ ).

Для квазихрупких состояний ( $T_{k2} < T < T_{k1}$ ) определение сопротивления разрушению для малоуглеродистых и низколегированных сталей значительно усложняется в силу образования развитых зон пластических деформаций.

Особенностью современных представлений о структурных механизмах хрупкого разрушения металлов является их ориентация на описание разрушения в простейших условиях линейного напряженного состояния, в частности, при растяжении гладких цилиндрических образцов в температурном интервале. В то же время известно, что при переходе от одноосного к двух или трехосному растяжению, имеет место рост температуры нулевой пластичности  $T_{НП}$  [4], уменьшение остаточных деформаций, наблюдается переход от вязкого разрушения к хрупкому. Для элементов металлоконструкций это проявляется в том, что хрупкое разрушение инициируется, в основном, в местах значительных градиентов силовых полей, создаваемых различного рода концентраторами напряжений, в том числе мезо и макротрещинами.

*Характеристическая температура нулевой пластичности  $T_{НП}$ .* В экспериментальных и теоретических исследованиях, кроме критических температур хрупкости  $T_{k1}, T_{k2}$ , определяемых на плоских образцах с макротрещинами, получило развитие представление о температуре нулевой пластичности  $T_{НП}$  и сопротивлении хрупкому разрушению (сопротивление отрыву)  $\tau_0$  [4], определяемых по испытаниям гладких цилиндрических образцов на одноосное растяжение в соответствующем температурном интервале. Температура  $T_{НП}$  раз-

деляет области, где разрушение происходит при напряжении  $\sigma_p$  разрушения в шейке больше, чем предел текучести  $\sigma_T$  после общего течения в сечении нетто и последующего деформационного упрочнения, от области где разрушение происходит сколом (содержание волокон в изломе равно нулю). Область, где происходят квазихрупкие разрушения и  $\sigma_p > \sigma_T$  отделяется от области, где происходят хрупкие разрушения  $\sigma_p \leq \sigma_T$  с помощью второй критической температуры хрупкости  $T_{k2}$ , которая определяется из условия  $\sigma_p = \sigma_T$ . Как отмечается в [4] из опытов по растяжению гладких образцов, величина  $T_{НП}$  может быть вычислена по условиям одновременного удовлетворения критериев прочности и текучести  $\sigma_1 = \tau_0$ , и  $\sigma_i = \sigma_T$  т.е из условия разрушения на пределе текучести при температуре нулевой пластичности. Из этих критериев следует условие:

$$\sigma_1 / \sigma_i = \tau_0 / \sigma_T (T_{НП}). \quad (5)$$

Это условие по виду аналогично условию Г.В. Ужика, однако сопротивление отрыву  $\tau_0$  имеет здесь другой смысл [4],  $\tau_0$  - минимальное сопротивление хрупкому разрушению недеформированного материала, которое может быть реализовано только при  $T = T_{НП}$ . При других температурах сопротивление материала хрупкому разрушению будет выше, в том числе при второй критической температуре хрупкости  $T_{k2}$ , ниже которой  $\sigma_p < \sigma_T$ .

Температура нулевой пластичности образца для испытаний, в частности, образцов типа 1-4 по ГОСТ 25.506-85 или элемента металлоконструкций, может быть определена из условий одновременного удовлетворения критериев прочности и текучести

$$\sigma_1 = \tau_0, \quad \sigma_i = \sigma_T (T), \quad (6)$$

которые использованы Л.А. Копельманом [5]. Из этих условий, трактуемых как условия локального разрушения на пределе текучести, величина  $T_{НП}$  находится как решение уравнения (6)

$$\sigma_T (T) = \tau_0 / K_g \quad (7)$$

непосредственно следующего из критерия (6), где  $\sigma_T (T)$  – предел текучести при растяжении стандартных гладких образцов в температурном интервале;  $K_g$  – коэффициент жесткости напряженного состояния у вершины концентратора напряжений включая трещины. При отсутствии концентрации напряжений при одноосном растяжении  $K_g = 1$  и из (6) получается уравнение  $\sigma_T (T) = \tau_0$ , из которого следует, что для гладких образцов сопротивление отрывом  $\tau_0$  при температуре  $T_{НП}$  равно пределу текучести.

Ряд исследователей определяют сопротивление отрыву из условия равенства истинного сопротивления разрыву в шейке, условному пределу текучести  $\sigma_{0.2}$ , т.е. истинное разрушающее напряжение  $\sigma_p$  несколько превосходит предел текучести  $\sigma_T$ . Но из-за близости зависимостей  $\sigma_e \sim T$  и  $\sigma_T \sim T$  в окрестности температуры нулевой пластичности погрешность определения величины  $T_{НП}$  из уравнения (7) или из аналогичного уравнения

$$\sigma_e (T) = \tau_0 / K_g \quad (8)$$

будет находиться в пределах точности эксперимента.

*Эффективный коэффициент жесткости напряженного состояния.* Классическое определение коэффициента жесткости напряженного состояния  $K_g = \sigma_{\max} / \sigma_i$  для трещин и сингулярных (неограниченных) концентраторов напряжений, приведенное в монографии [5] и используемое в литературе, существенно завышает температуру нулевой пластичности, так как использует соотношение  $\sigma_{\max} / \sigma_i$  в одной точке (микрообъеме материала) у вершины концентратора, в то время, как  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_i$ , достигают своих максимумов в различных микрообъемах. Например, если использовать асимптотические выражения [4] для главных напряжений у конца трещины нормального отрыва

$$\sigma_{1,2} = K_1(2\pi r)^{-1/2} \cos \theta / 2(1 \pm \sin \theta / 2) \text{ и } \sigma_3 = 2\nu K_1(2\pi r)^{-1/2} \cos \theta / 2, \quad (9)$$

то для коэффициента  $K_g$  вместо величины 2,5, приведенной в [5], получается существенно меньшее значение  $K_g = 1.43$ . При этом значении (при любом фиксированном  $r > 0$ ) наибольшее главное напряжение  $\sigma_1$  достигается при  $\theta = 60^\circ$ , а максимальное касательное напряжение – при  $\theta = 86.9^\circ$ . С другой стороны, определение коэффициента  $K_g$ , основанное, как и линейная механика разрушения, на учете только сингулярных слагаемых в асимптотическом разложении полей напряжений, не учитывает многоосность напряженного состояния элемента конструкции вдали от концентраторов напряжений (брутто-сечениях) и с этой точки зрения занижает значения  $K_g$ .

Определим эффективный коэффициент жесткости  $K_g$  напряженного состояния с учетом условия пластичности Треска - Сен-Венана как отношение максимального растягивающего эффективного напряжения у вершины трещины (или сингулярного концентратора напряжений) к удвоенной величине эффективного максимального касательного макронапряжения, т.е.  $K_g = \sigma_{\max}^* / (2\tau_{\max}^*)$ , а в случае использования условия пластичности по Губеру-Мизесу как  $K_g = \sigma_{\max}^* / \sigma_i^*$ . Это определение отличается от принятого [5] не только тем, что в знаменателе вместо интенсивности напряжения  $\sigma_i^*$  стоит величина  $2\tau_{\max}^*$ , но в основном тем, что в нем фигурирует отношение максимальных эффективных напряжений, которые достигаются в различных микрообъемах у вершины трещины. Кроме того, общепринятое определение коэффициента жесткости напряженного состояния не позволяет учитывать влияния напряжений, действующих в направлении трещины. Отметим, что здесь для одноосного напряженного состояния ( $\sigma_1^* > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ) коэффициент  $K_g = 1$ ; для чистого сдвига ( $\sigma_1^* > 0, \sigma_2^* = 0, \sigma_3^* = -\sigma_1^*$ )  $K_g = 1/\sqrt{3} \approx 0.577$ ; для двухосного растяжения ( $\sigma_1 > 0, \sigma_1 \geq \sigma_2, \sigma_3 = 0$ )  $K_g = \sigma_1 / \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$  и максимум  $K_g$  равен  $K_g = 2/\sqrt{3} \approx 1.155$  и достигается при  $\sigma_2^* = \sigma_1^*/2$ . Для вариантов трехосного растяжения: ( $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = 0.5\sigma, \sigma_3 = 0.25\sigma$ )  $K_g = 1.51$ , ( $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = 0.5\sigma, \sigma_3 = 0.5\sigma$ )  $K_g = 2$ , ( $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = 0.75\sigma, \sigma_3 = 0.5\sigma$ )  $K_g = 3.2$  и наконец, для всестороннего равномерного растяжения или сжатия: ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$ )  $\sigma_i = 0, \tau_{\max} = 0$  и  $K_g = \infty$ .

Обобщенную формулу для расчета эффективного коэффициента жесткости  $K_g$  можно представить в виде:

$$K_g = \sigma_{\max}^* / \sigma_i^* \quad (10)$$

Отметим, что формула (10) с учетом [1,2] отражает влияние на феномен охрупчивания материала как неоднородности макронапряженного состояния в окрестности соответствующего концентратора напряжений, так и фактора влияния зон структурных концентраторов напряжений [6].

*Температура нулевой пластичности, как критерий предельного состояния изделия с макроконцентраторами напряжений.* Температура нулевой пластичности  $T_{НП}$  металлов и изделий с макроконцентраторами определяется из условий разрушения микрообъемов металла на пределе текучести. Для определения температуры  $T_{НП}$  необходимо знать коэффициент жесткости в зависимости от эффективных напряжений действующих в элементе конструкций  $K_g$ , сопротивление отрыву  $\tau_0$ , а также температурно-зависимую характеристику предела текучести от температуры  $T - \sigma_T(T)$  Температура  $T_{НП}$  находится из решения уравнения (6) в температурном интервале:

$$\sigma_T(T) = \tau_0 / K_g. \quad (11)$$

Для решения уравнения (11) может использоваться аппроксимация предела текучести в температурном интервале, предложенная Н.А. Махутовым [7]:

$$\sigma_T(T) = \sigma_T^0 \exp[\beta_T(T_0^{-1} - T^{-1})], \quad (12)$$

где  $T_0 = 293\text{K}$ ,  $\sigma_T^0$  – предел текучести при растяжении стандартных гладких образцов при температуре  $T_0$ ,  $\sigma_T(T)$  – предел текучести при температуре  $T$ ,  $\beta_T$  – характеристика материала, определяемая как и  $\sigma_T^0$  по экспериментальным данным.

Таким образом, температура нулевой пластичности  $T_{\text{НП}}$  определяется из условия, что происходит разрушение микрообъемов металла (трещинообразование) в концевой зоне концентраторов напряжений на пределе текучести, т.е. при  $T > T_{\text{НП}}$  и  $\sigma_{\text{max}} < \tau_0$  в микрообъемах материала возникают пластические деформации, а при  $T \leq T_{\text{НП}}$  и  $\sigma_{\text{max}} = \tau_0$  образуются хрупкие и квазихрупкие трещины с размерами пластических зон намного меньшими (хрупкие трещины), либо сопоставимыми с размерами структурного параметра  $\angle$ , который на порядок превосходит эффективный размер элемента микроструктуры ответственного за разрушение (диаметр зерна или субзерна, размер карбонитрида или включения). Для определения температуры  $T_{\text{НП}}$  необходимо знать коэффициент  $K_g$  жесткости напряженного состояния в зависимости от эффективных напряжений действующих в элементе конструкции, сопротивление отрыву  $\tau_0$ , а также температурно-зависимую характеристику  $\sigma_T(T)$  предела текучести от температуры  $T$  (12). Температура  $T_{\text{НП}}$  находится как решение уравнения (6) в температурном интервале и определяет квазихрупкое разрушение с пластической зоной у концентратора напряжений, сопоставимой с размером структурного параметра  $\angle$ . В трещинах нормального отрыва при одноосном растяжении, в концевой зоне при  $T = T_{\text{НП}}$  и  $\sigma_{\text{max}} < \tau_0$  возникают зоны пластичности, максимальный размер которых не превышает величины структурного параметра, и при  $\sigma_{\text{max}} = \tau_0$  у конца макротрещины возникает квазихрупкое разрушение с малой долей вязкой составляющей на поверхности разрушения. В этом случае, при достижении температуры нулевой пластичности и критической длине трещины, возникающие пластические деформации вызывают квазихрупкое разрушение у конца макротрещины и приводят к смене механизма разрушения: распространение макротрещины происходит с учетом устойчивого возникновения разрушающих микротрещин впереди фронта макротрещины с последующим слиянием с макротрещиной.

Наличие пластических деформаций в концевых зонах образующихся или существующих в элементах микротрещин при температуре нулевой пластичности и выше, приводит к стадии докритического роста микро и макротрещин, в то время как при достижении второй критической температуры хрупкости, стадия докритического роста исчезает и предельная нагрузка становится критической (трещины, как правило, становятся неустойчивыми). Это означает, что нормирование концентраторов напряжений и разработка критерия прочности, должны быть основаны на предельном состоянии (образовании хрупких и усталостных устойчивых трещин), предложенном д.т.н., проф. Н.С. Стрелецким [8], если выбранные марки сталей и заложенные концентраторы напряжений обеспечивают эксплуатацию конструкции в диапазоне температур, повышающих максимальную температуру нулевой пластичности конструкции:

$$T > T_{\text{НП}}. \quad (13)$$

В заключение необходимо отметить, что расчет характеристической температуры нулевой пластичности  $T_{\text{НП}}$  с использованием структурно-аналитического критерия разрушения [1,2] позволяет, с помощью параметров тензора магнитной дисторсии [1] и метода магнитной памяти дать оценку  $T_{\text{НП}}$  в конкретном месте реального изделия в условиях эксплуатации, усиливая качество прогноза предельного состояния металлической конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубов, А.А. Элементы механики разрушения основанные на методах структурно-аналитической мезомеханики и магнитной памяти металла / А.А. Дубов, В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, В.В. Малинин // Диагностика оборудования и конструкций методом магнитной памяти. – М.:ООО «Энергодиагностика», 2011. – 255с.
2. Малинин, В.В. Структурно-аналитический критерий разрушения с высокоградиентными полями макронапряжений / Диагностика оборудования и конструкций методом магнитной памяти. – М.:ООО «Энергодиагностика», 2011. – 255с.
3. Махутов, Н.А. Подходы механики разрушения в концепции инженерной безопасности / Н.А. Махутов // Физико-химическая механика материалов. – 1996. – № 2. – С. 35-42.
4. Востров, В.К. Критические температуры хрупкости и пластичности в конце трещины нормального отрыва при плоской деформации / В.К. Востров // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – №5. – С. 17-22.
5. Копельман, Л.А. Сопrotивление сварных углов хрупкому разрушению / Л.А. Копельман. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232с.
6. Дубов, А.А. Метод магнитной памяти и приборы контроля: учеб. пособие / А.А. Дубов, Ал.А. Дубова, С.М. Колокольников. – М.: «Тиссо», 2006. – 332с.
7. Махутов, Н.А. Сопrotивление элементов конструкций хрупкому разрушению / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272с.
8. Стрелецкий, Н.С. К вопросу развития методики расчета по предельным состояниям / Н.С. Стрелецкий. – Кн. Развитие методики расчета по предельным состояниям. – М.: Изд-во литература по строительству, 1971. – С. 5-36.

**Малинин Владимир Владиславович**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Старший преподаватель кафедры «Динамика и прочность машин»

E-mail: malinin2008@yandex.ru

V.V. MALININ

**CRITICAL TEMPERATURES OF DUCTILE-BRITTLE MATERIAL  
TRANSITION AND THEIR INTERRELATION WITH FAILURE CRITERIA**

*This article describes the approach of estimating temperature of ductile-brittle transition in the vicinity macroconcentrators stress accounts for the influence zones of structural concentrators.*

**Key words:** macroconcentrators, brittle, quasi-brittle and ductile fracture, limit state criteria.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Dubov, A.A. Jelementy mehaniki razrushenija osnovannye na metodah strukturno-analiticheskoj mезomehaniki i magnitnoj pamjati metalla / A.A. Dubov, V.G. Malinin, N.A. Malinina, V.V. Malinin // Diagnostika oborudovanija i konstrukcij metodom magnitnoj pamjati. – М.:ООО «Jenergodiaagnostika», 2011. – 255s.
2. Malinin, V.V. Strukturno-analiticheskoj kriterij razrushenija s vysokogradientnymi poljami makronaprjazhenij / Diagnostika oborudovanija i konstrukcij metodom magnitnoj pamjati. – М.:ООО «Jenergodiaagnostika», 2011. – 255s.
3. Mahutov, N.A. Podhody mehaniki razrushenija v koncepcii inzhenernoj bezopasnosti / N.A. Mahu-tov // Fiziko-himicheskaja mehanika materialov. – 1996. – № 2. – S. 35-42.
4. Vostrov, V.K. Kriticheskie temperatury hрупkosti i plastichnosti v konce trewiny normal'nogo otryva pri ploskoj deformacii / V.K. Vostrov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2008. – №5. – S. 17-22.
5. Kopel'man, L.A. Soprotivlenie svarnyh uglov hрупkomu razrusheniju / L.A. Kopel'man. – L.: Mashinostroenie, 1978. – 232s.
6. Dubov, A.A. Metod magnitnoj pamjati i pribory kontrolja: ucheb. posobie / A.A. Dubov, Al.A. Dubova, S.M. Kolokol'nikov. – М.: «Tisso», 2006. – 332s.
7. Mahutov, N.A. Soprotivlenie jelementov konstrukcij hрупkomu razrusheniju / N.A. Mahutov. – М.: Mashinostroenie, 1981. – 272s.
8. Streleckij, N.S. K voprosu razvitija metodiki rascheta po predel'nym sostojanijam / N.S. Strelec-kij. – Kn. Razvitie metodiki rascheta po predel'nym sostojanijam. – М.: Izd-vo literatura po stroitel'stvu, 1971. – S. 5-36.

**Malinin Vladimir Vladislavovich**

State University – Education Science Production Complex

Senior lecturer of department “Dynamics and strength of machines”

302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,

E-mail: malinin2008@yandex.ru

В.П. ТИХОМИРОВ, А.Н. ЧВАЛА, А.В. КОШЕЛЕВ

## АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ

*Проведён анализ применяемых экспериментальных методов исследования процесса сцепления колеса с рельсом. Показано, что дальнейшее совершенствование методов экспериментального исследования связано с углублением знания о природе сцепления и выявлением более тонких механизмов взаимодействия колеса с рельсом.*

**Ключевые слова:** экспериментальный метод, механизм взаимодействия, колесо, рельс.

При выборе методов экспериментальных исследований трибологических свойств системы «колесо-рельс» исследователь всегда сталкивается с противоречием между необходимостью максимально детерминировать факторы, определяющие эти свойства, в целях познания природы их действия и взаимосвязей, и необходимостью воспроизводить естественную стихийную совокупность этих факторов в экспериментах, целью которых является получение практических выводов. В связи с этим возникает потребность в анализе применяемых методов исследования трибологических свойств этой системы и в обобщении практики их применения в исследовательской работе, с точки зрения затратности и эффективности применения методов для конкретных задач.

Существующие методы экспериментальных исследований сцепления колеса с рельсом можно разделить на три основные группы: 1) методы натурных и эксплуатационных испытаний; 2) методы испытаний на катковых стендах; 3) методы физического моделирования.

Достоинством методов **натурных и эксплуатационных испытаний** является то, что они позволяют учесть максимально возможное число факторов, влияющих на условия сцепления в реальной эксплуатации, а также позволяют обнаруживать вновь возникшие или ранее не замеченные факторы. Эти методы являются одними из старейших и применяются практически с самого появления локомотивной тяги до настоящего времени. Первые опыты по изучению сцепления колес с рельсами провели Хедлей и Блеккетт еще в 1812 году. В нашей стране первыми подобными исследованиями можно считать опыты проф. М.Ф. Окатова, проведенные в 1869 году.

Вместе с тем эти методы требуют наибольшего количества времени и материальных затрат. Случайный разброс регистрируемых коэффициентов сцепления в естественных условиях даже для одного и того же состояния рельсов и того же значения относительного или абсолютного скольжения колеса по рельсу может достигать 30-50% относительно среднего значения. Кроме того, в условиях реализации коэффициентов сцепления, близких к предельным, или при исследовании процесса боксования, регистрируемые процессы часто имеют характер нестационарных. Для обеспечения воспроизводимости результатов эксперимента, в зависимости от цели исследований, необходимо значительное число замеров. Наименьшее число замеров может потребоваться, например, при исследовании динамики тяговых приводов в режиме боксования, когда важно просто реализовать максимально возможные значения коэффициентов трения и динамических процессов, порождаемых трением; в этот случае может понадобиться порядка десятков замеров. Однако когда речь идет об исследовании самого трения в системе «колесо-рельс», как физического явления, число замеров вырастает на порядки. Весьма значительны и другие затраты людских и материальных ресурсов. Так, для проведения подобных испытаний отделением EMD фирмы Дженерал Моторс [4] потребовалось совершить 1100 опытных поездок. При этом было затрачено 2400 человеко-часов технического персонала для подготовки экспериментов, 7100 человеко-часов технического персонала участвующего в экспериментах, 3550 человеко-часов локомотивных бригад непосредственно в ходе эксперимента и 3000 человеко-часов для анализа полученных данных. К этому, соответственно, прибавились затраты на использование локомотива, вагон-

лаборатории и опытных единиц, а также необходимость значительного количества времени на занятие перегона на трех опытных участках.

Таким образом, натурные и эксплуатационные испытания необходимы в тех случаях, когда: 1) необходимо исследование новых факторов, влияющих на сцепление колеса с рельсом в реальных условиях; 2) необходима окончательная проверка выводов, сделанных на основании менее затратных методов исследований; 3) результаты исследований, дают непосредственный выход на получение значительного экономического эффекта, заведомо перекрывающего издержки, или связаны с принятием решений, связанных со значительными финансовыми рисками (внедрение новой системы улучшения сцепления, определение тяговых характеристик локомотива, определение весовых норм поездов и т.п.).

В то же время натурные и эксплуатационные испытания неэффективны в случае, когда задачей исследователя является анализ значительного числа отдельных факторов «в чистом виде», при максимальном исключении влияния других факторов, действующих на коэффициент сцепления, а также в случаях, если на данном этапе у исследователя еще нет результатов, позволяющих уверенно рассчитывать на коммерческий успех.

Сущность методов с **использованием катковых стендов** заключается в попытке максимального приближения лабораторного эксперимента к натурным условиям.

Катковые стенды используются как в отечественной, так и в зарубежной практике, и большее число из ныне имеющихся стендов было построено в период 50-80-х годов прошлого века (табл. 1) [2]

Таблица 1 – Катковые стенды

№	Страна, город	Год постройки	Кол-во осей	Максимальная скорость, км/ч	Осевая нагрузка, кН	Мощность на одну ось, кВт	Диаметр катка, мм	Ширина колеи, мм
1.	ФРГ, Минрен	1953	6	140	200	27	920	1435
2.	ФРГ, Кас-сель	1972	2	280	250	180	1250	1435
3.	ФРГ, Аа-хен	1973	2	300	200	100	1250	1435
4.	ФРГ, Мюнхен	1979	4/6	500	250	40	1400	1435 1876
5.	Англия, Дерби	1965	2	395	-	40	1145	1435
6.	Англия, Дерби	1966	2	240	225	22,4	788	1435
7.	Англия, Дерби	1971	2	325	200	37	1230	1435
8.	Англия, Оксфорд	1971	1	125	-	20	953	1435
9.	Япония, Кониташи	-	4	400	200	-	2250	1435
10.	Япония, Кониташи	-	4	300	180	60	1500	1676
11.	Австрия, Вена	-	2	250	200	80	1000	1435
12.	Франция, Витри	1963	4	300	200	90	890	1435 1680
13.	США, Пуэбло	-	8	483	366	53,7	-	1435

Конструкция стендов различается между собой, что вызвано целым рядом факторов: разными задачами исследований в период создания стендов, разными финансовыми возможностями, разными требованиями в воспроизведении тех или иных факторов сцепления и т.п. На некоторых стендах (например, на созданном в ВЭЛНИИ) оси опорных катков расположены перпендикулярно оси колесной пары.

Некоторые исследователи придерживаются точки зрения, что имитация рельсового пути с помощью катков не позволяет воспроизвести условия сцепления колеса с рельсом в достаточной для практических задач мере, и предлагают свои принципы создания стендовых установок. Так, А.Л. Голубенко в своей монографии [2] утверждает, что для воспроизведения в лабораторных условиях картины сцепления, в достаточной степени, соответствующей реальной по условиям геометрии, кинематики и динамики контактирующих тел, требуется использование натурального колеса и рельса, нагрузки на которые соответствуют действующим на реальном локомотиве. В качестве примера рассмотрим стенд, используемый кафедрой

«Локомотивы» Луганского университета (рис. 1).

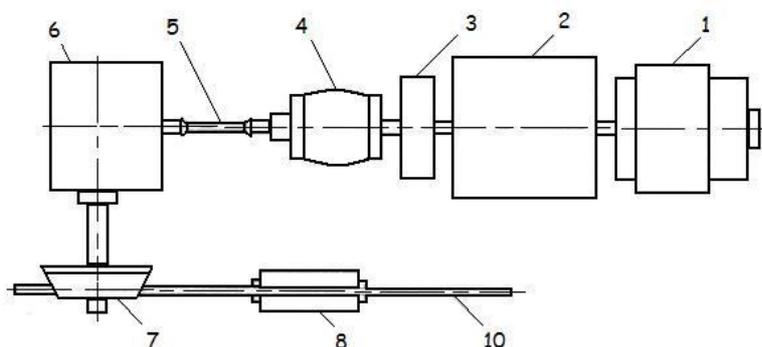


Рисунок 1 – Принципиальная схема стенда

На схеме обозначены: 1 – разгонный двигатель; 2 – маховик; 3 – мультипликатор; 4 – гидротрансформатор; 5 – карданный вал; 6 – тяговый редуктор; 7 – колесо; 8 – магнито-рельсовый тормоз; 9 – рельс.

Подвод энергии от привода осуществляется к колесу, а отвод – от рельса путем его торможения магнито-рельсовым тормозом.

В таблице 2 приведены основные характеристики стенда [2].

Таблица 2 – Основные характеристики стенда

1.	Тип, длина рельса, м	P50, P65, P75; 12,5
2.	Вертикальные силы нажатия колеса на рельс, кН	60... 135
3.	Скорость движения в режиме тяги выбега	0...5 0.. .40
4.	Привод колеса	электрический инерционный с гидромеханической передачей
5.	Тормоз рельса	магнито - рельсовый
6.	Метод измерения сил	тензометрический
7.	Метод измерения скоростей и скольжения	Скоростной киносъемкой, видео камерой, магнитной записью

Таким образом, катковые стенды необходимо создавать в тех случаях, когда изучение сцепления и факторов, влияющих на него, является постоянной тематикой исследовательской организации, существуют предсказуемые источники финансирования данной тематики в будущем и стабильные исследовательские кадры, которые намерены вести работу на данном стенде и знать тонкости методики такого вида исследований. Кроме того, следует учесть и возможность предоставления построенного стенда в аренду или иное оплачиваемое пользование для исследований сторонним организациям.

Катковые стенды неэффективны в тех случаях, когда для исследований: 1) необходимо полное воспроизведение всех естественных факторов, влияющих на процесс сцепления колеса

и рельса; 2) необходимо изучить явление при существенном отличии условий от существующих в эксплуатации; 3) тематика исследований сцепления является разовой или временной.

В первом случае необходимы натурные испытания, в остальных целесообразно использование **физического моделирования**. Лабораторные физические модели необходимы также на ранней стадии исследования новых факторов, влияющих на процесс сцепления, механизм действия которых еще недостаточно изучен либо недостаточно отработаны методики их исследования.

Катковые стенды позволяют решить задачу исследования влияния различных факторов, влияющих на сцепление в контакте «колесо-рельс» независимо друг от друга, в то же время максимально исключая влияние разницы в масштабе реальной и физической модели, в интенсивности тепловыделения в зоне контакта, в величине упруго-пластических деформаций контактируемых поверхностей и т.п. В то же время катковые стенды не позволяют воспроизвести естественные процессы формирования загрязнений поверхности колеса и рельса, их износов, а также могут не воспроизводить каких-либо факторов, которые относятся к значимым, но не обнаружены предшествующими исследователями или не выделены в качестве самостоятельных факторов. Кроме того, строительство каткового стенда требует существенных единовременных капиталовложений, значительного места в лабораторном корпусе или постройке специального ангара.

Использование лабораторных стендов и установок позволяет выделить из большого количества факторов те из них, влияние которых на процесс сцепления проверяется, в лабораторных условиях легче соблюсти принцип сформулированный В.Д. Кузнецовым: «Задача научного исследования и заключается в том, чтобы исследовать явления не во всей сложности, а в упрощенном виде, когда из всех влияющих на это явления факторов изменяется только один, а остальные остаются неизменными».

Что же касается методов математического моделирования, то основным препятствием к их широкому использованию является проблема выбора адекватной математической модели. Как будет показано ниже, на сегодняшний день можно утверждать, что в рамках макротриботехники пока не удалось выработать единой универсальной модели сцепления колеса с рельсом, пригодной для решения даже наиболее распространенных задач, связанных с этим явлением - от прогнозирования тяговых свойств локомотива до анализа автоколебаний при боксовании.

Большая часть исследователей выделяет основные факторы, влияющие на коэффициент сцепления, которые можно условно объединить в следующие группы по возможностям их измерения и предсказания в ходе натурального эксперимента (как первичного метода выделения значимых факторов).

В первую группу можно объединить факторы, имеющие в силу своей природы чисто случайный характер и могущие существенно меняться в ходе опыта. Внутри данной группы можно выделить две основные подгруппы: 1) непредсказуемые во время опыта факторы, определяющие состояние контактирующих поверхностей (влажность, наличие загрязнений и смазки); 2) случайные факторы с прогнозируемыми среднестатистическими характеристиками, в основном климатические (температура, влажность, количество осадков, периоды листопада).

Во вторую группу предлагается включить факторы, меняющиеся в ходе опыта случайным образом, но значения которых можно измерить или оценить инструментальными средствами: 1) скорость скольжения колеса по рельсу (абсолютная и относительная); 2) попутная скорость движения; 3) факторы, определяющие наличие и величину поперечной составляющей скольжения (движение в кривых, база тележки, угол набегания).

В третью группу можно объединить факторы, имеющие случайный характер, но мало изменчивые в ходе опыта, в связи с чем они могут быть предварительно измерены или оценены какие-то их устойчивые характеристики. В этой группе также могут быть выделены две подгруппы факторов: 1) технологические (шероховатость, твердость и иные физико-

химические свойства контактирующих поверхностей); 2) эксплуатационные (нормы и допуски на содержание пути и подвижного состава, в частности, прокат бандажей).

Наконец, в четвертую группу предлагается объединить те из факторов, которые детерминированы конструктивными особенностями экипажа и пути. Их можно разделить на две подгруппы: 1) факторы, влияющие на статическое и динамическое распределение нагрузок на оси (в т.ч. параметры рессорного подвешивания); 2) прочие конструктивные факторы (жесткость и деформации пути, профили колеса и рельса, диаметры колес, статическая нагрузка на ось и т.п.);

Данное разделение групп факторов является достаточно условным, т.к., например, влияние скорости движения может быть связанным с динамическими нагрузками, зависящими от конструктивных факторов. Опытные испытания показывают, что при чистом скольжении коэффициент трения зависит в основном от загрязнений их поверхностей [5], но чем больше шероховатость, тем больше загрязнений скапливается в углублениях рельса и тем меньше коэффициент трения (эффект «лужи») [11]. Величина коэффициента трения-скольжения изменяется от 0.08 на смазанных рельсах и до 0.6 на чистых и сухих. Окислы железа, очистка большим количеством воды и песок увеличивают, а различные органические вещества: глина, притормаживание полимерными колодками снижают коэффициент трения [6]. Это надо учитывать в случае проведения многофакторного регрессионного анализа, чтобы избежать мультиколлинеарности.

Как показывает практика, наиболее важными факторами в большинстве случаев являются те, которые определяют состояние контактирующих поверхностей, т.е. факторы первой группы. Так, при обмывке поверхностей бандажей и рельсов щелочными растворами каустической соды и известкового молока были реализованы коэффициенты сцепления соответственно 0,45 и 0,40, в то время как при рельсах, загрязненных маслом, коэффициент сцепления падает до 0,1. Обмывка поверхностей контакта сильной струей воды позволяла реализовать коэффициенты сцепления до 0,37. Лабораторные исследования на стенде EMD при чистых стальных поверхностях показали возможность достижения значений коэффициента трения 0,6-0,7 [4]. Предложение специалистов EMD увеличивать допустимую скорость относительного скольжения вместо применения песка также предположительно связано с явлением изменения состояния контактирующих поверхностей колеса и рельса при проходе первых колес экипажа по месту загрязнения.

Возможности исследований факторов первой группы методами натурального эксперимента ограничены, в силу разнообразия факторов и случайного их характера. Чаще всего в таких исследованиях при варьировании факторов используются самые общие характеристики исходного состояния рельсов (сухие, с наличием влаги, с наличием масляного пятна), применение песка или иного исследуемого средства увеличения сцепления, характеристика внешних условий (климатическая зона, путь в тоннеле) и т.п. Более детальное выделение значимых факторов этой группы производится на катковых стендах и физических моделях.

Изучение факторов второй группы, как правило, занимает основную часть исследований как методами натурального эксперимента, так и стендового, а также физического моделирования. К настоящему моменту рядом исследователей путем использования этих методов получены обширные эмпирические данные о зависимости силы трения от относительного упругого скольжения [1, 3, 7, 8, 9, 10, 12].

Изучение факторов третьей группы обычно ведут с использованием методов натурального и стендового эксперимента, причем в ряде случаев натуральный эксперимент может быть пассивным, путем документирования параметров данных факторов перед экспериментом и сравнения результатов, полученных на участках пути разного состояния, при разной величине проката бандажа и т.п.

При изучении факторов четвертой группы основная проблема заключается в том, что для сравниваемых натуральных объектов обычно изменяется несколько факторов, например, при сравнении тяговых свойств локомотивов одновременно может меняться база тележки, зазоры в конструкции буксовых узлов рессорного подвешивания и механизмов передачи тя-

ги и т.п. Несколько проще обстоит дело для тех параметров, которые можно изменить на одном и том же локомотиве, например, осевую нагрузку. Положение облегчает то, что более детальные исследования можно продолжить на катковых стендах, хотя часть факторов (перераспределение нагрузки по осям, например), не может быть воспроизведена на стенде, имеющем одну колесную пару.

Наконец, существуют факторы, которые изучались лишь отдельными исследователями, или систематическое изучение которых началось лишь недавно. К ним относятся, в частности, действие электрического тока, протекающего через контакт колеса и рельса [13] и мгновенное тепловыделение в точке контакта [14,15]. В работе [13] приводятся результаты испытаний электровозов ВЛ22м и ВЛ23 на Приднепровских и Донецкой дорогах. У данного типа электровозов постоянного тока через точку контакта колеса и рельса проходит ток значительной величины. Во время работы двигателей с током 250 А коэффициент сцепления равен 0,25, а при токе 500 А - 0,49 (рис.2). При изменении режима трогания поездов с места электровоз потребляет наибольшие допустимые токи, работает на пределе сцепления и реализует большие значения коэффициента сцепления.

В работах [14,15] указывается, что если тангенциальное усилие в конце фазы микропоскальзывания превысит сопротивление деформации, то из-за повышения работы сил трения на находящихся в зоне контакта микровыступах могут возникать локальные зоны кратковременного повышения температуры, так называемые температурные вспышки, где за несколько миллисекунд температура может достигнуть 1000°С и больше. Указывается, что материал на участке размерами в несколько долей миллиметра приобретает свойства текучести, сопротивление деформации уменьшается. Коэффициент сцепления сначала увеличивается, но увеличивающееся проскальзывание приводит к дальнейшему повышению температуры, а следовательно, к дальнейшему снижению усилия сопротивления и уменьшению коэффициента сцепления [16].

Таким образом, дальнейший прогресс экспериментальных исследований сцепления в контакте колеса и рельса в значительной мере предопределен развитием техники эксперимента, а именно, созданием средств прямых или косвенных измерений количественных характеристик тех факторов, которые сейчас относятся к непредсказуемым. В свою очередь, создание таких средств измерений базируется на знаниях о природе сцепления, накопленных, прежде всего путем исследований на катковых стендах и физических моделях, детерминирующих действие внешних факторов.

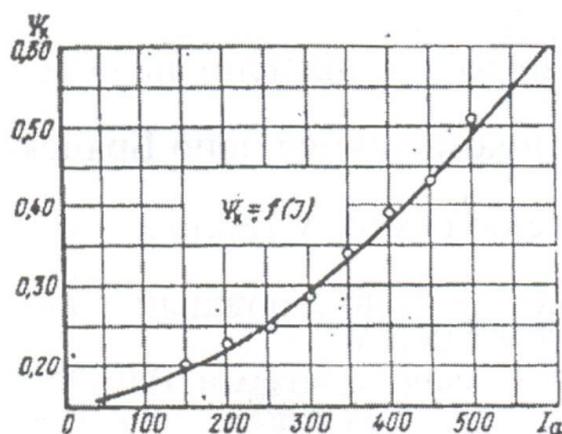


Рисунок 2 – Результаты испытания электровозов ВЛ22м и ВЛ23 на Приднепровской и Донецкой железных дорогах

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский, С.М. Сход колеса с рельсов / С.М. Андриевский, В.А. Крылов // Труды ЦНИИ МПС, вып. 393. М.: Транспорт, 1969. – С. 20-41.
2. Голубенко, А.Л. Сцепление колеса с рельсом / А.Л. Голубенко. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – Луганск: Из-во ВУГУ, 1999. – 476 с.
3. Сиаммарелла, С.А. Закон подобия для зависимости между крипом и сцеплением при контакте с сухим трением / С.А. Сиаммарелла, С. Кумар, Л. Нэйлеску, Б.Б. Сэт // Тр. Амер. общ. инж.-мех.: Конструирование и технология машиностроения. – 1979. – №3. – С. 122-129.
4. Лонгстон мл. Итами. Исследования явления трения-крипа для локомотива / Лонгстон мл. // Труды Амер.Общ. инж.-мех.: Конструирование и технология машиностроения. – 1980. – №3. – том 102. – С 241-248.
5. Лужнов, Ю.М. Сцепление колес с рельсами (природа и закономерности) / Ю.М. Лужнов // Тр. ВНИИЖТ.М.: Интекс, 2003. – 144с.

6. Марков, Д.П. Коэффициент трения и сцепления при взаимодействии колёс с рельсами / Д.П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – №4. – С.12-25.
7. Меншутин, Н.Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях / Н.Н. Меншутин // Труды ЦНИИ МПС, вып. 188. М: Трансжелдориздат, 1960. – С. 113-132.
8. Harris T.A. An Analytical Method to Predict Sliding in Thrust - Eoaded, angular contact Ball Bearings // Trans/ ASME. Ser.F.-1971.-V.93.-Nr. 1.-P.17-21.-32-38.
9. Kraft K. Die Haftreibung // Elektrische Bahnen. 1968. Heft 6. S. 142 - 150; Heft 7. S. 161 -170; Heft 8. S. 190 - 198; Heft 9. S. 214 - 219.
10. Muller C. Th. Kraftwirkungen an einem zweiachsigen Triebgestell bei Antrieb der Radsatze durch Gelenkwellen // Glasers Annalen. 1961. Heft 6. S. 203 - 209.
11. Tadao Ohyama. Tribological studies on adhesion phenomena between whell and rail at high speed//Wear.1991.V.144.P.263-275.
12. Yokose K. On the Measuring Method of the Greep Force between Wheel and Rail. - Quarterly Reports of the Railway Technikal Research Institute // Japanese National Railways. 1973. Vol. 14. № 1. S. 43 -47.
13. Рудяков, З.З. Резервы увеличения весовых норм поездов / З.З. Рудяков // Железнодорожный транспорт №2. – 1962. – С.28-31.
14. Buwden F.I./Ruiler K.E.W. Phusical properties of surfaccs-Prue Ruy.Soc.1936,A154,s.640.
15. Vetz H. Somme-K Grenzflachentemperaturen bei Gteitbanspruchiini; und deren Wirkung-Vortrag auf der Techischen Aibeitstagung des MZV Stuttgart.1972
16. Saumwthtr- Winkle G. Eine neue Gleitschutzgeiieration fur die Eisenbahn unter Verwendung von Mikroprozessoren-Elektr Bahnen.1981.79.№9.S.331-336.

**Тихомиров Виктор Петрович**

Брянский государственный технический университет  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Детали машин»  
Тел. 8 (4832) 56-02-61

**Чвала Андрей Николаевич**

Брянский государственный технический университет  
Аспирант кафедры «Локомотивы»  
Тел. 8 (4832) 60-20-32  
E-mail: Chvala\_A.N.@mail.ru

**Кошелев Алексей Викторович**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск  
Инженер  
241035, г. Брянск, бул. 50-летия Октября, 7  
Тел. (4832) 56-02-61

---

V.P. TIHOMIROV, A.N. CHVALA, A.V. KOSHELEV

**ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION OF EXPERIMENTAL METHODS  
OF COEFFICIENT OF TRACTION RESEARCHES**

*The analysis of experimental methods of research of coupling process of a wheel with a rail is carried out. It is shown, that the further perfection of methods of an experimental research is connected with deepening of knowledge of the nature of coupling and revealing of more thin mechanism of interaction of a wheel with a rail.*

**Key words:** *experimental methods, mechanism, interaction, wheel, rail.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Andrievskij, S.M. Shod kolesa s rel'sov / S.M. Andrievskij, V.A. Krylov // Trudy CNII MPS, vyp. 393. M.: Transport, 1969. – S. 20-41.
2. Golubenko, A.L. Sceplenie kolesa s rel'som / A.L. Golubenko. – Izd. 2-e, dop. i pererab. – Lugansk: Iz-vo VUGU, 1999. – 476 s.
3. Siammarella, S.A. Zakon podobija dlja zavisimosti mezhdu kripom i scepleniem pri kontakte s su-him treniem / S.A. Siammarella, S. Kumar, L. Njejesku, B.B. Sjet // Tr. Amer. obw. inzh.-meh.: Konstruirovanie i tehnologija

mashinostroenija. – 1979. – №3. – S. 122-129.

4. Longston ml. Itami. Issledovanija javlenija trenija-kripa dlja lokomotiva / Longston ml. // Trudy Amer.Obw. inzh.-meh.: Konstruirovanie i tehnologija mashinostroenija. – 1980. – №3. – tom 102. – S 241-248.

5. Luzhnov, Ju.M. Sceplenie koles s rel'sami (priroda i zakonomernosti) / Ju.M. Luzhnov // Tr. VNI-IZhT.M.: Inteks, 2003. – 144s.

6. Markov, D.P. Kojefficient trenija i sceplenija pri vzaimodejstvii koljos s rel'sami / D.P. Markov // Vestnik VNIIZhT. – 2005. – №4. – S.12-25.

7. Menshutin, N.N. Issledovanie skol'zhenija kolesnoj pary jelektrovoza pri realizacii sily tjagi v jekspluatacionnyh uslovijah / N.N. Menshutin // Trudy CNII MPS, vyp. 188. M: Transzheldorizdat, 1960. – S. 113-132.

8. Harris T.A. An Analytical Method to Predict Sliding in Thrust - Eoaded, angular contact Ball Bearings // Trans/ ASME. Ser.F.-1971.-V.93.-Nr. 1.-P.17-21.-32-38.

9. Kraft K. Die Haftreibung // Elektrische Bahnen. 1968. Heft 6. S. 142 - 150; Heft 7. S. 161 -170; Heft 8. S. 190 - 198; Heft 9. S. 214 - 219.

10. Muller C. Th. Kraftwirkungen an einem zweiachsigen Triebgestell bei Antrieb der Radsatze durch Gelenkwellen // Glasers Annalen. 1961. Heft 6. S. 203 - 209.

11. Tadao Ohyama. Tribological studies on adhesion phenomena between whell and rail at high speed//Wear.1991.V.144.P.263-275.

12. Yokose K. On the Measuring Method of the Greep Force between Wheel and Rail. - Quarterly Reports of the Railway Technikal Research Institute // Japanese National Railways. 1973. Vol. 14. № 1. S. 43 -47.

13. Rudjakov, Z.Z. Rezervy uvelichenija vesovyh norm poezdov / Z.Z. Rudjakov // Zheleznodorozhnyj transport №2. – 1962. – S.28-31.

14. Buwden F.I./Ruiler K.E.W. Phusical properties of surfaccs-Prue Ruy.Soc.1936,A154,s.640.

15. Vetz H. Somme-K Grenzflachentemperaturen bei Gteitbanspruchiini; und deren Wirkung-Vortrag auf der Techischen Aibeitstagung des MZV Stuttgart.1972

16. Saumwthtr- Winkle G. Eine neue Gleitschutzgeiieration fur die Eisenbahn unter Verwendung von Mikroprozessoren-Elekttr Bahnen.1981.79.№9.S.331-336.

**Tihomirov Viktor Petrovich**

Bryansk state technical university

Doctor of technical science, professor, head of department “Machine elements”

Tel.: 8-4832-56-02-61

**Chvala Andrey Nickolaevich**

Bryansk state technical university

Post-graduate student of department “Locomotives”

Tel.: 8-4832-60-20-32

e-mail: Chvala\_A.N.@mail.ru

**Koshelev Aleksey Viktorovich**

Bryansk state technical university, Bryansk

Engineer

241035, Bryansk, bul.50-letija Oktyabrya, 7.

Tel.: 8-4832-56-02-61

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

УДК 532.5

Е.П. КОРНАЕВА, Л.А. САВИН

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В УПЛОТНЕНИИ МАЛОЙ КОНУСНОСТИ**

*Исследуется напорно-сдвиговое течение вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости в системе ротор - щелевое гидродинамическое уплотнение формы цилиндр - конус. Математическая модель процесса базируется на уравнении Рейнольдса, учитывает переменную геометрию объекта исследования. В качестве результатов приводятся поля давлений и расход смазочного материала при различных значениях давления подачи и конусности в диапазоне применимости уравнения Рейнольдса.*

**Ключевые слова:** напорно-сдвиговое течение, вязкая несжимаемая ньютоновская жидкость, щелевое гидродинамическое уплотнение, ротор, поле давлений, расход жидкости.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Щелевые гидродинамические уплотнения предназначены для герметизации роторов центробежных насосов и компрессоров, в которых перекачиваемая жидкая среда находится под большим давлением, при этом необходимо ограничивать ее вытекание через зазоры между вращающимся валом и неподвижным корпусом. Щелевые гидродинамические уплотнения являются ответственным элементом всей конструкции, т.к. выход их из строя ведет к остановке всего агрегата. Помимо основных функций: ограничивать перетоки среды, уплотнение представляет собой полноохватный подшипник жидкостного трения, что позволяет использовать его как дополнительный опорный узел [1]. Поэтому помимо расхода смазочного вещества необходим расчет полей давлений внутри смазочного слоя.

В данной работе рассматриваются щелевые гидродинамические уплотнения конической формы. Проведенный литературный обзор существующих работ других авторов показал недостаточность исследований уплотнений такого вида.

Несмотря на простоту конструкции, математическое моделирование такого рода объектов представляет сложную задачу. Процесс течения жидкости в уплотнении описывается уравнениями Навье-Стокса и неразрывности, которые даже в простой постановке задачи сложны в реализации. Проведенные на основе теории подобия и анализа размерностей исследования показали, что упростить указанные уравнения и свести их к одному так называемому уравнению Рейнольдса, как это возможно для цилиндрических уплотнений и подшипников жидкостного трения, можно, при малой конусности, не превышающей величины  $10^{-3}$ . При больших значениях конусности теория Рейнольдса дает неадекватные результаты.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Рассматривается ламинарное течение жидкости в системе ротор – щелевое гидродинамическое уплотнение формы цилиндр – конус, изображенной на рисунке 1. Длина уплотнения  $L$ , малый и большой диаметры  $D_1$  и  $D_2$  соответственно, диаметр ротора  $d$ , ось ротора смещена параллельно оси уплотнения на расстояние  $e$ , средние радиальные зазоры при малом и большом диаметре равны  $h_{01}$  и  $h_{02}$  соответственно, угловая скорость вращения ротора  $\omega$ . Жидкость подается под давлением  $P_1$  в конфузурную область уплотнения и вытекает под давлением  $P_0$ .

Процесс считается стационарным и изотермическим, жидкость принимается вязкой несжимаемой ньютоновской и полностью заполняет зазор между ротором и уплотнением. На поверхностях уплотнения и ротора действуют условия прилипания.

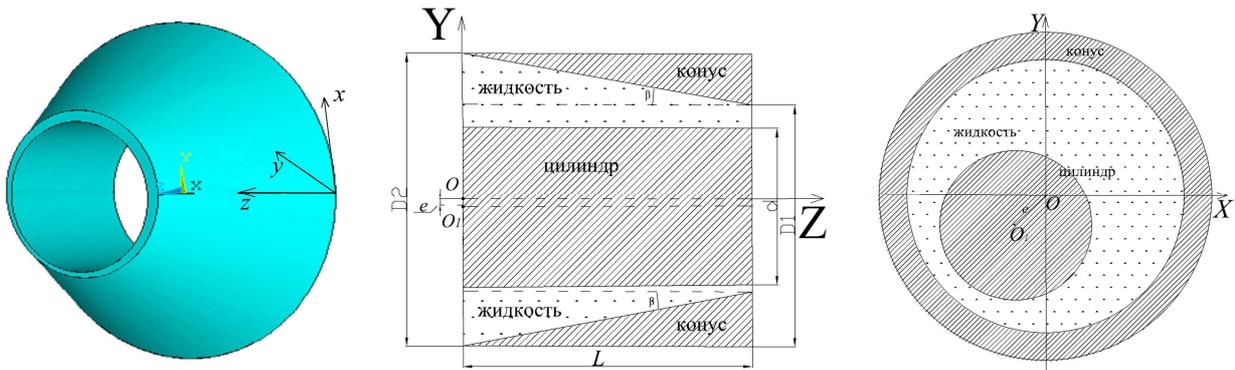


Рисунок 1 – Щелевое гидродинамическое уплотнение

Математическая модель изучаемого процесса базируется на уравнениях Навье-Стокса и неразрывности, которые в декартовой системе координат с учетом указанных выше допущений в скалярной форме записываются следующим образом<sup>1</sup>:

$$\begin{cases} V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_k} \right), & i, j, k = \overline{1,3}; \\ \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0; \end{cases} \quad (1)$$

где  $\vec{V} = [[V_x \quad V_y \quad V_z]]$  – вектор скорости;

$x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = z$  – координаты;

$P$  – функция давления;

$\rho$  – плотность жидкости;

$\nu$  – кинематическая вязкость;

Граничные условия для вектора скорости на поверхностях уплотнения и ротора имеют вид соответственно:

$$\vec{V}(x,0,z) = [[0 \quad 0 \quad 0]], \quad \vec{V}(x,h(x,z),z) = [[0 \quad \omega r \quad 0]], \quad (2)$$

где  $h(x,z)$  – функция зазора между вращающимся ротором и неподвижным уплотнением.

Граничные условия для функции давления определяются на торцах как давление подачи и слива:

$$P(x,y,0) = P_1, \quad P(x,y,L) = P_0 \quad (3)$$

В связи с тем, что расчетная область замкнута для неизвестных функций действует условие периодичности:

$$F(0,y,z) = F(2\pi R(z),y,z), \quad \frac{\partial F}{\partial x}(0,y,z) = \frac{\partial F}{\partial x}(2\pi R(z),y,z) \quad (4)$$

Выполнив безразмеривание системы уравнений (1), и учитывая, что при малой конусности величина зазора между ротором и уплотнением на три порядка меньше остальных геометрических размеров, эти уравнения преобразуются к виду:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial \mathcal{E}} = \mathcal{P} \frac{\partial^2 \mathcal{P}}{\partial \mathcal{E}^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial \mathcal{E}} + \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial \mathcal{E}} + \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial \mathcal{E}} = 0, \quad (6)$$

где  $\mathcal{P}$  – безразмерная функция давления;

<sup>1</sup> В работе используется правило А. Эйнштейна суммирования по повторяющимся индексам и исключение из него А.И. Лурье

$$\xi = \frac{x}{D_2}, \quad \eta = \frac{y}{h_{02}}, \quad \zeta = \frac{z}{L} \text{ – безразмерные координаты;}$$

$$\mu = \frac{\mu}{\mu_0} \text{ – безразмерная динамическая вязкость;}$$

$$\vec{V} = [[\xi_x \quad \xi_y \quad \xi_z]] \text{ – безразмерный вектор скорости.}$$

Функция зазора в безразмерном виде, изображенная на рисунке 2, с учетом малости конусности и зазора будет иметь вид:

$$h(\xi, \eta) = \beta \frac{L}{h_{02}} \xi + \frac{h_{01}}{h_{02}} - \xi \sin \alpha - \eta \cos \alpha, \quad (7)$$

где  $\beta = \frac{\Delta R}{L}$  – параметр конусности уплотнения.

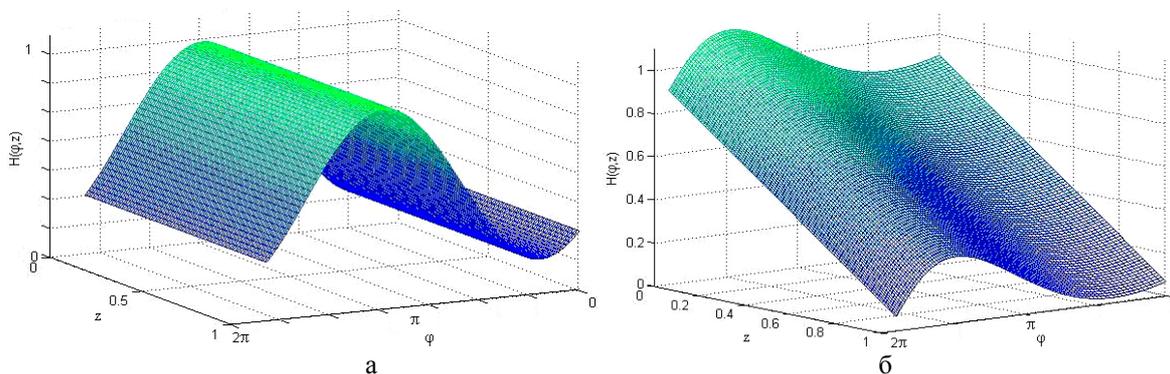


Рисунок 2 – Функция зазора  
а – отсутствие конусности; б – наличие конусности

Выражения для компонент скорости через частные производные функции давления получены интегрированием уравнений (5) по толщине смазочного слоя с учетом граничных условий (2). Полученные компоненты подставлены в уравнение (6), таким образом, было получено дифференциальное уравнение второго порядка, известное как уравнение Рейнольдса:

$$\frac{\partial^2 \mathcal{P}}{\partial \xi^2} + A \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial \xi} + B \frac{\partial^2 \mathcal{P}}{\partial \eta^2} + C \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial \eta} = F, \quad (8)$$

где  $A = \frac{3}{\mathcal{K}} \frac{\partial h(\xi, \eta)}{\partial \xi}$ ,  $B = \frac{D_2^2}{L^2}$ ,  $C = \frac{3}{\mathcal{K} h(\xi, \eta)}$ ,  $F = \frac{12\mu_0 U_0}{P_1 h_{02} \psi} \frac{1}{\mathcal{K}^3(\xi, \eta)} \frac{\partial h(\xi, \eta)}{\partial \xi}$  – безразмерные коэффициенты;

$\mathcal{K} = h(\xi, \eta)$  – безразмерная функция зазора;

$\mathcal{U} = \frac{U}{U_0}$  – безразмерная скорость на поверхности ротора;

$U_0 = \frac{h_{02}}{t_0}$  – обезразмеривающая скорость;

$t_0 = \frac{2\pi}{\omega}$  – время одного оборота;

$\psi = \frac{h_{02}}{R_2}$  – относительный зазор.

Граничные условия в безразмерном виде:

$$\mathcal{P}(\xi, 0) = 1, \quad \mathcal{P}(\xi, 1) = \frac{P_0}{P_1}, \quad \mathcal{P}(0, \xi) = \mathcal{P}(2\pi, \xi) \quad (9)$$

Таким образом, (8)-(9) – математическая модель исследуемого процесса в безразмерном виде.

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

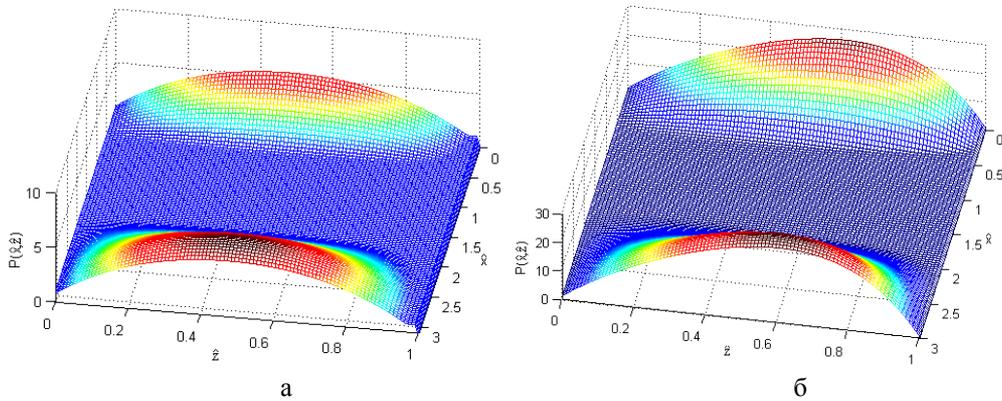
Математическая модель реализована методом конечных разностей. Двумерная расчетная область была разбита на сетку с постоянным шагом  $\Delta \xi = \frac{\pi R(\xi)}{m}$  и  $\Delta \xi = \frac{1}{n}$  по окружной и осевой координатам соответственно. Аппроксимируя частные производные в уравнении (8) конечными разностями, дискретный аналог математической модели (8) - (9) был получен в виде:

$$\alpha_i \bar{P}_{i,j+1} + \beta_i \bar{P}_{i,j} + \gamma_i \bar{P}_{i,j-1} = f_{i,j}, \quad i = \overline{0, m-1} \quad j = \overline{1, n-1} \quad (10)$$

$$\bar{P}_{i,0} = 1, \quad \bar{P}_{i,n} = \frac{P_0}{P_1}, \quad \bar{P}_{0,j} = \bar{P}_{m,j}. \quad (11)$$

Система алгебраических линейных уравнений (10)-(11) с трехдиагональной матрицей решалась методом прогонки.

В результате были получены безразмерные поля давлений при различных значениях конусности. Поля давлений при  $\beta=0,0$  и  $\beta=3,16e-4$  представлены на рисунке 3 а, б. соответственно.



**Рисунок 3 – Зависимость поля давлений от конусности**  
 а – при конусности  $\beta=0,0$ ; б – при конусности  $\beta=3,16e-4$

Безразмерный расход жидкости был получен путем интегрирования осевой компоненты скорости по радиальному сечению:

$$\bar{Q} = \int_0^1 \int_0^{\pi} v_z(\xi, 1) d\xi d\phi \quad (12)$$

где осевая компонента скорости получена путем интегрирования уравнения (5) по толщине смазочного слоя и имеет вид:

$$v_z(\xi, \xi) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \xi} (\xi - \bar{h}(\xi, \xi)) \quad (13)$$

Тогда безразмерный расход жидкости будет вычислен по следующей формуле:

$$\bar{Q} = \sum_{i=0}^{m-1} -\frac{\bar{h}_{i,n}^3}{12\mu} \frac{\bar{P}_{i,n} - \bar{P}_{i,n-1}}{\Delta \xi} \Delta \xi_i \quad (14)$$

Для расчета расхода жидкости в качестве варьируемых факторов были выбраны давление подачи и зазор при малом радиусе конуса, остальные факторы являлись фиксированными.

При варьировании давления подачи переменным является перепад давления, при варьировании значения зазора при малом радиусе конуса переменным является параметр конусности. Размерные значения расхода жидкости при различных значениях конусности и перепада давления изображены на рисунке 4.

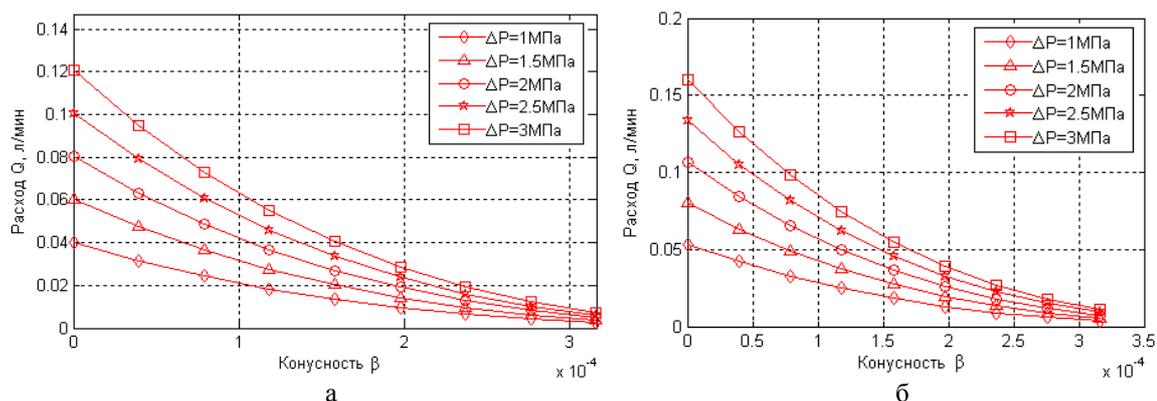


Рисунок 4 – Зависимость расхода от конусности и давления подачи  
а – масло МК-22; б – масло МС-20

Проверка адекватности полученных результатов проводилась на асимптотической модели для случая соосного цилиндрического уплотнения с напорным течением (течение Пуазейля). Расход жидкости в таком случае имеет вид [2]:

$$Q = \frac{\pi \Delta P}{8 \mu L} \left( R^4 - r^4 - \frac{(R^2 - r^2)^2}{\ln \frac{R}{r}} \right) \quad (15)$$

В таблице 1 приведены результаты для расхода, полученные аналитически по ф. (15) и численно при нулевом эксцентриситете, нулевой конусности и перепаде давления 3МПа. Погрешность между численными и аналитическими решениями расхода составляет менее 1%.

Таблица 1 – Сравнение численного и аналитического решения

Q <sub>аналитическое</sub> , л/мин	0,0385	0,0578	0,0771	0,0963	0,1156
Q <sub>численное</sub> , л/мин	0,0386	0,0579	0,0772	0,0964	0,1157
ε, %	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Также полученные результаты согласуются с экспериментальными данными работы [3], в которой показано, что увеличение конусности в 2 раза, ведет к уменьшению расхода примерно в 1,3 раза.

Таким образом, для параметра конусности в диапазоне  $\beta \in [0.0; 3.16 \cdot 10^{-4}]$  и перепада давления  $\Delta P \in [1.0; 3.0]$  МПа получен расход жидкости через коническое уплотнение, было установлено:

- при увеличении конусности (за счет уменьшения зазора при меньшем радиусе конуса) расход смазки уменьшается;
- при увеличении осевого перепада давления и конусности расход увеличивается незначительно, в отличие от случая соосного уплотнения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марцинковский, В.А. Вибрации роторов центробежных машин. Гидродинамика дросселирующих каналов / В.А. Марцинковский. – Суми: СумДУ, 2002. – 337с.
2. Слезкин, Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н.А. Слезкин. – М.: Государственное издательство технико-технической литературы, 1955. – 142 с.
3. W.Todd Lindsey, D. W. Childs. The effects of converging and diverging axial taper on the rotordynamic coefficients of liquid annular pressure seals. Journal of vibration and acoustics. p.126-131.

#### Корнаева Елена Петровна

Старооскольский технологический институт (филиал) НИТУ МИСиС, г. Старый Оскол  
Аспирант кафедры «Технологии и оборудования в металлургии и машиностроении»  
Тел. (4725) 32-98-41, 8-903-886-83-56  
E-mail: lenoks\_box@mail.ru

**Савин Леонид Алексеевич**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг»

Тел. (4862) 48-37-66

E-mail: savin@ostu.ru

---

E.P. KORNAEVA, L.A. SAVIN

## **FLUID FLOW MODELING IN SEAL SYSTEMS WITH SMALL CONICITY**

*Enforced and shear flow of viscosity incompressible Newtonian fluid within cylinder - cone rotor – seal system is investigated. Mathematical model is based on Reynolds equation and allowed for variable geometry of investigated object. Pressure field and leakage of fluid are presented as a result in various cases of deliver pressure and conicity.*

**Key words:** *enforced and shear flow, viscosity incompressible Newtonian fluid, seal, rotor, pressure field, leakage of fluid.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Marcinkovskij, V.A. Vibracii rotorov centrobezhnyh mashin. Gidrodinamika drosselirujuvih kanalov / V.A. Marcinkovskij. – Sumi: SumDU, 2002. – 337s.
2. Slezkin, N.A. Dinamika vjazkoj neszhimaemoj zhidkosti / N.A. Slezkin. – M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-tehnicheskoy literatury, 1955. – 142 s.
3. W.Todd Lindsey, D. W. Childs. The effects of converging and diverging axial taper on the rotordynamic coefficients of liquid annular pressure seals. Journal of vibration and acoustics. p.126-131.

**Kornaeva Elena Petrovna**

Starooskol technological institute (branch) NITU MISiS, Stary Oskol

Post-graduate student of department “Technologies and equipment in metallurgy and mechanical engineering”

Tel.: 4725-32-98-41, 8-903-886-83-56

E-mail: lenoks\_box@mail.ru

**Savin Leonid Alekseevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Doctor of technical science, professor, head of department “Mechatronics and international engineering”

Tel.: 4862-48-37-66

E-mail: savin@ostu.ru

УДК 620.179.11.

Г.В. ЛАЗУТКИН, В.А. АНТИПОВ, М.А. ПЕТУХОВА,  
М.И. БОРЗЕНКОВ, Г.В. ИЗРАНОВА

## НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ КОЛЕБАНИЯ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ С КОНСТРУКЦИОННЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ

*В работе рассмотрены вопросы, касающиеся поведения виброзащитной системы с конструкционным демпфированием при воздействии ударных импульсов длительностью больше первого полупериода колебаний. При исследовании дифференциального уравнения движения виброзащитной системы использовано кусочно-непрерывное решение. При решении задачи реакция виброизолятора представлена полиномиальной математической моделью деформирования. Исследована возможность появления остановок ВС вызванная скачкообразным изменением реакции виброизолятора при смене знака скорости. Полученные результаты позволяют построить удароизолирующие характеристики виброизоляторов для заданных форм ударного импульса, а также определить время затухания колебаний.*

**Ключевые слова:** виброзащитная система, ударный импульс, уравнение движения, кусочно-непрерывное решение, остановки, смена знака скорости, удароизолирующие характеристики.

В практике эксплуатации агрегатов и систем железнодорожного транспорта характерны ударные нагрузки в виде одиночных импульсов. Кроме того, воздействие периодических нагрузок на начальных этапах движения виброзащитных систем (ВС) сопровождается переходными процессами. Возникающие при этом колебания носят неустановившийся характер и быстро затухают. По характеру воздействия на ВС ударные импульсы разделяются на короткие и длительные. Удар считается коротким, если его длительность меньше первого полупериода колебаний ВС, в остальных случаях имеет место длительный удар. При воздействии короткого удара с длительностью значительно меньшей полупериода колебаний ВС поведение системы определяется, в основном, энергоемкостью удара и практически не зависит от его формы. Если же длительность удара соизмерима с периодом свободных колебаний ВС, то форма ударного импульса оказывает существенное влияние.

Получить непрерывное аналитическое решение задачи, описывающее весь процесс неустановившихся колебаний ВС с конструкционным демпфированием от их возникновения до затухания, весьма затруднительно даже для линейных систем. В связи с этим удобней рассматривать кусочно-непрерывное решение. Выбор таких кусочных решений должен позволять прогнозировать хотя бы одну-две гармонические составляющие, имеющие основной вес в законе колебаний ВС. Указанное обстоятельство позволит использовать для определения удароизолирующих характеристик виброизоляторов аналитические приближенные методы с вариационными принципами решения задач.

Дифференциальное уравнение движения ВС массой  $M$  (весом  $G$ ) при ударном нагружении импульсом  $Q(t)$  с длительностью  $\tau_y$  можно представить в обобщенном виде [1]

$$\ddot{\xi} + \eta(\xi, \text{sign}\dot{\xi}, \xi_{m,0} \dots \xi_{m,j} \dots \xi_{m,n}) = \sigma(\theta - \theta_y)F(\theta), \quad (1)$$

где  $\theta_y = \omega_\delta \tau_y$  – соответственно безразмерная длительность удара;

$$t - \text{время}; \quad \omega_\delta = \sqrt{\frac{T_n}{a_n M}};$$

$$\sigma(\theta - \theta_y) = \begin{cases} 1 & \forall \theta \in [0, \theta_y] \\ 0 & \forall \theta \in (\theta_y, \theta_n] \end{cases}$$

где  $F(\theta) = \frac{Q(t)}{T_n}$  – безразмерный ударный импульс;

$\xi$  – безразмерное перемещение КС относительно центра статического равновесия, определяемого постоянно действующей нагрузкой  $\bar{G} = \frac{G}{T_n}$ ;

$\xi_{m,j}$  – экстремальное значение безразмерной деформации, соответствующее условию  $\dot{\xi}_j = 0$ .

Решение уравнения (1) должно быть по крайней мере кусочно-непрерывным, так как реакция виброизоляторов из материала МР является функцией, зависящей от последовательности значений  $\xi_{m,j} \forall j \in [0, n]$ . Такое решение состоит из  $n$  подэтапов, причем для каждого  $j$ -го подэтапа его границы  $\xi_{m,j-1}$  и  $\xi_{m,j}$ ,  $\theta_{j-1}$  и  $\theta_j$ , на которых осуществляется сшивка решения, определяются парами условий

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(\theta_{j-1}) = 0 \quad \text{и} \quad \xi(\theta_{j-1}) = \xi_{m,j-1}; \\ \dot{\xi}(\theta_j) = 0 \quad \text{и} \quad \xi(\theta_j) = \xi_{m,j}. \end{aligned}$$

На  $j$ -м подэтапе движения ВС реакция виброизолятора может быть представлена полиномиальной математической моделью деформирования

$$\eta_j = \sum_{\lambda=0}^m P_{\lambda,j}^* \bar{\xi}_j^\lambda, \quad (2)$$

где  $\bar{\xi}_j = \xi - \xi_{m,j-1}$ .

Тогда дифференциальное уравнение движения (1) на любом  $j$ -ом подэтапе может быть представлено в форме

$$\ddot{\xi} + \sum_{\lambda=0}^m P_{\lambda,j}^* \bar{\xi}_j^\lambda = \sigma(\theta - \theta_y) F(\theta). \quad (3)$$

Одной из существующих особенностей решения (3) является возможность появления остановок ВС, возникающих при условии  $\ddot{\xi}_j(\theta) = 0 \quad \forall \theta < \theta_y$ .

Пусть на  $(j-1)$ -м подэтапе в момент времени  $\theta_{j-1}^*$  выполняется условие  $\dot{\xi}_j(\theta_{j-1}^*) = 0$ . Если остановка ВС не реализуется, то время  $\theta_{j-1}^*$  является временем  $\theta_{j-1}$  начала движения на  $j$ -м подэтапе; при остановке КС время начала движения  $\theta_{j-1}$  будет отличаться на величину длительности остановки  $\Delta\theta_{j-1} = \theta_{j-1} - \theta_{j-1}^*$ .

Появление остановок ВС может быть вызвано скачкообразным изменением реакции виброизолятора при смене знака скорости. Действительно, если  $\dot{\xi}_j(\theta_{j-1}^*) = 0$  и  $\ddot{\xi}_j(\theta_{j-1}^*) \neq 0$ , то, предполагая изменение знака скорости, получим скачкообразное изменение функции (2) на величину

$$\Delta\eta_{m,j} = \eta_{m,j-1} - P_{0,j}, \quad (4)$$

где  $\eta_{m,j-1} = \sum_{\lambda=0}^m P_{\lambda,j}^* \bar{\xi}_{m,j-1}^\lambda$  – постоянный член в  $j$ -м разложении (2).

Остановки ВС реализуются в случае

$$\text{sign} \ddot{\xi}_{j-1}(\theta_{j-1}^*) \neq \text{sign} \ddot{\xi}_j(\theta_{j-1}^*), \quad (5)$$

когда силы инерции совместно с силовым воздействием ударного импульса не могут преодолеть скачкообразного изменения реакции виброизолятора. Движение ВС может возобновиться в момент времени  $\theta_{j-1} \in [\theta_{j-1}^*, \theta_y]$ , когда выполнится одно из условий

$$\eta_{m,j-1} - F(\theta_{j-1}) = 0; \quad (6)$$

$$P_{0,j} - F(\theta_{j-1}) = 0. \quad (7)$$

В первом случае  $j$ -й подэтап сохраняет знак скорости предыдущего, во втором - изменяет знак на противоположный.

Учитывая указанные обстоятельства, рассмотрим общие вопросы построения приближенного решения дифференциального уравнения (3) для случая ударного нагружения ВС. При этом с целью упрощения дальнейшего аналитического исследования получаемых решений будем рассматривать два этапа движения ВС:

1 этап - вынужденные неустановившиеся колебания

$$(\forall \theta \in [\theta_0, \theta_g]; \theta_g \geq \theta_y);$$

2 этап - свободные колебания  $(\forall \theta \in (\theta_g, \theta_n^*])$ .

Здесь  $\theta_0$  - время начала движения ВС;  $\theta_g$  - момент времени, когда первый раз после окончания действия ударной нагрузки выполнится условие  $\dot{\xi}_j(\theta_g) = 0$ ;  $\theta_n^*$  - время окончательной остановки ВС, определяемое с помощью неравенства (5). Аналитически разделение движения ВС на два этапа осуществляется с помощью ступенчатой функции

$$\sigma(\theta - \theta_g) = \begin{cases} 1 & \forall \theta \in [\theta_0, \theta_g]; \\ 0 & \forall \theta \in (\theta_g, \theta_n^*]. \end{cases} \quad (8)$$

Не нарушая общности дальнейших рассуждений, можно описывать  $j$ -е колебания ВС разложениями Фурье только в классе четных функций с периодом  $2(\theta_j^* - \theta_{j-1}) = \frac{2\pi}{\gamma}$ ;

$$\bar{\xi}_j(\theta) = \xi_{q,j} + \sum_{i=1}^{\infty} \xi_{A_j}^{(i)} \cos i\gamma_i(\theta - \theta_{j-1}), \quad (9)$$

где  $\xi_{q,j}$  – постоянная составляющая;

$\xi_{A_j}^{(i)}$  – амплитуда  $i$ -й гармоники колебаний ВС;

$\gamma_i$  – частота основного тона.

Ограничимся двумя первыми членами разложения и запишем их в виде

$$\bar{\xi}_{0,j}(\theta) = \xi_{A,j} [1 - \cos \gamma_{0,j}(\theta - \theta_{j-1})], \quad (10)$$

где  $\xi_{A,j}$  –  $j$ -тая амплитуда первой гармоники;

$\gamma_{0,j}$  – приближенное значение частоты основного тона.

Приведенная форма решения предполагает выполнение, по крайней мере, начальных и конечных условий движения ВС на любом  $j$ -м подэтапе.

Для нахождения квазипериодического решения уравнения (3) по методу Бубнова-Галеркина необходимо записать вариационное уравнение в виде

$$\int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j^*} \left[ \ddot{\xi}_{0,j} + \sum_{\lambda=0}^m P_{\lambda,j} \bar{\xi}_{0,j}^\lambda - \sigma(\theta - \theta_y) F(\theta) \right] \delta \xi_{0,j} d\theta = 0.$$

Здесь  $\delta \xi_{0,j} = \delta \xi_{q,j} - \delta \xi_{A,j} \cos \gamma_{0,j} (\theta - \theta_{j-1})$  – вариация  $\xi_{0,j}$ , а вынуждающая сила  $\sigma(\theta - \theta_y) F(\theta)$  представляется разложением Фурье с тем же периодом, что и колебания ВС. Следовательно, можно записать:

$$\int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j^*} \left[ \ddot{\xi}_{0,j} + \sum_{\lambda=0}^m P_{\lambda,j} \bar{\xi}_{0,j}^\lambda - \sigma(\theta - \theta_y) F(\theta) \right] d\theta = 0;$$

$$\int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j^*} \left[ \ddot{\xi}_{0,j} + \sum_{\lambda=0}^m P_{\lambda,j} \bar{\xi}_{0,j}^\lambda - \sigma(\theta - \theta_y) F(\theta) \right] \cos \gamma_{0,j} (\theta - \theta_{j-1}) d\theta = 0.$$

Интегрируя эти выражения с учетом (10), получим:

$$2P_{0,j} + \sum_{\lambda=0}^m 2^{\lambda+1} b_\lambda P_{\lambda,j} \xi_{A,j}^\lambda - \beta_{0,j} = 0; \tag{11}$$

$$\gamma_{0,j}^2 \xi_{A,j} + \sum_{\lambda=0}^m 2^{\lambda+1} b_\lambda P_{\lambda,j} \xi_{A,j}^\lambda \left( 1 - \frac{2\lambda+1}{\lambda+1} \right) - \beta_{1,j} = 0 \tag{12}$$

где  $\beta_{0,j}$  и  $\beta_{1,j}$  коэффициенты разложения Фурье функции  $\sigma(\theta - \theta_y) F(\theta)$ .

С учетом разделения движения на два этапа их можно записать с помощью функции  $\sigma(\theta - \theta_y)$  (8) в виде

$$\beta_{i,j} = \sigma(\theta - \theta_y) \frac{2\gamma_{0,j}}{\pi} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_j^*} \sigma(\theta - \theta_y) F(\theta) \cos i\gamma_{0,j} (\theta - \theta_{j-1}) d\theta. \tag{13}$$

Значения коэффициентов  $b_\lambda$  для заданного  $\lambda \in [1..m]$  вычисляются с помощью зависимости

$$b_\lambda = \frac{2\lambda-1}{2\lambda} \cdot \frac{2\lambda-3}{2\lambda-2} \cdot \frac{2\lambda-5}{2\lambda-4} \dots \frac{1}{2}. \tag{14}$$

Время  $\theta_{j-1}$  в приближенном решении (10) находится из анализа условия на остановку (5) с учетом одного из двух соотношений (6) или (7). Очевидно, систему уравнений (11) и (12) можно разрешить относительно неизвестных величин  $\xi_{A,j}$  и  $\gamma_{0,j}^2$ , что позволяет определить максимальную величину деформации на каждом  $j$ -м подэтапе из выражения  $\bar{\xi}_{m,j} = 2\xi_{A,j}$  и вычислить соответствующую ей реакцию  $\eta_{m,j}$  по (4).

Для нахождения коэффициента передачи удара  $\mu_y$  необходимо из всех значений  $\bar{\xi}_{m,j}$  выбрать такое  $\bar{\xi}_m$ , которому соответствует наибольшая реакция виброизолятора  $\eta_m$  а затем взять отношение

$$\mu_y = \frac{\eta_m}{F},$$

где  $F_m$  – пиковое значение функции  $F(\theta)$ .

В дальнейшем, варьируя значениями  $F_m$  и  $\theta_y$ , можно построить обобщенные удароизолирующие характеристики виброизоляторов для заданных форм ударного импульса в виде  $\mu_y = \varphi(F_m, \theta_y)$ . Следует отметить, что при необходимости можно определить и время затухания колебаний КС

$$\theta_n^* = \sum_{j=1}^n (\theta_{j-1} - \theta_j).$$

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лазуткин, Г.В. Виброизоляторы на основе материала МР (тип ДКУ) / Г.В. Лазуткин. – Куйбышев: Куйбышевский авиационный ин-т, 1985. – 150 с. – Деп. в ВИНТИ 16.08.85, № 6112-85.

**Лазуткин Геннадий Васильевич**

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара  
Кандидат технических наук, докторант кафедры «Инженерная графика»  
Тел. 89276960040  
E-mail: om46@mail.ru

**Антипов Владимир Александрович**

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная графика»  
Тел. 89276960040  
E-mail: om46@mail.ru

**Петухова Мария Александровна**

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара  
Программист  
Тел. 89276960040  
E-mail: om46@mail.ru

**Борзенков Михаил Иванович**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе. 29  
8 (4862) 43-48-90  
E-mail: bim@ostu.ru

**Изранова Галина Владимировна**

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара  
Старший преподаватель кафедры «Инженерная графика»  
Тел. 89276960040  
E-mail: om46@mail.ru

---

G.V. LAZUTKIN, V.A. ANTIPOV, M.A. PETUKHOVA,  
M.I. BORZENKOV, G.V. IZRANOVA

### **UNSTEADY OSCILLATIONS OF VIBROPROTECTIVE SYSTEMS WITH STRUCTURAL DAMPING**

*In the paper the matters concerning behavior of a vibroprotective system with structural damping during the influence of shock pulses having duration higher than the first half-period of vibrations are considered. At the investigation of the differential equation of a vibroprotective system motion there was used a piecewise-continuous solution. During a problem solution a bumper response is represented through a polynomial simulator of deformation. A possibility for vibroprotective system*

*breaks caused by changes in a bumper response at velocity sign changes is investigated. The results obtained allow forming impact insulating properties of bumpers for the forms given of a shock pulse and also defining the time of decay of vibrations.*

**Key words:** *vibroprotective system, shock impulse, equation of motion, piecewise-continuous solution, breaks, velocity sign change, impact insulating properties.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Lazutkin, G.V. Vibroizoljatory na osnove materiala MR (tip DKU) / G.V. Lazutkin. – Kujbyshev: Kujbyshevskij aviacionnyj in-t, 1985. – 150 s. – Dep. v VINITI 16.08.85, № 6112-85.

### **Lasutkin Gennady Vasilyevich**

Samara state university of communication lines, Samara

Candidate of technical science, associate professor of department “Engineering graphics”

Tel. 8-846-995-83-33

E-mail: om46@mail.ru

### **Antipov Vladimir Aleksandrovich**

Samara state university of communication lines, Samara

Doctor of technical science, professor of department “Engineering graphics”

Tel.: 89276960040

E-mail: om46@mail.ru

### **Petuhova Mariya Aleksandrovna**

Samara state university of communication lines, Samara

Programmer

Tel.: 89276960040

E-mail: om46@mail.ru

### **Borzenkov Mihail Ivanovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Automation processes and machines of chipless process materials”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel.: 4862-43-48-90

E-mail: bim@ostu.ru

### **Izranova Galina Vladimirovna**

Samara state university of communication lines, Samara

Senior teacher of department “Engineering graphics”

Tel.: 89276960040

E-mail: om46@mail.ru

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.91.002

В.В. ИСТОЦКИЙ, В.Б. ПРОТАСЬЕВ

## МЕТОДЫ СОВРЕМЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРУППОВЫХ ЗУБЬЕВ БОРФРЕЗ

*В статье рассматриваются особенности и методы управления взаимным расположением групповых зубьев в полюсной зоне борфрез, связанные с недостатком места для их размещения.*

*Ключевые слова:* групповые зубья, борфрезы.

Проектирование групповых зубьев борфрез является очень сложной конструкторско-технологической задачей. Затруднения вызваны следующими причинами:

- существуют технологические сложности размещения в полюсной зоне шлифовальных кругов для формирования стружечных канавок, имеющих больший по сравнению с изготавливаемым инструментом размер;
- необходимо обеспечить в полюсной зоне достаточную скорость резания (на оси инструмента она вообще отсутствует);
- схождение большого числа зубьев (у борфрез число зубьев обычно находится в пределах от 16 до 30 на диаметре 10 мм) на оси приводит к уменьшению глубины стружечных канавок;
- при малой глубине стружечных канавок затруднительно обеспечивать рациональные значения передних и задних углов, поскольку на дне впадины всегда имеется радиус округления, зависящий от остроты вершины шлифовального круга, используемого для формирования зубьев и параметров его установки относительно обрабатываемой заготовки.

В работе [1] при разработке теории профилирования режущих инструментов с групповыми зубьями, режущие кромки которых являются винтовыми линиями аксиально-радиального переменного шага, в первом приближении предлагалось для определения величин радиусов точек встречи впадины длинного зуба с короткими (рис. 1) воспользоваться следующей зависимостью

$$r_{sp} = r_c \cdot \left( \frac{k \cdot r_c}{r_c} \right)^{\frac{N}{N+m}} ; \quad (1)$$

где  $r_c$  – максимальный радиус сферической части борфрезы;

$N$  – число групп борфрезы;

$k$  – поправочный коэффициент;

$m$  – компенсирующее слагаемое.

Первая версия программно-методического комплекса (ПМК) для подготовки управляющей информации для станков с ЧПУ применяемых при производстве борфрез с групповыми зубьями [2] опиралась именно на эту зависимость. В процессе промышленной эксплуатации ПМК определилась существенная сложность: для оптимального расположения коротких зубьев в пределах группы необходимо было изменять составляющие формулы (1)  $k$  и  $m$  для различных форм производящих поверхностей борфрез и чисел их зубьев. Значение этих составляющих приходилось определять экспериментально, а с учетом, изменяющегося вследствие износа диаметра шлифовальных кругов, зачастую возникали подрезы (недорезы) режущих кромок соседних зубьев.

Для устранения этой сложности во второй версии ПМК для производства борфрез появился алгоритм для отображения схемы расположения зубьев (рис. 2). Изменяя в диалоговом окне значения вышеуказанных коэффициентов и задавая число секторов и зубьев в секторе можно до начала производства оценить состоятельность группового расположения зубьев борфрез.

В дополнение к плоскостным построениям схем расположения групповых зубьев, построению исходного сечения (в зависимости от параметров установки инструментов второго порядка) в новой версии ПМК можно, используя положения булевой алгебры [3], в условиях виртуального пространства построить 3D модель проектируемого инструмента (рис. 3).

На построенной модели можно четко оценить правильность конструкции проектируемой борфрезы – увидеть наличие (отсутствие) подрезов – недорезов (рис.3 а, б) при выбранных значениях коэффициентов  $m$  и  $k$ .

Также используя средства компьютерной графики можно построить необходимые сечения и провести измерения. На рисунке 3 в, г, д, е показаны сечения (на расстояниях 0.5мм, 1мм, 2мм, 5мм от торца соответственно) спроектированной сфероцилиндрической борфрезы  $\varnothing 10$  мм с 5 секторами и 4 зубьями в каждом секторе.

Описание сложных математических зависимостей и алгоритмов построения 3D моделей проектируемых режущих инструментов более подробно описаны в [4].

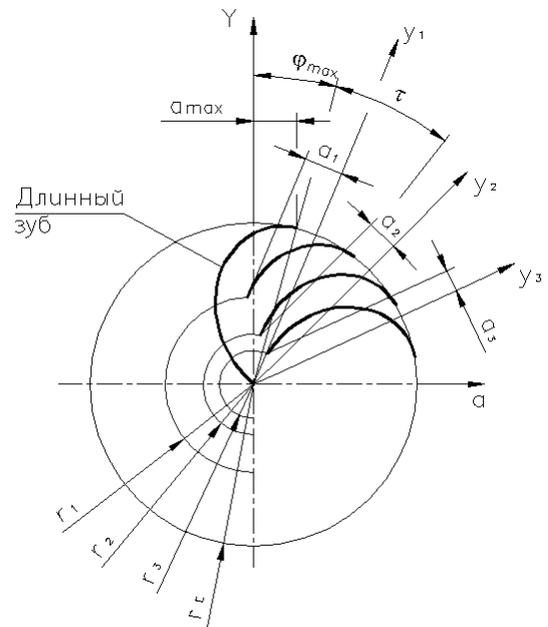


Рисунок 1 – Схема расположения групповых зубьев

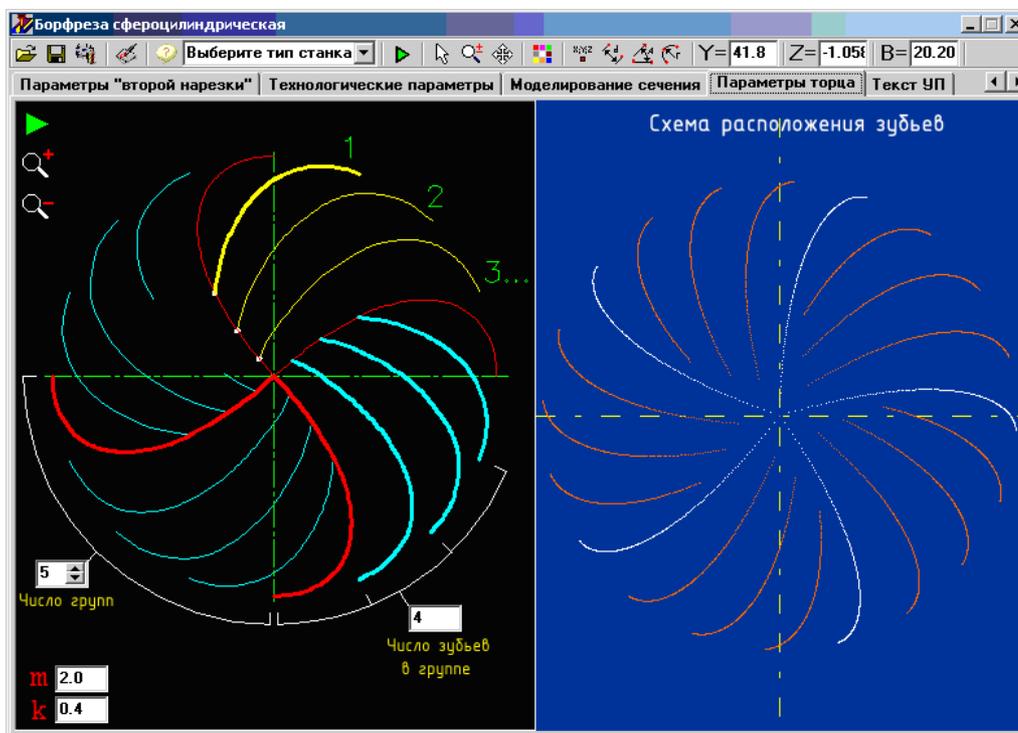


Рисунок 2 – Модуль ПМК для оценки состоятельности схемы группового расположения зубьев борфрез

Таким образом, дополнив созданную в [1] математическую модель борфрез с групповым расположением зубьев модулем визуализации схемы их расположения и алгоритмом построения 3D модели инструмента, полученной с применением виртуального аналога шлифовально-заточного станка, стало возможным на этапе проектирования устранить существующие пробелы на стыках разработки конструкции, подготовки производства и самого технологического процесса формирования режущей части борфрез.

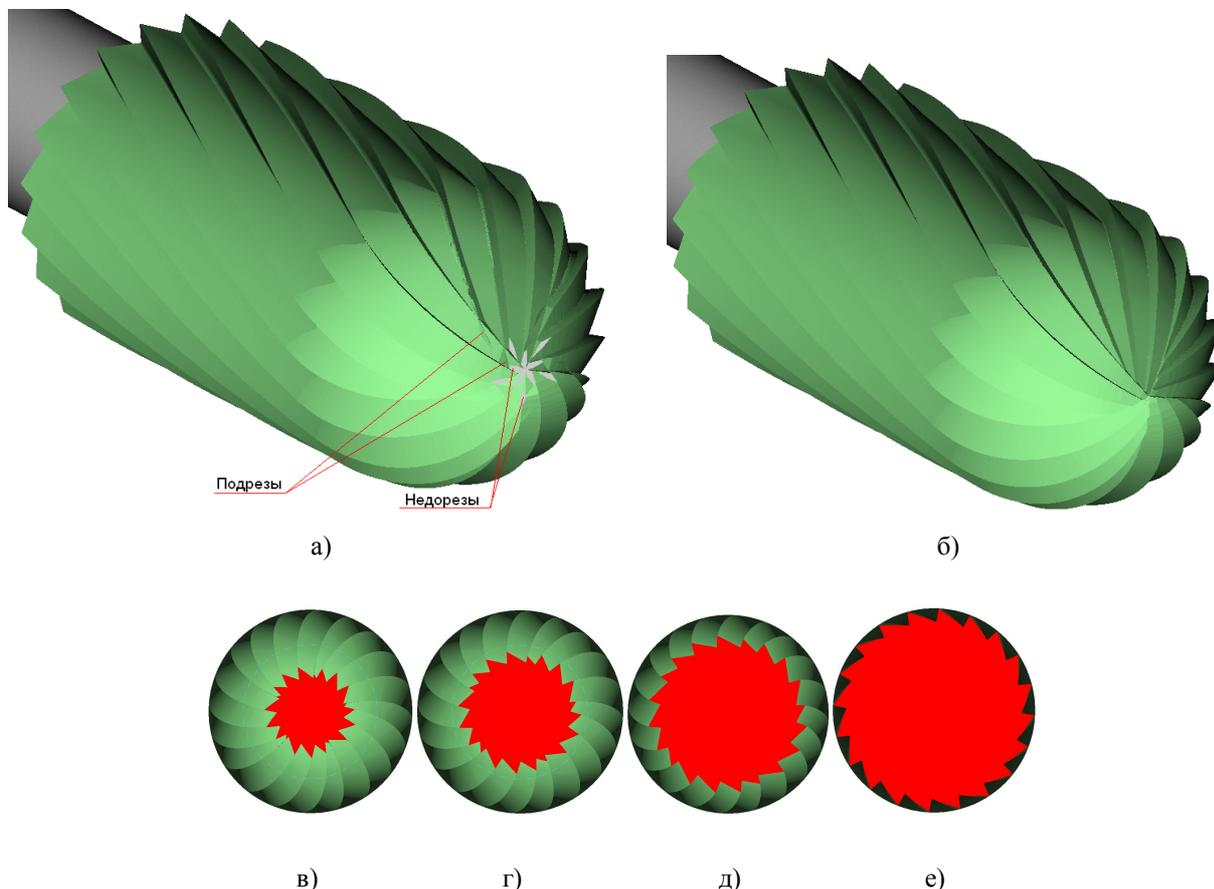


Рисунок 3 – Результат виртуального 3D профилирования борфрезы с групповыми зубьями

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Истоцкий, В.В. Формирование режущей части фасонных борфрез с применением шлифовально-заточных станков с ЧПУ: дис. ... канд. техн. наук. : 05.03.01 : В.В. Истоцкий. – Тула., 2005. – с. 124.
2. Истоцкий, В.В. Принципы современного проектирования режущей части фасонных инструментов с учетом особенностей их изготовления на заточных станках с ЧПУ / В.В. Истоцкий, В.Б. Протасьев // Известия ТулГУ. Сер. Технология машиностроения. – 2006.
3. Истоцкий, В.В. Проектирование режущей части фасонных инструментов с использованием виртуальных аналогов шлифовально-заточных станков с ЧПУ, основанных на положениях булевой алгебры / В.В. Истоцкий, В.Б. Протасьев // Известия ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. Вып. 2. Труды Международной юбилейной научно-технической конференции “Проблемы формообразования деталей при обработке резанием”, посвященной 90-летию со дня рождения С.И. Лашнева, 29-30 января 2007 г. Выпуск 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 170-174.
4. Протасьев, В.Б. Проектирование фасонных инструментов, изготавливаемых с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ / В.Б. Протасьев, В.В. Истоцкий. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 128 с.

**Истоцкий Владислав Владимирович**  
Серпуховского инструментального завода  
Кандидат технических наук, главный конструктор

**Протасьев Виктор Борисович**  
Тульский государственный университет  
Доктор технических наук, профессор

V.V. ISTOTSKY, V.B. PROTASYEV

## MODERN DESIGNING METHODS FOR GROUP TEETH OF DRILLING MILLS

*In the paper the peculiarities and control methods of the group teeth positional relationship in the pole area of drilling mills connected with the lack place for their location are considered.*

**Key words:** group teeth, positional relationship.

### BIBLIOGRAPHY

1. Istockij, V.V. Formirovanie rezhuwej chasti fasonnyh borfrez s primeneniem shlifoval'no-zatochnyh stankov s ChPU: dis. ... kand. tehn. nauk. : 05.03.01 : V.V. Istockij. – Tula., 2005. – s. 124.
2. Istockij, V.V. Principy sovremennogo proektirovanija rezhuwej chasti fasonnyh instrumentov s uchetom osobennostej ih izgotovlenija na zatochnyh stankah s ChPU / V.V. Istockij, V.B. Protas'ev // Izvestija TulGU. Ser. Tehnologija mashinostroenija. – 2006.
3. Istockij, V.V. Proektirovanie rezhuwej chasti fasonnyh instrumentov s ispol'zovaniem virtu-al'nyh analogov shlifoval'no-zatochnyh stankov s ChPU, osnovannyh na polozhenijah bulevoj algebry / V.V. Istockij, V.B. Protas'ev // Izvestija TulGU. Ser. Instrumental'nye i metrologicheskie sistemy. Vyp. 2. Trudy Mezhdunarodnoj jubilejnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii “Problemy formoobrazovanija detalej pri obrabotke rezaniem”, posvjawennoj 90-letiju so dnja rozhdenija S.I. Lashneva, 29-30 janvarja 2007 g. Vypusk 2. – Tula: Izd-vo TulGU, 2006. – S. 170-174.
4. Protas'ev, V.B. Proektirovanie fasonnyh instrumentov, izgotavlivaemyh s ispol'zovaniem shli-foval'no-zatochnyh stankov s ChPU / V.B. Protas'ev, V.V. Istockij. – M.: INFRA-M, 2011. – 128 s.

#### **Istozkiy Vladislav Vladimirovich**

Serpuhov toolmaking factory

Candidate of technical science, chief constructor

#### **Protasiev Viktor Borisovich**

Tula state university

Doctor of technical science, professor

А.Н. СТАРИКОВ

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА С РОЛИКОВИНТОВЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

*В работе представлен метод ведения испытаний электромеханического привода как комплексная процедура. Автоматизация и оптимизация процесса заключается в применении современных компьютерных технологий. Производится снятие информации при функционировании привода, аккумулирование ее в единую базу данных. Обработка информации, ее мониторинг и анализ возможны как в процессе испытаний, так и после. Данный подход универсален и может быть применён для различных технических систем и отдельных их элементов. Акцент делается на сложные наукоёмкие объекты.*

**Ключевые слова:** комплексные испытания, ролико-винтовой механизм, испытательный стенд, виртуальный прибор.

Разработка и создание сложной технической системы невозможно без процессов получения исходных данных для проектирования и последующего мониторинга функционирования системы. В процессе проектирования и свойства объекта, и свойства подсистем оцениваются с помощью различных параметров. Среди параметров выделяют показатели эффективности, являющиеся количественной оценкой соответствия проектируемого объекта или подсистемы ее целевому назначению.

Для различных приводных систем существует единый набор критериев, который служит оценкой совершенства и прогрессивности данного привода по сравнению с другими приводами, выполняющими аналогичные функции. Критерии позволяют количественно выразить, например, качество конструкции и могут служить основой для составления списка недостатков существующей конструкции или перечня требований к разработке нового привода.

Энергетические свойства системы в целом зависят от энергетической эффективности отдельных ее элементов. Проектирование систем приводов высокой энергетической эффективности требует поиска комплексного решения. В связи с этим для создания таких систем очевидна необходимость применения современной комплексной системы диагностики и контроля.

Применительно к проектированию и производству электромеханических приводов встает задача комплексного сочетания и взаимной увязки системы управления, силовой части (электрического двигателя) и исполнительской части (механизма). В связи с этим *подготовка информации для научнообоснованного принятия решения по применению систем приводов с различными характеристиками с учётом необходимости минимизации энергетических потерь* есть актуальная задача для проектирования энергоэффективных приводов.

Для достижения максимальной эффективности ведения стендовых испытаний требуется решения ряда задач:

- возможность задействования многопоточного способа сбора данных с датчиков разных типов;
- сбор и запись информации в режиме реального времени, синхронизация потоков данных;
- возможность введения программной обработки поступающих данных: математическую статистику, фильтрацию сигнала, корректировку входных параметров, и т.д.)
- наглядность и простота при получении, анализе и обработке информации. Удобство отладки управляющих программ.

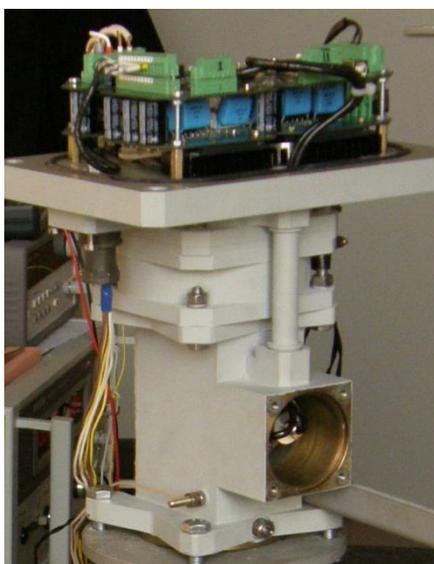
Применение в электромеханическом модуле двигателей серии *двигатель бесконтактный моментный* (ДБМ) с полым ротором и исполнительных *ролико-винтовых меха-*

низмов (РВМ) дает короткую кинематическую цепь. Такие устройства обладают малыми массой и габаритами, высокой редукцией, жесткостью, компактностью и т. д. Определение характеристик такого привода имеет специфику.

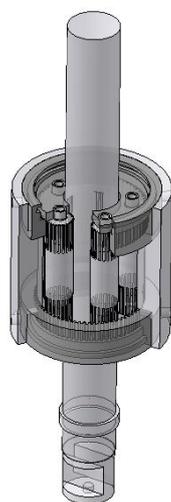
Стремление к минимизации приводов с одной стороны, и оптимизации их параметров с другой, поставило задачу создания эффективных методов диагностики и анализа электро-механических приводов на основе роliko-винтовых исполнительных механизмов. Одним из путей снижения этих затрат является создание эффективных и надежных способов диагностики, основанных на использовании наиболее совершенных методов испытаний и контроля.

На основе современного комплекса сбора и обработки данных фирмы NATIONAL INSTRUMENTS разработан метод по определению основных характеристик системы управления, двигателя, роliko-винтового механизма в составе электромеханического привода. Создан стенд, позволяющий проводить комплексные исследования привода. Разработаны и применены программы по сбору, анализу и обработке информации.

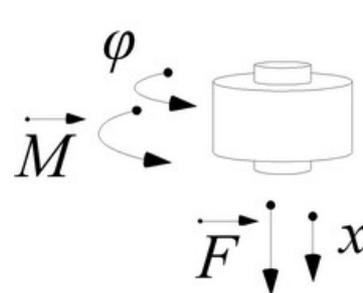
Объектом экспериментальных исследований является электромеханический привод (рис. 1) на базе двигателя ДБМ 120-1,6-0,5-3-Д25. В качестве механизма использовалась роliko-винтовая пара, рисунок 2. Принципиальная схема работы механизма представлена на рисунке 3.



*Рисунок 1 – Электромеханический привод*



*Рисунок 2 – Механизм*



*Рисунок 3 – Схема работы механизма*

Определение параметров проводилось на стенде, функциональная схема рисунок 4. Определялись параметры двух движений:

- вращательное:

$M$  – силовой параметр: момент, Н·м;

$\varphi$  – кинематический параметр: угловое перемещение, рад;

- поступательное:

$F$  – силовой параметр: сила, Н;

$x$  – кинематический параметр: линейное перемещение, м.

Особенностью являлось параллельное снятие параметров, - более 20, запись их в файл, аккумуляирование их в единую базу данных, с последующей обработкой. Результатом явилось целое поле параметров работы привода, варьируемое по критериям конструктивных особенностей, технологических, нагрузочных, скоростных, и др.

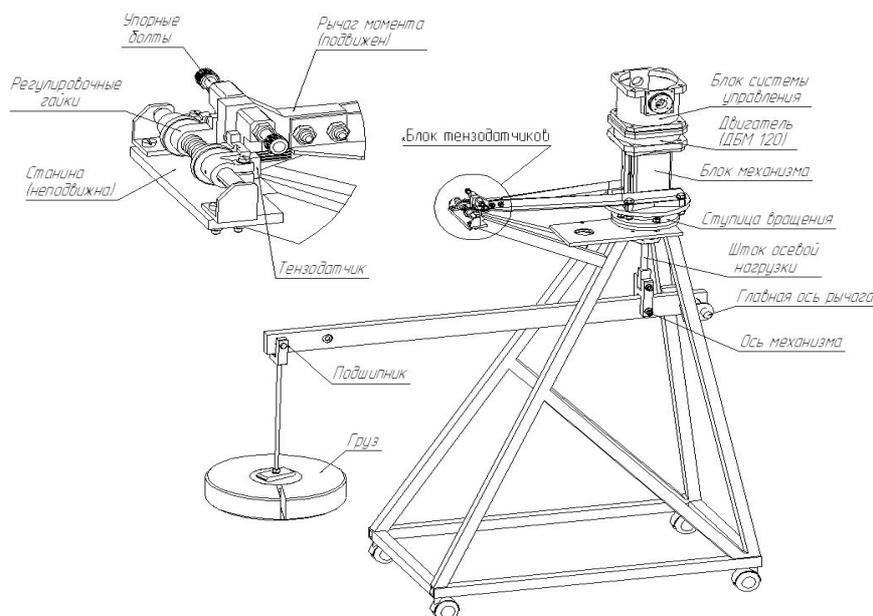


Рисунок 4 – Испытательный стенд

Так, для описания свойств исполнительного механизма, преобразующего параметры одного движения в другое, используются характеристики, в основе которых лежат результаты обработки исходных данных о двух движениях. Отношение скоростей – это КПФ в данном случае, отношения мощностей, получаемых известным способом - это КПД звена или механизма, и т.д.

Таблица 1 – Данные измерений

Данные измерений			
Вращение, град	Момент, Н/м	Линейное перем., мм	Сила, Н
0,000000	0,800100	0,000000	1,600200
0,017452	0,800300	0,008726	1,600600
0,034899	0,800500	0,017450	1,601000
0,052336	0,800800	0,026168	1,601600
0,069756	0,801200	0,034878	1,602400

Таким образом, минимальным набором, для получения исходных параметров привода служат данные таблицы 1.

Достоинством такого подхода является:

- универсальность и оперативность проведения экспериментов с большим количеством разных по своим свойствам приводов;
- ведение испытаний в автоматизированном режиме;
- удобство анализа общей картины полученных результатов.
- возможность использования записи данных и применение различных способов последующей обработки.

Для реализации разработки было использовано оборудование.

- Программа LabVIEW-2009 (National Instruments, США);
- Плата сбора данных USB-6251 (National Instruments, США);
- датчик углового положения лир-158А-2-Н-002500-05-пи-5 (Россия);
- датчик линейного положения лир-7-1-0120-02(0)-05-пи (Россия);
- датчик усилия, 15Н FSG15N1A (США);
- датчик усилия, 35000Н- RLS-3.5Т-С3/5, класс с3 (Северная Корея).

Для тарировки аналоговых датчиков создан виртуальный прибор, программно корректирующий нестабильность напряжения питания (1).

$$U_{датч.} = U_{датч.i} \times \left( 1 + \frac{U_{num.опорн} - U_{num.i}}{U_{num.i}} \right) \quad (1)$$

Для нахождения коэффициента корреляции использовался соответствующий виртуальный прибор, элемент блок-диаграммы представлен на рисунке 5.

$$r = \frac{\mu(U, F)}{\sigma(U)\sigma(F)}$$

$$\mu(U, F) = M\{[U - M(U)][F - M(F)]\}$$

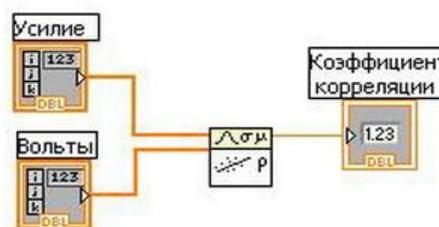


Рисунок 5 – Определение коэффициента корреляции

В качестве примера функционирования данной разработки показан виртуальный прибор, отображающий картину моментов при вращении механизма в прямом и обратном направлении. Блок-диаграмма и лицевая панель представлены на рисунке 6 и 7. Исходя из него, удобно и наглядно рассматривать процессы, происходящие в механизме. Видны момент инерции при переключении направления движений, плавность хода, величину момента сопротивления в обоих направлениях, пульсации момента вследствие работы фаз двигателя и многополюсности.

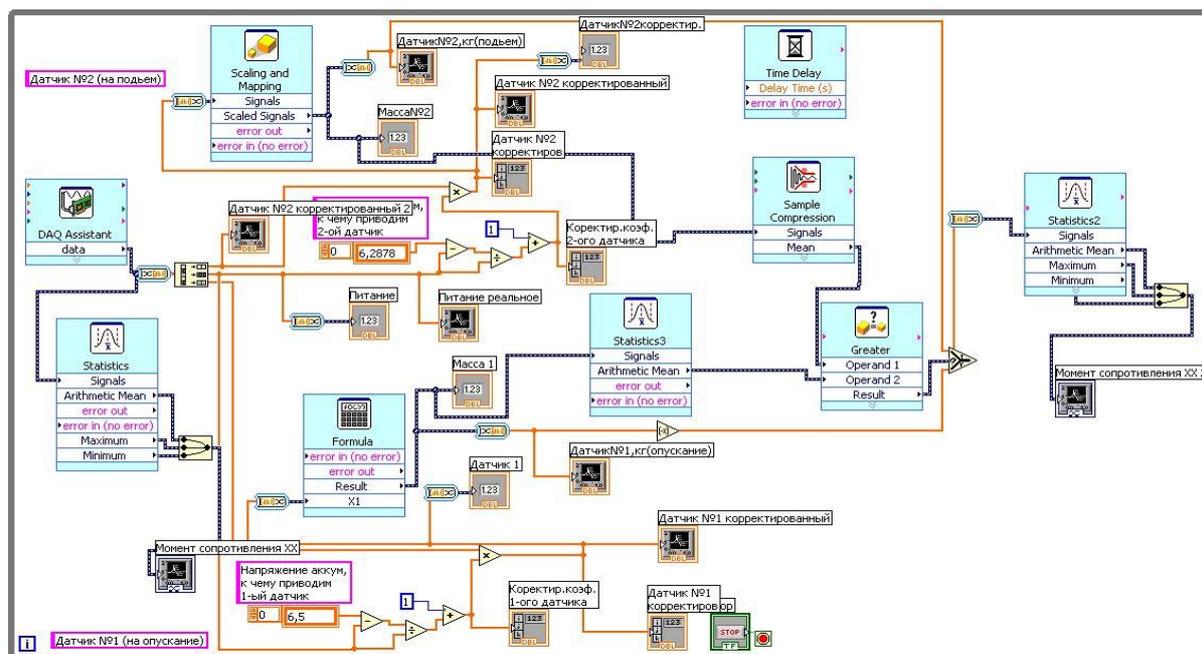


Рисунок 6 – Блок-диаграмма виртуального прибора по определению момента холостого хода механизма

Энергоэффективные системы следящих приводов управления объектами представляют собой сложные технические системы, так как процессы внутри системы имеют различную физическую природу, условия функционирования, характеризуются нестационарными параметрами взаимодействия между подсистемами, и носят нелинейный характер. Поэтому получение достоверной, комплексной и оперативной информации функционирования таких систем основано на использовании основных положений системотехники в сочетании с блочно-иерархическим подходом.



**Рисунок 7 – Лицевая панель прибора по определению момента холостого хода механизма**

К недостаткам блочно-иерархического подхода можно отнести то, что на каждом низшем уровне работа ведется с *недоопределенными* подсистемами, т.е. решения принимаются в обстановке неполной информации. Использование системного подхода позволяет устранить этот недостаток. Таким образом, применение системного подхода к проведению испытаний энергоэффективных электромеханических приводов с ролико-винтовыми механизмами позволяет в дальнейшем ставить и решать задачи разработки высокоэффективных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушенин, Д.В. Основы проектирования и расчёта несоосных винтовых механизмов / Д.В. Бушенин и др. – Владимирский гос. университет, 1998. – 116с.
2. Морозов, В.В. Зубчато-винтовые передачи для преобразования вращательного движения в поступательное / В.В. Морозов, В.И. Панюхин, В.В. Панюхин. – Владимирский гос. университет, 2000. – 160с.
3. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т.М. Корн. – Лань, 2003. – 832с.
4. Суранов, А.Я. LabVIEW 8: справочник по функциям / А.Я. Суранов. – Москва.: ДМК Пресс, 2005. – 512 с.
5. Загидуллин, Р.Ш. LabVIEW в исследованиях и разработках / Р.Ш. Загидуллин. – Москва.: Горячая Линия – Телеком, 2005. – 252 с.

### Стариков Альберт Николаевич

Владимирский государственный университет, г. Владимир  
 Старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция и гидравлика»  
 г. Владимир, ул. Горького, 87  
 Тел. 8-903-648-13-76  
 E-mail: albert@vlsu.ru

A.N. STARIKOV

## SYSTEM APPROACH TO CARRYING OUT TESTS OF ENERGY EFFICIENT INDEPENDENT ELECTROMECHANICAL DRIVE WITH ROLLER ACTUATOR

*In the paper the method of carrying out tests of an electromechanical drive as a complex procedure is shown. The automation and optimization of a process consist in the application of modern computer technologies. Data accessing is carried out at drive functioning and its accumulation to a single database. Information processing, its monitoring and analysis are probable both, during tests, and after them. The given approach is universal and can be applied to various technical systems and their separate elements. Complex science intensive objects are focused in this case.*

**Key words:** complex tests, roller screw mechanism, test bed, virtual device.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Bushenin, D.V. Osnovy proektirovanija i raschjota nesoosnyh vintovyh mehanizmov / D.V. Bushenin i dr. – Vladimirskij gos. universitet, 1998. – 116s.
2. Morozov, V.V. Zubchato-vintovye peredachi dlja preobrazovanija vrawatel'nogo dvizhenija v postupatel'noe / V.V. Morozov, V.I. Panjuhin, V.V. Panjuhin. – Vladimirskij gos. universitet, 2000. – 160s.
3. Korn, G. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T.M. Korn. – Lan', 2003. – 832s.
4. Suranov, A.Ja. LabVIEW 8: spravochnik po funkcijam / A.Ja. Suranov. – Moskva.: DMK Press, 2005. – 512 s.
5. Zagidullin, R.Sh. LabVIEW v issledovanijah i razrabotkah / R.Sh. Zagidullin. – Moskva.: Gorjachaja Linija – Telekom, 2005. – 252 s.

### **Starikov Albert Nickolaevich**

Vladimir state university, Vladimir

Senior teacher of department “Heat gas supply, ventilation and hydraulics”

Vladimir, ul. Gorkogo, 87

Tel.: 8-903-648-13-76

E-mail: albert@vlsu.ru

М.П. ШИШКАРЕВ

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ ПОСЛЕ СРАБАТЫВАНИЯ

*Исследован период времени работы предохранительных фрикционных муфт обычной точности срабатывания при прекращении буксования после окончания действия перегрузки. Показано, что условием автоматического восстановления работоспособности предохранительных фрикционных муфт после их срабатывания является равенство друг другу момента трения скольжения муфты и номинального момента машины.*

**Ключевые слова:** предохранительная фрикционная муфта, вращающий момент, перегрузка.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

К особенностям предохранительных фрикционных муфт относится их готовность к эксплуатации после остановки вращения, выключения привода и устранения причины перегрузки [1, 2]. Повторное включение привода происходит при коэффициенте трения покоя, что соответствует принимаемому при расчете соотношению между предельным моментом трения и номинальным моментом, необходимым для нормальной работы машины [1].

Задача исследования – изучение возможности восстановления функций предохранительных фрикционных муфт после окончания действия кратковременных перегрузок.

Решение задачи. Рассмотрим часто встречающийся в практике случай, характеризующийся срабатыванием (буксованием) муфты в результате наступившей перегрузки с самоустранением причин ее возникновения в процессе работы без остановки работы привода. Такой случай возможен, например, при эксплуатации машин, обрабатывающих неоднородную среду, в том числе с твердыми включениями сравнительно больших размеров (почвообрабатывающие, землеройные, дробильные и др. машины) [1].

Вращающий момент, передаваемый муфтой, определяется по формуле [1, 2]:

$$T_{п.i} = zF_{п}R_{ср}f_{п.i}, \quad (1)$$

где  $z$  – число пар трения фрикционной группы муфты;

$F_{п}$  – сила натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин);

$R_{ср}$  – средний радиус поверхностей трения фрикционных пар;

$f_{п.i}$  – текущее значение коэффициента трения покоя.

При буксовании момент сил трения муфты уменьшается до величины

$$T_{с.i} = zF_{п}R_{ср}f_{с.i}, \quad (2)$$

где  $f_{с.i}$  – текущее значение коэффициента трения скольжения.

Согласно данным работы [3], для нормального протекания хода технологического процесса машины должно выполняться соотношение

$$T_{п.н} = \beta_{н}T_{н}, \quad (3)$$

где  $T_{п.н}$  – номинальный вращающий момент муфты;

$\beta_{н}$  – коэффициент запаса сцепления:  $\beta_{н} = 1,25$  [1];

$T_{н}$  – номинальный момент, потребный для работы машины [3].

Для автоматического восстановления работоспособности муфты, которая заключается в надежной передаче вращающего момента  $T_{н}$ , необходимо выполнение условия:

$$T_{с.i} = T_{н}. \quad (4)$$

Коэффициенты трения покоя и скольжения связаны между собой соотношением:

$$f_{п.и} = n f_{с.и}, \quad (5)$$

где  $n$  – коэффициент:  $n > 1$ .

С учетом соотношения (5) и на основе формул (1) и (2) связь между  $T_{п.и}$  и  $T_{с.и}$  выражается равенством:

$$T_{п.и} = n T_{с.и}. \quad (6)$$

Одним из требований, предъявляемых к предохранительным муфтам, является надежность и безотказность в работе, поэтому настройка муфты должна производиться по коэффициенту трения  $f_{\min}$  ( $f_{\min}$  – минимальное значение коэффициента трения) [4].

Учитывая это, можно записать на основе равенства (6):

$$T_{п.\min} = n T_{с.\min} = T_{п.н}, \quad (7)$$

где  $T_{п.\min}$  и  $T_{с.\min}$  – соответственно настроенный вращающий момент и соответствующий ему момент сил трения скольжения муфты.

При буксовании муфта передает в кинематическую цепь привода вращающий момент, величина которого равна  $T_{с.\min}$  (при  $f = f_{\min}$ ), поэтому для выполнения условия (4) должно соответственно удовлетворяться равенство, вытекающее из сопоставления формул (3) и (7):

$$\beta_n T_n = n T_{с.\min}. \quad (8)$$

Из равенства (8), учитывая формулу (4), следует очевидное равенство  $\beta_n = n$ . По материалам литературных источников величина  $n$  для пар «металл–металл» и «металл–неметалл» составляет 1,5...2,0. Величина  $\beta_n$  меньше и не попадает в указанный интервал, следовательно, в большинстве случаев равенство (8) не выполняется и автоматическое восстановление работоспособности муфты невозможно. В этом случае необходимо либо уменьшить полезную нагрузку на рабочем органе машины, либо остановить работу привода и повторно включить его без нагрузки или при величине нагрузки, меньшей номинальной.

Второй способ повышения надежности работы муфт заключается в увеличении  $\beta_n$  до величины  $n$ . При этом увеличивается коэффициент превышения номинальной нагрузки в машине [1], что влечет за собой рост вращающего момента, допускаемого слабейшим звеном машины. Уменьшение величины упомянутого вращающего момента за счет повышения точности срабатывания муфт проблематично, так как стабильность величины вращающего момента муфт данного класса зависит только от рассеяния величины коэффициента трения [2].

Выводы. 1. Условием автоматического восстановления работоспособности предохранительных фрикционных муфт после срабатывания является, по меньшей мере, равенство друг другу момента трения скольжения муфты и номинального момента машины. 2. При принятом коэффициенте запаса сцепления автоматическое восстановление работоспособности предохранительных фрикционных муфт обычной точности срабатывания невозможно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков, В.С. Справочник по муфтам / В.С. Поляков, И.Д. Барбаш, О.А. Ряховский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1974. – 352 с.
2. Дьяченко, С.К. Предохранительные муфты / С.К. Дьяченко, Н.Ф. Киркач. – Киев: Гостехиздат УССР, 1962. – 122 с.
3. Тепинкичиев, В.К. Предохранительные устройства от перегрузки станков / В.К. Тепинкичиев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 112 с.
4. Шишкарев, М.П. Эффективность применения адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – № 1. – С. 27–31.

#### Шишкарев Михаил Павлович

Ростовский-на-Дону институт энергетике и машиностроения Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону

Доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Информационное обеспечение автоматизированного производства»

Тел. (863-2) 52-41-35

E-mail: Shishkarev@tam.rgashm.ru

M.P.SHISHKAREV

## RESTORATION OF SAFETY FRICTION CLUTCH EFFICIENCY AFTER OPERATION

*The operation period of safety frictional clutches with an operation common accuracy at a skid termination after overload effect completion is investigated. It is shown that the condition for automatic restoration of working capacity of safety frictional clutches after their operation should be a mutual equality of a clutch kinetic friction moment and motor-car torque rating.*

**Key word:** *safety frictional clutch, driving torque, overload.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Poljakov, V.S. Spravochnik po muftam / V.S. Poljakov, I.D. Barbash, O.A. Rjahovskij. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1974. 352 s.
2. D'jachenko, S.K. Predohranitel'nye mufty / S.K. D'jachenko, N.F. Kirkach. Kiev: Gostehizdat USSR, 1962. 122 s.
3. Tepinkichiev, V.K. Predohranitel'nye ustrojstva ot peregruzki stankov / V.K. Tepinkichiev. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1968. 112 s.
4. Shishkarev, M.P. Jeffektivnost' primenenija adaptivnyh frikcionnyh muft / M.P. Shishkarev // Izv. vuzov. Mashinostroenie. – 2001. № 1. – S. 2731.

#### **Shishkarev Mihail Pavlovich**

Rostov-on-Don institute of energetics and mechanical engineering of Don state technical university, Rostov-on-Don  
Doctor of technical science, associate professor, head of department “Information support of automated production”  
Tel.: 863-2-52-41-35  
E-mail: shishkarev@tam.rgashm.ru

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621.921.8(043)

Ю.В. МАРЧЕНКО, А.В. АЛЕКСАНДРОВ, Ю.М. САМОДУМСКИЙ, В.В. ИВАНОВ

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ КАЧЕСТВЕННОЙ И КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ И РАЗРАБОТКА ПРИБОРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ, ОБРАБОТАННЫХ В СВОБОДНЫХ АБРАЗИВНЫХ СРЕДАХ**

*В работе произведен анализ известных методов оценки шероховатости. Предложена конструкция прибора для оценки шероховатости поверхностей, имеющих нерегулярную структуру шероховатости.*

*Ключевые слова:* шероховатость, микронеровность, методы оценки шероховатости, экспресс-анализ.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время для измерения и контроля шероховатости применяются методы количественной оценки шероховатости поверхности в выбранном сечении, суммарной количественной оценки шероховатости поверхности и качественной оценки шероховатости поверхности сравнением с образцами.

Для количественной оценки шероховатости в выбранном сечении применяют разрезание изделия по определенному направлению, с последующей обработкой шлифа и наблюдением профиля сечения под микроскопом. Обработка шлифа образца связана с разрушением, что может привести к искажению действительного профиля сечения, поэтому при обработке шлифа применяют различные защитные покрытия.

Широко применяют различные оптические методы оценки шероховатости поверхности:

а) Интерференционные методы, в основу которых положен метод получения интерференционной картины в клине. Оценка высот микронеровностей производится путем сравнения величины искривления интерференционной полосы с ее шириной. На этом методе основана работа интерференц-микроскопов и микроинтерферометров акад. В.П. Линника. Метод применим для оценки шероховатости в пределах  $Ra = 0,1 \dots 0,012$  мкм.

б) Метод светового сечения заключается в следующем: пучок лучей под углом направляется на исследуемую поверхность через узкую щель и объектив в виде световой полоски. Так как у поверхности есть определенная шероховатость, то световая полоска будет иметь вид линии, искривленной по форме самой поверхности. Полученное изображение рассматривается под микроскопом, наклоненным под тем же углом к исследуемой поверхности. На этом принципе основан двойной микроскоп акад. В.П. Линника, служащий для измерения микронеровностей  $Ra = 12,5 \dots 0,2$  мкм (рис. 1).

Большое распространение получили также различные варианты щуповых приборов:

а) Ряд приборов, построено по схеме оптического рычага. При движении образца игла, конструктивно связанная с зеркальцем, вызывает его покачивания, в соответствии с микронеровностями исследуемой поверхности и на движущейся пленке записывается профилограмма. На этом методе основаны профилограф К.Л. Аммона, служащий для измерения микронеровностей  $Ra = 6,3 \dots 0,05$  мкм и профилограф Б.М. Левина, служащий для измерения микронеровностей  $Ra = 12,5 \dots 0,025$  мкм.

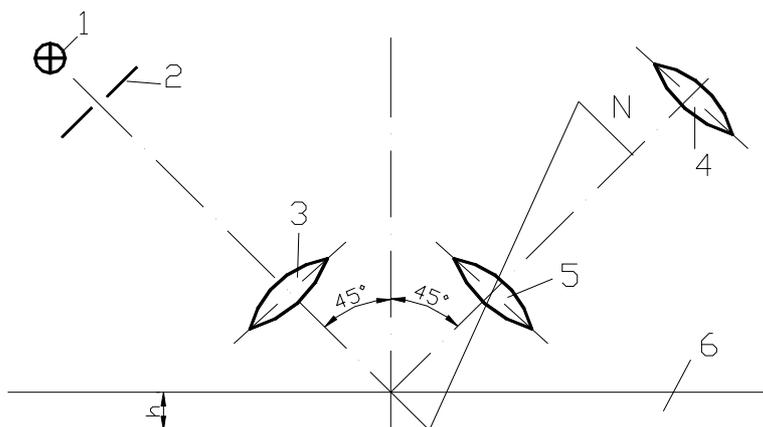


Рисунок 1 – Оптическая схема двойного микроскопа В.П. Линника (метод светового сечения)  
1- источник света; 2 – целевая диафрагма; 3 и 5 – объективы; 4 – окуляр; 6 – объект измерения

б) В индукционных профилографах ощупывание поверхности образца производится алмазной иглой, подвешенной на пружинах. На другом конце иглы помещена индукционная катушка, расположенная между полюсами магнита. При движении иглы по неровностям исследуемой поверхности в индукционной катушке возбуждаются малые токи, поступающие после усиления на гальванометр, по которому определяют среднеквадратичные значения высот микронеровностей. На этом принципе основаны профилометры В.М. Киселева, В.С. Чамана, индуктивные профилографы-профилометры, служащие для измерения микронеровностей  $Ra = 3,2 \dots 0,025$  мкм.

в) Пьезопрофилометры основаны на деформации пьезокварцевого элемента при колебаниях иглы и служат для измерения микронеровностей  $Ra = 0,8 \dots 0,025$  мкм.

г) Механические щуповые профилометры фирмы Йогансон (Швеция) основаны на использовании механизма микрокататора – плоской скрученной пружины. Цена деления микрокататора составляет до 0.01 мкм.

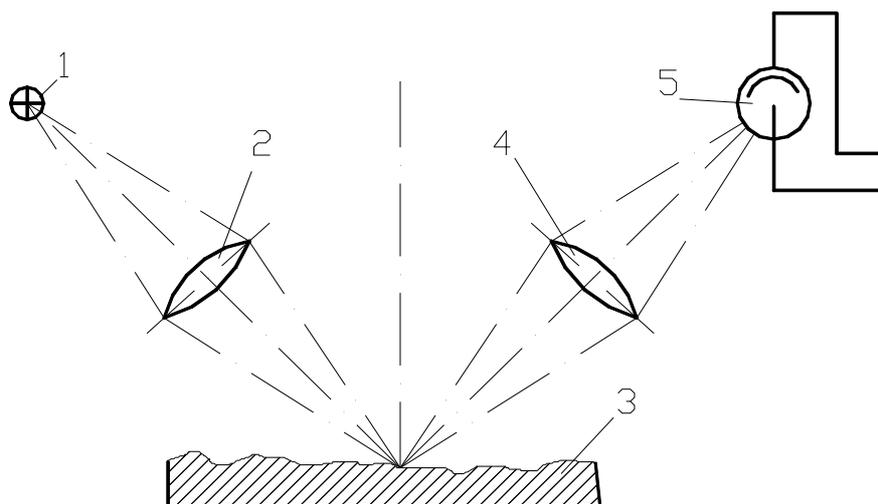
При суммарной количественной оценке шероховатость поверхности определяется по различным косвенным признакам (расход воздуха, проходящего через микронеровности поверхности, отражательная способность исследуемой поверхности и т.д.).

Пневматический метод основан на измерении расхода воздуха, проходящего через микронеровности поверхности. Изменение расхода воздуха отмечается по шкале ротометра, градуированной, обычно, в линейных величинах. Оценка шероховатости поверхности производится относительным методом по заранее аттестованным на других приборах образцам.

При емкостном методе исследуемая поверхность является одной из пластин конденсатора, другая пластина соединена со вторичным контуром, состоящим из катушки, конденсатора, являющегося образцовой емкостью и гальванометра. Между пластиной конденсатора и исследуемой пластиной проложен диэлектрик. Оба колебательных контура (генераторный и вторичный) настраиваются на резонанс по показаниям гальванометра. Отсчет производится по образцовому конденсатору переменной емкости. Метод подходит для оценки шероховатости  $Ra = 0,4 \dots 0,025$  мкм.

Рефлектометрический метод (рис. 2) основан на использовании отражательной способности исследуемой поверхности.

Лучи от источника света, отраженные от поверхности изделия, падают на фотоэлемент. В зависимости от интенсивности светового потока в фотоэлементе возникает большая или меньшая ЭДС, которая фиксируется соответствующими измерительными устройствами. Метод подходит для оценки шероховатости  $Ra = 0,1 \dots 0,012$  мкм.



**Рисунок 2 – Схема рефлектометра**

*1 – источник света; 2 и 4 – линзы; 3 – объект измерения; 5 – фотоэлемент*

Качественная оценка шероховатости поверхности производится сравнением с образцами с помощью специального микроскопа ЛИТМО (метод подходит для оценки шероховатости до Ra 0,025), либо невооруженным глазом и осязательно (Ra 12,5...0,2). Основной недостаток данного метода заключается в субъективности, и, следовательно, неточности оценки.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Образцы, обработанные в свободных абразивных средах с помощью пространственных маятниковых колебаний, имеют нерегулярную структуру шероховатости, а применение щуповых приборов предпочтительно при оценке шероховатости поверхности образцов с регулярным профилем микронеровностей. Кроме того, для некоторых отделочных операций, например, таких как матирование, необходимо достижение равномерной отражающей способности поверхности.

С целью сопоставления режимов обработки при отработке технологических процессов на деталях-представителях, а также для экспресс-анализа образцов во время экспериментов, вместо субъективного визуального сравнения был спроектирован и изготовлен прибор, основанный на отражательной способности исследуемой поверхности (рис. 3).

От стабилизатора напряжения 1 питание поступает на источник света 2. Лучи от источника света 2 через объектив 3 и диафрагму 10 падают на исследуемую поверхность образца 5, закрепленного на подставке 4.

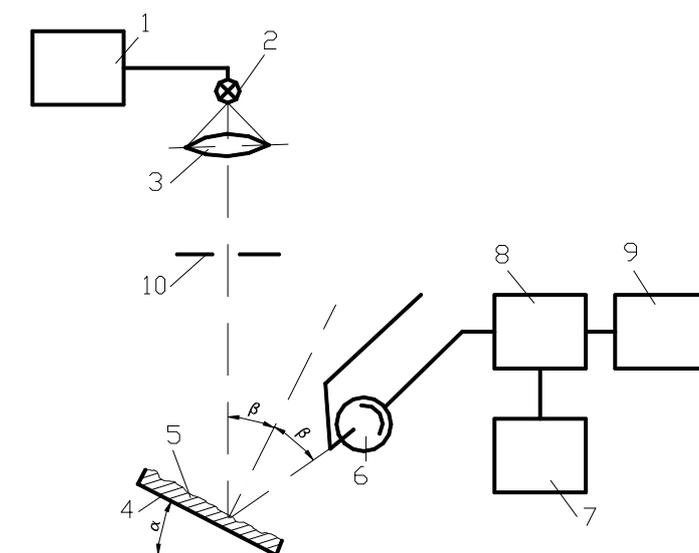
Подставка имеет возможность плавно поворачиваться на произвольный угол  $\alpha$ . Это нужно для того, чтобы установить образец под таким углом к источнику света, при котором тени отбрасываемые микронеровностями будут наибольшими.

Свет, отражаемый от поверхности образца, улавливается фоторезистором 6, крепление которого позволяет установить его под тем же углом к исследуемой поверхности, что и источник света. Падение напряжения на фоторезисторе усиливается усилителем 8 и измеряется милливольтметром 9. Наличие стабилизатора 7 обеспечивает стабильность усиления отраженного сигнала.

Для настройки прибора предусмотрена регулировка расстояния от источника света до образца и от образца до фоторезистора.

Импульсный усилитель 8 имеет регулятор усиления сигнала, служащий для настройки показаний прибора при различных материалах образцов. Необходимость его использования обусловлена тем, что отражательная способность разных материалов существенно отличается.

Градуировка прибора производилась на цилиндрическом образце диаметром 30 мм из стали 40Х, разделенного на 6 участков с различной регулярной шероховатостью, полученной точением с регулируемой подачей.



**Рисунок 3 – Принципиальная схема прибора для экспресс-анализа образцов с нерегулярной шероховатостью поверхности**

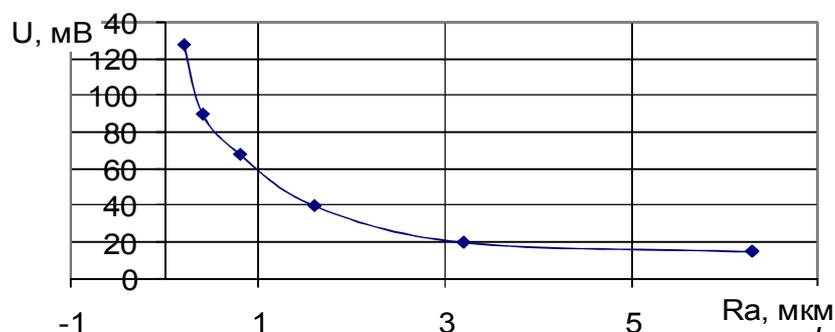
1 – стабилизатор напряжения источника света; 2 – источник света; 3 – объектив;  
 4 – подставка для образца, установленная под углом  $\alpha$ ; 5 – образец; 6 – фоторезистор;  
 7 – стабилизатор напряжения усилителя; 8 – усилитель; 9 – милливольтметр; 10 – диафрагма

Показания прибора для экспресс-анализа полученные при его градуировке по контрольному образцу представлены в таблице 1. На каждом участке образца измерение проводилось пять раз.

Таблица 1 – Показания прибора при градуировке

$Ra$	$Ra$ факт.	Показания прибора, мВ					Средн.
		1	2	3	4	5	
0,2	0,185	128	130	128	125	129	128
0,4	0,411	93	100	88	85	84	90
0,8	0,803	70	69	67	65	69	68
1,6	1,62	40	45	35	38	42	40
3,2	3,25	22	25	10	22	21	20
6,3	5,89	15	16	17	15	12	15

График зависимости показаний прибора от шероховатости представлен на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Зависимость показаний прибора от шероховатости образца**

На рисунке 5 представлен узел фоторезистора прибора.

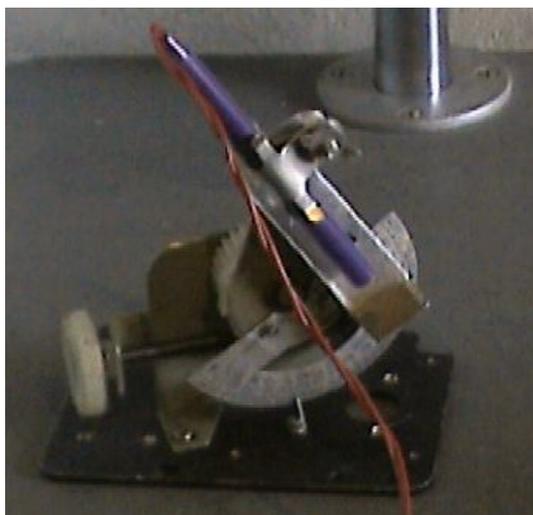


Рисунок 5 – Узел фоторезистора прибора для экспресс-анализа образцов

Для количественной оценки шероховатости использовался двойной электронный микроскоп Axiovert 25 фирмы Zeiss, оснащенный модулем цифровой камеры.

Обработанные образцы заливались в вертикальном положении в таблетки. Затем, делался поперечный шлиф полученной таблетки. При 500-кратном увеличении, делались снимки профилей образцов. В дальнейшем, снимки профилей подвергались обработке с помощью компьютера.

Параметр шероховатости Rz определялся по величине максимальных выступов и впадин на получившихся в результате расчетных схемах профиля поверхности образцов. Параметр Ra определялся как  $Ra = 0,25 \cdot Rz$ .

### ВЫВОДЫ

Таким образом, для экспресс-анализа образцов во время экспериментов, спроектированный и изготовленный прибор, основанный на отражательной способности исследуемой поверхности вместо субъективного визуального сравнения, позволяет с высокой степенью вероятности и производительностью контролировать шероховатость поверхности образцов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник для вузов / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.Ф. Федотов. – 6-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с., ил.
2. Александров, А.В. Определение параметров пространственных маятниковых вибротрибов, обеспечивающих снижение шероховатости поверхности при высокопроизводительной виброабразивной обработке: дис. ... канд. техн. наук. : 05.03.01: / А.В. Александров. – Старый Оскол, 2004. – с. 227
3. Сергиев, А.П. Воздействие вертикальной составляющей амплитуды на качество поверхности обрабатываемых деталей / А.П. Сергиев, Ю.В. Марченко и др. // Сборник трудов международной научно-технической конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения" "Технология 2000" – Орел, 2000, С. 191-193.

#### Марченко Юлианна Викторовна

Азовский технологический институт (филиал)  
Донского государственного технического университета  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел: (863-42) 44-2-77  
E-mail: daulianna1@rambler.ru

#### Александров Алексей Владимирович

Старооскольский технологический институт (филиал)  
Московского государственного института сталей и сплавов  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел: 8(4725) 32-25-29  
E-mail: alexey.alexandrov@qmail.com

**Самодумский Юрий Михайлович**

Азовский технологический институт (филиал)  
Донского государственного технического университета  
Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник  
Тел: (863-42) 44-2-77  
E-mail: daulianna1@rambler.ru

**Иванов Владимир Витальевич**

Азовский технологический институт (филиал)  
Донского государственного технического университета  
Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник  
Тел: (863-42) 44-2-77  
E-mail: ivanov@atidstu.ru

---

Y.V. MARCHENKO, A.V. ALEXANDROV, J.M. SAMODUMSKY, V.V. IVANOV

**ANALYSIS OF METHODS FOR QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ESTIMATION OF ROUGHNESS AND DEVELOPMENT OF DEVICES FOR SURFACE ROUGHNESS ESTIMATION OF SAMPLES PROCESSED IN FREE ABRASIVE ENVIRONMENT**

*This paper reports the analysis of well-known methods of roughness estimate. The device structure for the estimate of surface roughness having irregular roughness structure is offered.*

**Key words:** roughness, microimperfections, methods for roughness estimate, express analysis.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Jakushev, A.I. Vzaimozamenjajemost', standartizacija i tehicheskie izmerenija: Uchebnik dlja vtuzov / A.I. Jakushev, L.N. Voroncov, N.F. Fedotov. – 6-e izd., pererab. i dopoln. – M.: Mashinostoenie, 1986. – 352 s., il.
2. Aleksandrov, A.V. Opredelenie parametrov prostranstvennyh majatnikovyh vibromashin, obespechivajuwih snizhenie sferohovatosti poverhnosti pri vysokoproizvoditel'noj vibroabrazivnoj obrabotke: dis. ... kand. tehn. nauk. : 05.03.01: / A.V. Aleksandrov. – Staryj Oskol, 2004. – s. 227
3. Sergiev, A.P. Vozdejstvie vertikal'noj sostavljajuwej amplitudy na kachestvo poverhnosti obrabatyvaemyh detalej / A.P. Sergiev, Ju.V. Marchenko i dr. // Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnologii mashinostroenija" "Tehno-logija 2000" – Orel, 2000, S. 191-193.

**Marchenko Yulianna Vicktorovna**

Azov technological institute (branch)  
Of Don state technical university  
Candidate of technical science, associate professor  
Tel.: 863-42-44-2-77  
E-mail: daulianna@rambler.ru

**Aleksandrov Aleksey Vladimirovich**

Starooskol technological institute (branch)  
Of Moscow state institute of steel and alloy materials  
Candidate of technical science, associate professor  
Tel.: 8-4725-32-25-29  
E-mail: alexey.alexandrov@gmail.com

**Samodumskiy Yriy Mihaylovich**

Azov technological institute (branch)  
Of Don state technical university  
Candidate of technical science, associate professor, senior scientific worker  
Tel.: 863-42-44-2-77  
E-mail: daulianna@rambler.ru

**Ivanov Vladimir Vitalievich**

Azov technological institute (branch)  
Of Don state technical university  
Candidate of technical science, associate professor, senior scientific worker  
Tel.: 863-42-44-2-77  
E-mail: ivanov@atidstu.ru

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АБРАЗИВНО-АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ

*Возможности традиционного шлифования приближаются к своему пределу. Дальнейшее развитие шлифования связано с изменением кинематических соотношений скоростей заготовки и инструмента. Значительные резервы повышения производительности шлифования заключены в комплексных способах, связующих классические виды шлифования и характеризующихся равными и соизмеримыми скоростями инструмента и заготовки. Показаны направления развития абразивной обработки и примеры новых способов шлифования.*

**Ключевые слова:** шлифование, абразивно-алмазная обработка, комплексные способы шлифования, соизмеримые и равные скорости обработки.

Перед отечественным машиностроением стоит задача разработки принципиально новых эффективных технологий, высокопроизводительного оборудования и инструмента, конкурентоспособных на мировом рынке и позволяющих выпускать продукцию с минимальными затратами, высокого качества, технического уровня, надежности и долговечности.

Надежность и долговечность деталей машин, механизмов и приборов во многом определяются качеством их поверхностного слоя, окончательное формирование которого происходит на стадии выполнения финишной обработки.

В настоящее время примерно 80% финишных операций, начиная с прецизионной и нанообработки деталей электронной и микропроцессорной техники и кончая высокопроизводительным шлифованием стального проката и валков прокатных станков, производится абразивно-алмазным инструментом. Более 32% видов металлорежущего оборудования оснащено таким инструментом [1-4].

Среди всех известных методов абразивно-алмазной обработки шлифование является одним из самых распространенных и эффективных технологических процессов. Уже на заре своего развития человечество освоило эту операцию. Ныне объем шлифовальных работ постоянно возрастает, составляя в среднем 25-30%, а в отдельных отраслях промышленности – до 70% всех видов станочных работ.

Абразивно-алмазная обработка отличается большим многообразием способов реализации и охватывает широкий диапазон скоростей резания (от 0,1 до 300 м/с) и широким диапазоном снимаемых припусков (от 0,01 до 30 мм). Это позволяет эффективно использовать ее вместо лезвийной, а также в качестве отделочной. Среди других видов механической обработки шлифование является одним из самых точных и производительных. Производительность некоторых способов шлифования превышает производительность точения и фрезерования в 10-20 раз. В ряде случаев шлифование является единственным, безальтернативным процессом высокоточной обработки деталей, когда иные методы не могут быть применены вообще.

В развитии технологий абразивной обработки можно отметить эволюционный и революционный путь.

Первый путь осуществляется на традиционных станках при минимальных затратах на модернизацию и совершенствование оборудования, инструментов и оснастки, обеспечивающих увеличение производительности, повышение точности, качества и стойкости инструмента в 5-10 раз. По этому пути идут многие исследователи и предприятия, что связано с меньшими затратами и получением требуемых параметров качества и точности обработки.

Революционное направление связано с созданием принципиально новых станков и абразивных кругов, полной заменой устаревшего технологического оснащения. Конечно же, этот путь в масштабах всех отраслей машиностроения требует астрономических затрат.

Оптимальное решение, как всегда, находится посередине: разработка, совершенствование и модернизация технологий, которые могут быть реализованы на традиционном оборудовании, и постепенная замена станочного парка оборудованием нового поколения, позволяющим реализацию технологий 21 века.

Развитие технологий носит циклический характер, связанный с созданием новых абразивных материалов, связок, инструментов, систем ЧПУ.

Обычно повышение производительности при шлифовании достигается повышением скорости шлифования. Традиционное шлифование производится на скоростях 20-35 м/с,

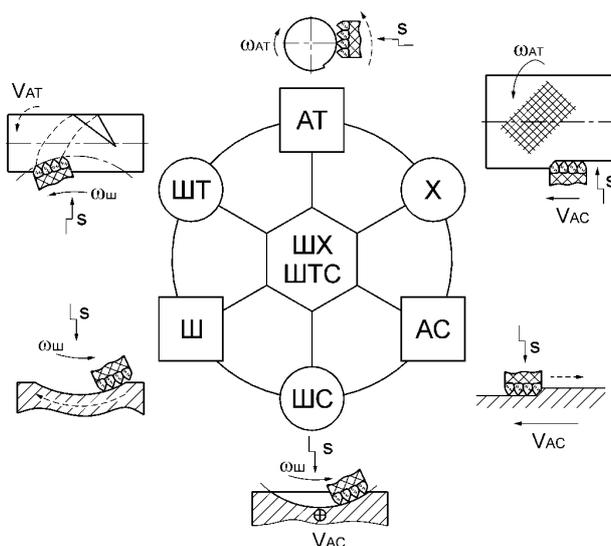
скоростное – свыше 35 до 60 м/с, высокоскоростное – свыше 60 м/с. Заметим, что увеличение скорости круга, так же как и ее снижение имеет ограничение. И все же классическое, традиционное, шлифование приближается к пределу своих возможностей. Скорость круга достигла 100-250 м/с, созданы круги на специальных связках и технология шлифования на скоростях 250-300 м/с. Микрорезание при высоких скоростях переходит в нерентабельное скоростное трение, требующее мегаэнергозатрат.

Повышение точности исходных заготовок (отливок, поковок, штамповок и др.), с одной стороны, разработка суперабразивов, сверхпрочных керамических, синтетических и металлических связок, создание на этой основе абразивных инструментов с уникальными характеристиками (срок службы одного шлифовального круга может достигать около 10 месяцев, им можно обработать 300-380 тысяч заготовок) и высокоавтоматизированного оборудования нового поколения, с другой стороны, открывают новые горизонты применения и технологические возможности абразивной обработки, которые до недавнего времени были практически неосуществимы.

Для повышения эффективности шлифования предложено большое количество технических и технологических решений: новые абразивные материалы (эльбор, корунды, полученные методом спекания (Sol-Gel), сферокорунд, высокопористые круги, азбор, новые синтетические, керамические и металлические связки, дискретное шлифование (прерывистые и сборные абразивные круги), шлифование «с бегущим или сканирующим контактом», многокруговое, совмещенное, сопряженное, «долбежное», с непрерывными и непрерывно-переменными подачами; импрегнирование, наложение вибраций, ультразвука, химических и электрических импульсов различных характеристик, способы непрерывной и цикловой правки, виды и методы подачи СОЖ. Только последних разработано более 200 разновидностей.

Ярким примером влияния абразивного материала на эффективность шлифования является обработка каландровых валов для бумажной промышленности [5]. Время обработки одного такого вала при съеме 1 мм в три смены составляло 10 дней при расходе четырех кругов из карбида кремния. После их замены эльборовыми производительность увеличилась в 10 раз. Один вал обрабатывается теперь за 2 смены, а одним кругом обрабатывается 10-12 валов.

Дальнейшее развитие абразивной обработки связано с изменением кинематических соотношений скоростей заготовки и инструмента. Значительные резервы повышения производительности шлифования заключены в комплексных способах, характеризуемые равными и соизмеримыми скоростями заготовки и инструмента. Новые способы находятся между классическим шлифованием, абразивным точением и абразивным строганием (рис. 1). Основные из них – комплексные способы: шлифоточение (ШТ), шлифострогание (ШС), известное хонингование (Х), шлифохонингование (ШХ), шлифотокарное строгание (ШТС) [6-8].



*Рисунок 1 – Схема взаимосвязи способов абразивной обработки*

Равенство или соизмеримость скоростей заготовки и инструмента в комплексных способах предопределяет их встречное направление, а скорость резания равна их векторной сумме. С увеличением отношения скоростей увеличиваются толщина  $a$  и объём среза  $V$  абразивным зерном и уменьшаются удельные энергзатраты  $p$  (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры среза единичным зерном в зависимости от соотношения скоростей заготовки и круга  $k = v_{AC}/v_{Ш}$ . Плоское шлифование стали 40ХГНМ кругом 24А40СТ9Б5 диаметром 300 мм, припуск 0,1 мм.

$k$	$a_{max}, \text{мм}$	$p, \text{МПа}$	$a_{cp}, \text{мм}$	$l, \text{мм}$	$V, \text{мм}^3$
10	0,0462	1500	0,0231	94	0,434
1	0,0255	3030	0,01275	11,62	0,0296
$10^{-1}$	0,0046	22000	0,00231	6,05	0,0028
$10^{-2}$	0,0005	45000	0,00025	5,48	0,00027

Рациональная зона находится при соотношении скоростей  $k = v_{AC}/v_{Ш} = 0,5 \dots 5$  и соответствует способам группы хонингования (рис. 2).

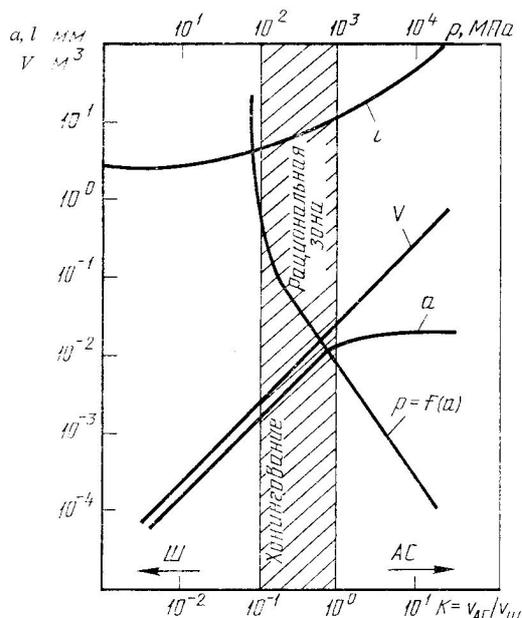


Рисунок 2 – Зависимости толщины  $a$ , длины  $l$  и объёма  $V$  среза, удельной силы  $p$  от соотношения скоростей поступательного  $v_{AC}$  и вращательного  $v_{Ш}$  движения

Наиболее эффективным из них является шлифохонингование – хонингование шлифовальным кругом. Например, шлифование тел вращения на круглошлифовальном станке со встречными скоростями  $v_{Ш}$  и  $v_T$  осуществляется с суммарной скоростью  $v_{ШТ}$ . При соизмеримой скорости  $v_{ШТ}$  со скоростью возвратно-поступательного движения заготовки  $v_{AC}$  способ соответствует хонингованию со скоростью  $v_X$  см. сетку траекторий абразивных зерен (рис. 3, а). Другой вариант хонингования реализуется при шлифовании торцом круга (рис. 3, б). Новым является бесцентровое шлифохонингование прутков 2 с наклоном осей рабочего 1 и ведущего кругов 3 в противоположные стороны (рис. 3, в). Способ осуществляется на бесцентрово-доводочном полуавтомате мод. 3Е184ДВ Витебского станкостроительного завода.

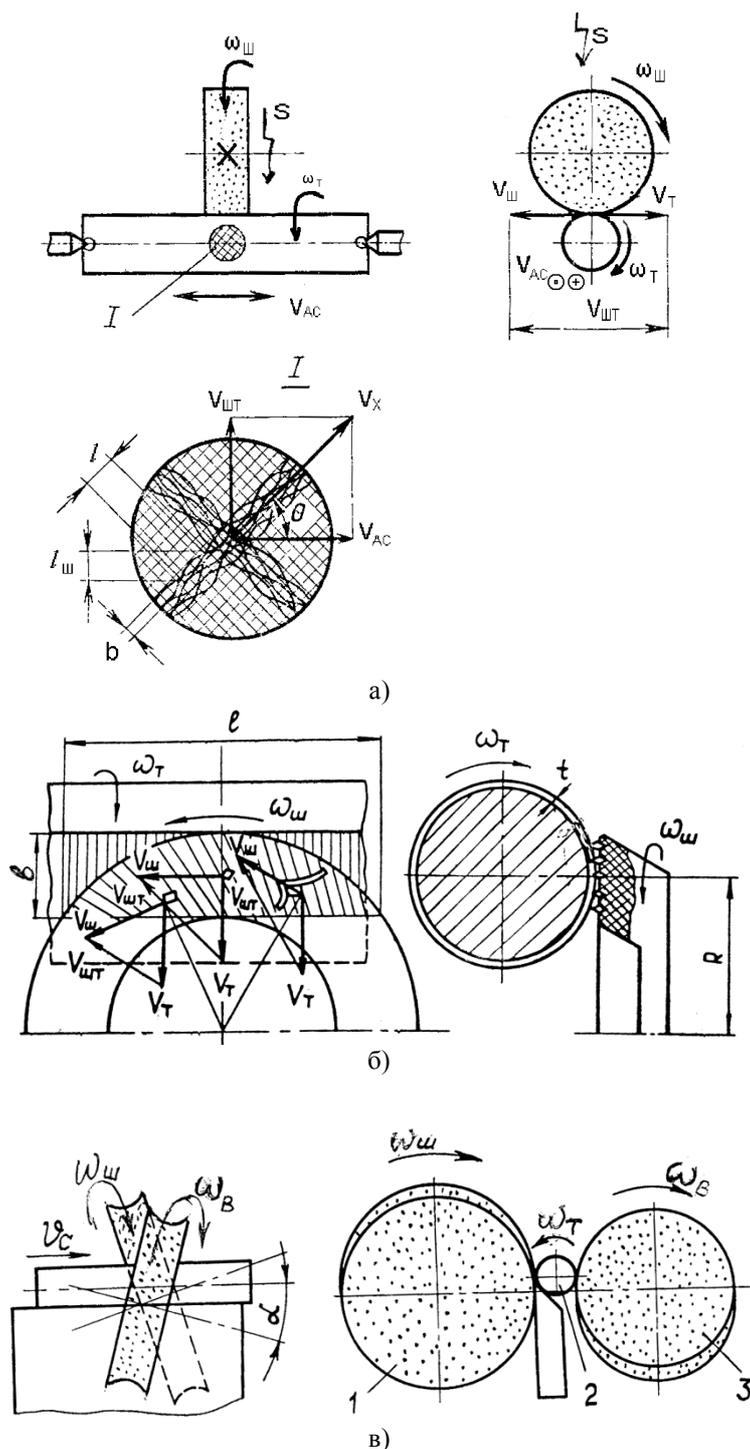


Рисунок 3 – Способы шлифохонингования

*а – периферией, б – торцем круга, в – бесцентрового разнонаклонными кругами*

Примером плоского шлифования на соизмеримых скоростях как альтернативы глубинному шлифованию может служить маятниковое высокоскоростное шлифование с большими подачами. Фирма Blohm Maschinenbau GmbH разработала, изготовила и провела исследования на шлифовальном станке, обеспечивающим скорости продольных перемещений стола до 200 м/мин и ускорения до 50 м/с<sup>2</sup> [6]. Ею было доказано, что с повышением скоростей подач удельная мощность шлифования уменьшается, понижается радиальный износ шлифовальных кругов, геометрия обработанной поверхности улучшается: если при глубинном шлифовании с непрерывной правкой возникают температурные впадины в поверхностном слое глубиной до 80 мкм, то при высокоскоростном маятниковом шлифовании глубина температурных впадин не более 8 мкм. Черновыми проходами снимается основной припуск.

Чистовые проходы обеспечивают обработку в окончательный размер. Процесс требует меньше времени и обеспечивает экономический эффект. Обеспечивается высокое качество обработанной поверхности при повышенных динамических характеристиках станка. Положительным результатом явилось также то, что при увеличении скорости подач с 20 до 190 м/мин шероховатость улучшилась с Ra 2 мкм до 0,8 мкм.

В связи с тем, что при повышенной скорости подач за единицу времени в зоне контакта тепловое воздействие на деталь меньше, в поверхностном слое не происходит структурно-фазовых превращений. Интересным фактом является то, что ускорение стола в определенном диапазоне скоростей имеет оптимум, который смещается при высоких ускорениях в сторону высоких скоростей. Поэтому необходимо работать с повышенными скоростями и ускорениями. При высокоскоростном маятниковом шлифовании толщина стружки, снимаемой отдельными абразивными зернами большая при меньшей поверхности контакта, трение абразива и нагрев детали меньше.

Конечно, реализация новых технологий невозможна без создания современного оборудования. Станины шлифовальных станков изготавливают литьем из микрогранита и минеральных материалов, обеспечивающих виброгашение и термостабильность. Шлифовальные станки нового поколения наряду с оптимизацией статических и динамических свойств оснащаются также новыми приводами подач прямого действия - линейными электродвигателями. Такие приводы позволяют упростить и полностью исключить механические промежуточные звенья, исключить упругие перемещения, зазоры, трение, повысить экономичность и надежность станка. Если 15 и более лет назад использование таких двигателей в станкостроении рассматривалось как экзотика, то теперь их применение специалистами расценивается как обычная практика, в то же время говорящая о дальновидности производителей станков.

Заметим, что авторами этой работы теоретические предпосылки возможности шлифования на равных и соизмеримых скоростях круга и заготовки были обоснованы значительно раньше своих зарубежных коллег. Однако воплощение «в металле» дальше опытных образцов и технологий, а также ограниченного использования на отдельных предприятиях не пошло. Бизнес-сообщество страны пока невосприимчиво к инновациям. Инновационная среда пока только создается.

Таким образом, реальной перспективой развития абразивной обработки является новое соотношение скоростей движений инструмента и заготовки, соизмеримость и встречное направление скоростей. Это позволяет на порядок уменьшить удельные энергозатраты, увеличить стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

Кроме того, важной тенденцией в развитии оборудования и технологий, в том числе и шлифовальных, является их базирование на принципе биосферной совместимости и экологической безопасности. Следует отметить тенденцию применения биотехнологических СОЖ, а также шлифования всухую. Последняя особенно проявляется при обработке микродеталей, когда капля жидкости превышает во много раз размер шлифуемой заготовки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков, Ю.М. Современные тенденции развития абразивной обработки / Ю.М. Ермаков, Ю.С. Степанов. – М.: ВНИИТЭМР, 1991. – 62 с.
2. Степанов, Ю.С. Абразивная обработка отверстий / Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 120 с.
3. Степанов, Ю.С. Дискретное внутреннее шлифование / Ю.С. Степанов, В.Г. Гусев, Б.И. Афанасьев ; под ред. Ю.С. Степанова. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 190 с.
4. Шлифование внутренних фасонных поверхностей / Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев, Д.Р. Блурцян, И.И. Колтунов, Д.С. Фомин; под ред. Ю.С. Степанова. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 262 с.
5. Электронный ресурс – Режим доступа : <http://www.pazi.ru/news1.html>.
6. Ермаков, Ю.М. Современные эффективные способы абразивной обработки / Ю.М. Ермаков, Ю.С. Степанов. – М.: ВНИИТЭМР, 1992. – 64 с.
7. Ермаков, Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием / Ю.М. Ермаков. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
8. Motion. Корпоративный журнал группы предприятий Krber Schleifring GmbH. Специальный выпуск к выставке «Металлообработка-2008». – С. 25 - 32.

**Ермаков Юрий Михайлович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва;  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическая информатика и технология машиностроения»;  
Тел. (8499) 268-45-88

**Степанов Юрий Сергеевич**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УПНК», г. Орел;  
Доктор технических наук, профессор  
Тел. (4862) 47-50-71  
E-mail: stepanov@ostu.ru

---

Y.M. YERMAKOV, Y.S. STEPANOV

**PROSPECTS IN ABRASION DEVELOPMENT**

*Opportunities of traditional grinding come nearer to the limit. The further development of grinding is connected to change of kinematic parities of speeds of preparation and the tool. Significant reserves of increase of productivity of grinding are made in the complex ways binding classical kinds of grinding and described in the equal and commensurable speeds of the tool and preparation. Directions of development of abrasive processing and examples of new ways of grinding are shown.*

**Key words:** *grinding, abrasive-diamond processing, complex ways of grinding, commensurable and equal speeds of processing.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Ermakov, Ju.M. Sovremennye tendencii razvitiya abrazivnoj obrabotki / Ju.M. Ermakov, Ju.S. Stepanov. – М.: VNIITJeMR, 1991. – 62 s.
2. Stepanov, Ju.S. Abrazivnaja obrabotka otverstij / Ju.S. Stepanov, B.I. Afanas'ev. – М.: Mashino-stroenie-1, 2003. – 120 s.
3. Stepanov, Ju.S. Diskretnoe vnutrennee shlifovanie / Ju.S. Stepanov, V.G. Gusev, B.I. Afanas'ev ; pod red. Ju.S. Stepanova. – М.: Mashinostroenie-1, 2004. – 190 s.
4. Shlifovanie vnutrennih fazonnyh poverhnostej / Ju.S. Stepanov, B.I. Afanas'ev, D.R. Blurecjan, I.I. Koltunov, D.S. Fomin; pod red. Ju.S. Stepanova. – М.: Mashinostroenie-1, 2005. – 262 s.
5. Jelektronnyj resurs – Rezhim dostupa : <http://www.pazi.ru/news1.html>.
6. Ermakov, Ju.M. Sovremennye jeffektivnye sposoby abrazivnoj obrabotki / Ju.M. Ermakov, Ju.S. Stepanov. – М.: VNIITJeMR, 1992. – 64 s.
7. Ermakov, Ju.M. Kompleksnye sposoby jeffektivnoj obrabotki rezaniem / Ju.M. Ermakov. – М.: Mashinostroenie, 2003. – 272 s.
8. Motion. Korporativnyj zhurnal grupy predpriyatij Krber Schleifring GmbH. Special'nyj vypusk k vystavke «Metalloobrabotka-2008». – S. 25 - 32.

**Ermakov Yuriy Mihaylovich**

Moscow state university of instrument engineering and informatics, Moscow  
Doctor of technical science, professor of department “Technological informatics and mechanical engineering technology”  
Tel.: 8499-268-45-88

**Stepanov Yuriy Sergeevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Doctor of technical science, professor  
Tel.: 4862-47-50-71  
E-mail: stepanov@ostu.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВОДЯНОЙ СТРУЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

*Представлена математическая модель контактного взаимодействия водяной струи высокого давления с обрабатываемой поверхностью в процессе ее очистки, позволяющая обоснованно назначать технологические параметры обработки, характеризующие эффективность процесса.*

**Ключевые слова:** контактное взаимодействие, математическая модель, эффективность процесса.

Одной из важнейших операций при техническом обслуживании и ремонте машин и оборудования является очистка поверхностей от различных загрязнений.

В зависимости от условий изготовления, обработки и хранения металлов и сплавов на поверхностях могут присутствовать различные виды загрязнений. Различают загрязнения органической (минеральные масла) и неорганической природы (оксиды и гидроксиды металла, шлаки, цеховая пыль и др.).

Различные виды загрязняющих веществ требуют очистки разной степени сложности.

Высокая степень сложности очистки – хлорированные и сульфированные масла, жирные кислоты и их соли, компоненты полировочных паст, старая краска, углеродная сажа.

Средняя степень сложности очистки – машинное масло, гидравлические масла, притирочные составы, восковые ингибиторы, оксиды металлов.

Низкая степень сложности очистки – растворимые масла, водорастворимые вещества, эмульсии масел, синтетические масла, легкие машинные масла.

При выборе способа очистки обычно учитывают природу загрязняющих веществ и степень загрязнения ими поверхности.

Очистка поверхности достигается разными методами: механическим, струйным, физическим, химическим, физико-химическим и химико-термическим.

В основе каждого метода – определенный способ разрушения загрязнений и удаления их с поверхности (табл.1).

Таблица 1 – Методы очистки поверхности и способы их интенсификации [1]

Метод очистки	Механизм очистки (способ разрушения загрязнений)	Способы интенсификации процесса очистки	Достоинства и недостатки
Механический	Механическое разрушение загрязнений протиранием, соскабливанием, фрезерованием.	Механизация за счет применения инструмента (щеточки, иглофрезы) с электро- или пневмоприводом.	<p><b>Преимущества</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Малая энергоемкость процесса очистки</li> <li>2. Универсальность (возможность удалять различные загрязнения)</li> <li>3. Простота утилизации отходов (высокая безотходность)</li> <li>4. Возможность механизации и автоматизации</li> </ol> <p><b>Недостатки</b></p> <p>Применение ручного труда</p>

Струйный	Механическое разрушение загрязнений за счет кинетической энергии воздействия струи воды, воздуха, твердых частиц (стеклосферы, чугунная дробь, косточковая крошка, сода, льдинки)	Повышение давления струй до 5-63МПа	<b>Преимущества</b> 1.Высокая производительность и степень очистки 2.Универсальность (возможность удалять различные загрязнения) 3. Простота утилизации отходов (высокая безотходность)
Физический	Растворение загрязнений	1.Применение ультразвука 2. Применение струйного облива и паров растворителей	<b>Преимущества</b> 1.Высокая скорость очистки 2.Высокое качество очистки 3.Высокая безотходность производства 4.Возможность механизации и автоматизации процесса очистки <b>Недостатки</b> 1.Вредность производства 2.Сложность удаления отходов 3.Эффективность применения для малой группы загрязнений
Химический	Химическое травление загрязнений и очищаемой поверхности	Повышение температуры ведения процесса	<b>Преимущества</b> 1.Высокая скорость очистки 2.Малая энергоемкость процесса очистки 3.Возможность механизации процесса <b>Недостатки</b> 1.Эффективность применения для малой группы загрязнений 2.Разрушение очищаемой поверхности 3.Низкая безотходность производства
Физико-химический	Растворение, эмульгирование и химическое разрушение загрязнений (применение растворяюще - эмульгирующих средств с ополаскиванием в растворах синтетических моющих средств)	Перемещение (колебание, вращение) очищаемого объекта в процессе очистки	<b>Преимущества</b> 1.Высокая скорость очистки 2.Высокое качество очистки 3.Малая энергоемкость процесса очистки 4.Умеренная температура ведения процесса очистки (20—50° С) 5.Возможность механизации и автоматизации процесса <b>Недостатки</b> 1.Эффективность применения для малой группы загрязнений 2.Вредность производства 3. Низкая безотходность производства

продолжение таблицы 1

Химико-термический	Химическое разрушение (сгорание) загрязнений в пламени или в щелочном расплаве при высокой температуре (400—450°С); объемные и структурные изменения загрязнений	Оптимизация состава щелочного расплава и автоматизация процесса очистки	<p><b>Преимущества</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Большая скорость очистки</li> <li>2. Высокое качество очистки</li> <li>3. Возможность механизации и автоматизации процесса очистки</li> </ol> <p><b>Недостатки</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Эффективность применения для малой группы загрязнений</li> <li>2. Высокая энергоемкость процесса очистки</li> <li>3. Возможна деформация и разрушение деталей</li> </ol>
--------------------	--	---	--

Как видно из таблицы 1, единственным методом очистки, лишенным недостатков, является струйный, интенсификация режимов обработки которого является актуальным направлением в машиностроении.

Очевидно, что производительность очистки струей воды с абразивными частицами выше, чем производительность очистки чистой водой. Однако, особенно в последние годы, важна экологичность любого технологического процесса. Необходимость сбора и утилизации абразивного шлама при гидроабразивной очистке, а также затраты на приобретение дорогостоящего абразивного материала дают предпосылки для проведения более глубоких исследований процесса гидроструйной очистки труднодоступных поверхностей, например, - внутренних поверхностей труб. На рисунке 1 показана схема такой очистки.

Для обоснованного назначения режимов гидроструйной очистки необходимо рассмотреть механизм разрушения загрязнений.

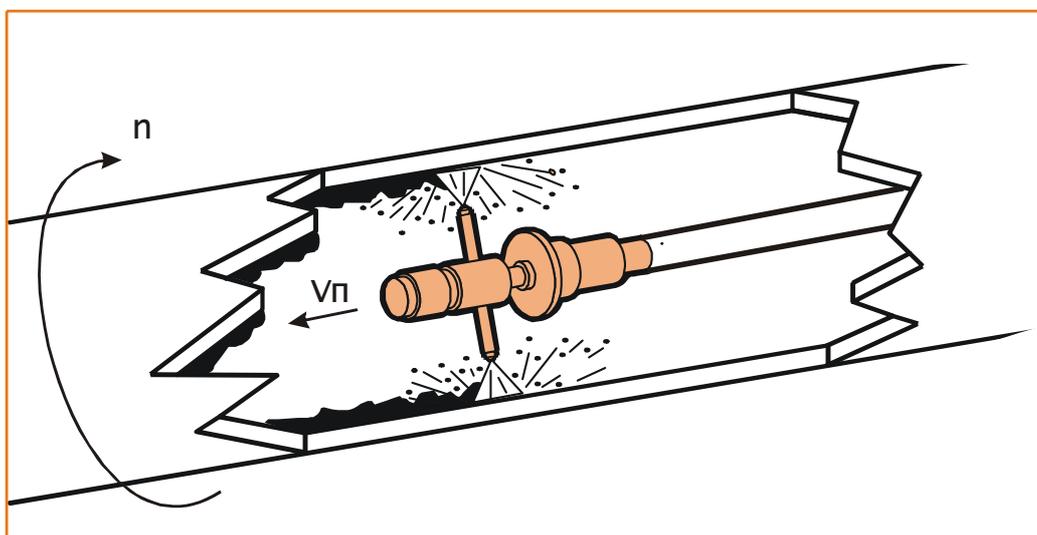


Рисунок 1 – Схема гидроструйной очистки внутренней поверхности

Как известно [2], при набегании струи жидкости высокого давления на преграду, в ней возникает ударная волна. Для описания технологического процесса гидроструйной очистки и определения четырех важных силовых и теплофизических параметров очистки (давления, температуры, плотности и скорости струи) будем рассматривать загрязнение материала как преграду для падающей вертикально вниз струи, состояние которой будет определяться тремя законами непрерывности: потока вещества (жидкости), импульса и энергии и уравнением состояния жидкости при прохождении слоя материала, которое характеризуется законом Ван-дер-Ваальса. Будем рассматривать состояние струи в два момента времени: при

входе в материал загрязнения а также при выходе из материала загрязнения перед встречей с основным материалом очищаемой поверхности. Необходимо получить такие параметры струи, при которой она обеспечивала бы разрушение материала загрязнения, не разрушая при этом основной материал очищаемой поверхности. Таким образом, имеем систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными, решение которой возможно известными математическими способами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot v_2 \\ P_1 + \rho_1 \cdot v_1^2 - \left( \frac{4}{3} \eta + \xi \right) \frac{dv_1}{dx} = P_2 + \rho_2 \cdot v_2^2 - \left( \frac{4}{3} \eta + \xi \right) \frac{dv_2}{dx} + \sigma \\ \frac{v_1^2}{2} + \varepsilon_1 + \frac{P_1}{\rho_1} - \left( \frac{4}{3} \eta + \xi \right) v_1 \frac{dv_1^2}{dx} - \chi \frac{dT_1}{dx} = \frac{v_2^2}{2} + \varepsilon_2 + \frac{P_2 + \sigma}{\rho_2} - \left( \frac{4}{3} \eta + \xi \right) v_2 \frac{dv_2^2}{dx} - \chi \frac{dT_2}{dx} \\ \left( P_1 + \frac{a}{V^2} \right) \cdot (V - b) - R \cdot T_1 = \left( P_2 + \sigma + \frac{a}{V^2} \right) \cdot (V - b) - R \cdot T_2 \end{array} \right. \quad (1)$$

где индексы 1 – обозначение параметров струи высокого давления при входе в слой загрязнения;

2 – обозначение параметров струи высокого давления при выходе из слоя загрязнения (перед встречей с основным материалом очищаемой поверхности);

$\rho$  – плотность жидкости;

$v$  – скорость струи;

$P$  – давление жидкости;

$\sigma$  – предел прочности слоя загрязнения на сжатие;

$V$  – объем струи жидкости высокого давления, необходимый для разрушения слоя загрязнения;

$x$  – ось, вдоль которой происходит внутреннее трение потока струи жидкости;

$T$  – температура жидкости;

$\chi$  – коэффициент, определяющий теплопроводность жидкости;

$\eta$  – коэффициент, определяющий вязкость 1<sup>го</sup> рода;

$\xi$  – коэффициент, определяющий вязкость 2<sup>го</sup> рода;

$\varepsilon$  – внутренняя энергия единица массы жидкости струи высокого давления;

$a, b$  – константы.

Для решения системы уравнений (1) необходимо применение достаточно громоздкого и сложного математического аппарата. Для упрощения задачи введем следующие допущения, значительно облегчающие решение системы:

– жидкость струи является идеальной, т. е. лишена вязкости;

– вектор скорости струи  $\vec{V}$  направлен по нормали к очищаемой поверхности;

– динамическое давление струи высокого давления при входе в материал загрязнения равно динамическому давлению струи на выходе из сопла;

– разрушение происходит, если среднее динамическое давление струи высокого давления превышает предел прочности материала загрязнения при его сжатии;

– уравнение состояния идеальной жидкости при сверхзвуковом истечении описывается уравнением состояния политропного газа, у которого теплоемкость постоянна.

При этом непрерывность потока струи при прохождении слоя загрязнения определяется уравнением:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2, \quad (2)$$

Поток импульса струи при наличии сопротивления материала равен:

$$P + \rho v^2 + \frac{\sigma \cdot \varphi(x)}{h}, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина загрязнения;

$\sigma$  – предел прочности материала загрязнения при сжатии ( $\sigma = \sigma_{сж}$ );

$\varphi(x)$  – возрастающая функция переменной  $x$ ,  $0 \leq x \leq h$ ;  $\varphi(0) = 0$ ;  $\varphi(h) = h$ .

Тогда условие непрерывности потока импульса приводит к уравнениям:

$$P_1 + \rho_1 v_1^2 = P_2 + \rho_2 v_2^2 + \sigma, \quad (4)$$

Поток энергии при отсутствии сопротивления движению жидкости равен [2]:

$$\rho v \left( \frac{V^2}{2} + \omega \right) = \rho v \left( \frac{V^2}{2} + \varepsilon \right) + PV, \quad (5)$$

где  $\omega = \varepsilon + \frac{m}{\rho}$  – тепловая функция единицы массы;

$\varepsilon$  – внутренняя энергия единицы массы жидкости.

При наличии сопротивления жидкости возникающее дополнительное давление сопротивления материала приводит к следующему выражению для потока энергии:

$$\rho v \left( \frac{V^2}{2} + \varepsilon \right) + \rho v \left( \frac{m}{\rho} + \frac{\sigma \cdot \varphi(x)}{\rho \cdot h} \right). \quad (6)$$

Учитывая непрерывность потока вещества, задаваемую уравнением (2), получим:

$$\frac{V_1^2}{2} + \varepsilon_1 + \frac{m_1}{\rho_1} = \frac{V_2^2}{2} + \varepsilon_2 + \frac{m_2 + \sigma}{\rho_2}. \quad (7)$$

Пусть уравнение состояния идеальной жидкости при сверхзвуковом истечении описывается уравнением состояния политропного газа, у которого теплоемкость постоянна. Тогда справедливы следующие соотношения:

$$P = \alpha \cdot \rho \cdot T, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – некоторый коэффициент пропорциональности;

$$\varepsilon = C \cdot T, \quad (9)$$

где  $C$  – теплоемкость рассматриваемой жидкости.

Используя соотношение (8) для вывода тепловой функции, получим:

$$\omega = \varepsilon + \frac{m}{\rho} = C \cdot T + \alpha \cdot T = (C + \alpha) \cdot T. \quad (10)$$

Пусть  $j = \rho_1 \cdot v_1$ , тогда  $V_1 = \frac{j}{\rho_1}$ ;  $V_2 = \frac{j}{\rho_2}$ . Подставляя эти соотношения в (4), получим:

$$P_1 + \frac{j^2}{\rho_1} = P_2 + \frac{j^2}{\rho_2} + \sigma.$$

Отсюда имеем:

$$j^2 = \frac{(P_2 - P_1 + \sigma)}{\left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right)}. \quad (11)$$

Далее уравнение (7) запишем в виде:

$$\varepsilon_1 + \frac{m_1}{\rho_1} + \frac{j^2}{2\rho_1^2} = \varepsilon_2 + \frac{m_2 + \sigma}{\rho_2} + \frac{j^2}{2\rho_2^2}. \quad (12)$$

Проведя ряд математических решений и преобразований, имеем: для скорости  $V_1$ :

$$V_1^2 = j^2 \cdot \frac{1}{\rho_1^2} = \frac{\left(\frac{C}{\alpha} + \frac{1}{2}\right) \cdot P_2 + \frac{P_1}{2} + \frac{\sigma}{2}}{\frac{C}{\alpha} \cdot (P_2 - P_1) \cdot \rho_1} \cdot (P_2 - P_1 + \sigma) \quad (13)$$

для скорости  $V_2$ :

$$V_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot V_1 \quad (14)$$

Формулы (13) - (14) позволяют определить скорость распространения ударной волны в зависимости от скачка давления.

Для определения скорости звука в струе жидкости имеем соотношение [15]:

$$c^2 = \left(\frac{\delta P}{\delta \rho}\right)_s = \frac{C_p}{C_v} \cdot \left(\frac{\delta P}{\delta \rho}\right)_T, \quad (15)$$

где  $C_p, C_v$  – теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно;

$\left(\frac{\delta P}{\delta \rho}\right)_T$  – частная производная при постоянной температуре.

Используя уравнение (2.8), получим выражение для скорости звука в струе:

$$c^2 = \frac{C_p}{C_v} \cdot \alpha \cdot T = \frac{P}{\rho} \quad (16)$$

Из (2.19) следует, что

$$C_1 = \frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{P_1}{\rho_1}; \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{P_2}{\rho_2}.$$

Определим числа Маха перед ударной волной и после нее:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{V_1}{C_1} = \frac{C_v \cdot V_1}{C_p \cdot P_1} \cdot \rho_1 \\ M_2 &= \frac{V_2}{C_{2i}} = \frac{C_v \cdot V_2}{C_p \cdot P_2} \cdot \rho_2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Из решения уравнения (13) получаем давление  $P_2$  как функцию известных параметров набегающего потока  $P_1, \rho_1, v_1$ , т. е.  $P_2 = \varphi_1(P_1, \rho_1, v_1)$ .

Используя уравнение (11), получаем плотность  $\rho_2 = \varphi_2(P_1, \rho_1, v_1)$ .

Уравнение (8) или уравнение (12) позволяют определить температуру  $T_2 = \varphi_3(P_1, \rho_1, v_1)$ , а уравнение (14) - скорость  $V_2 = \varphi_4(P_1, \rho_1, v_1)$ .

Используя формулы (18), можно получить зависимость величин  $P_2, \rho_2, T_2, V_2$  от числа Маха набегающего потока. Для более наглядного представления процесса очистки струей жидкости высокого давления рассмотрим схему, представленную на рисунке 2.

Важными технологическими параметрами очистки поверхности от твердых загрязнений, которые определяют качество и производительность процесса, являются сила и температура воздействия струи на загрязнение. Необходимо получить такие параметры струи, при которой она обеспечивала бы разрушение материала загрязнения, не разрушая при этом основной материал очищаемой поверхности.

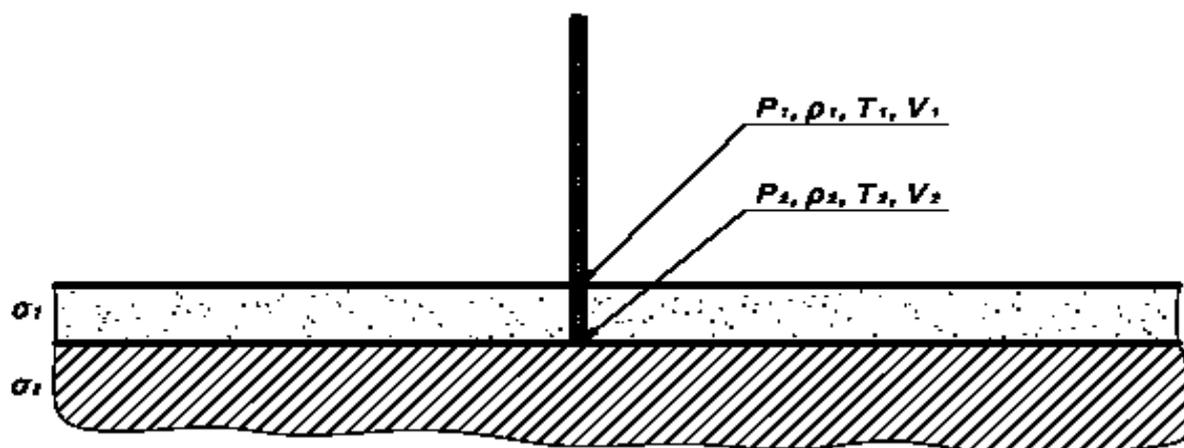


Рисунок 2 – Схема к определению параметров жидкостной струи при разрушении загрязнений

Данный расчет температуры и давления струи при прохождении слоя материала загрязнения позволяет оценить эти важные технологические параметры.

В результате теоретических исследований получена математическая модель процесса гидроструйной очистки, позволяющая оптимизировать параметры  $P, \rho, V, T$  в зависимости от начальных характеристик струи и предела прочности материала загрязнения на сжатие  $\sigma_{сж}$ , определяемого эмпирически.

Зная величины  $V_1, V_2$ , можно рассчитать время  $\tau$  прохождения сверхзвуковой струи жидкости через слой загрязнения по формуле:

$$\tau = \frac{2 \cdot h}{(V_1 + V_2)}, \quad (19)$$

где  $h$  – толщина слоя загрязнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование процесса очистки водяной струей высокого давления позволяет научно обоснованно назначать технологические параметры обработки поверхностей с различной степенью загрязнений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов, Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, А.Ф. Тельнов. – М.: Машиностроение, 1982. – 261 с.
2. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика, Т.7. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 733 с.

### Бурнашов Михаил Анатольевич

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

Доктор технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел. 8 (4862) 54-15-03

### Усмонов Саймурод Дустмуродович

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел

Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел. 8 (4862) 54-15-03

## MATHEMATICAL FORMULATION OF SURFACE CLEANING EFFECTIVENESS WITH WATER JET

*The simulator of a contact interaction of water jet and a work surface during its purification allowing setting soundly processing parameters characterizing procedure effectiveness is presented.*

**Key words:** *contact interaction, simulator, effectiveness is presented.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Kozlov, Ju.S. Ochistka izdelij v mashinostroenii / Ju.S. Kozlov, O.K. Kuznecov, A.F. Tel'nov. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 261 s.
2. Landau, L.D. Teoreticheskaja fizika, T.7. Gidrodinamika / L.D. Landau, E.M. Lifshic. – M.: Nauka, 1988. – 733 s.

#### **Burnashov Mihail Anatolievich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Doctor of technical science, associate professor of department “Mechanical engineering technology and structural technological informatics”

Tel. 8 (4862) 54-15-03

#### **Usmonov Saymurod Dustmurodovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department „ Mechanical engineering technology and structural technological informatics “

Tel. 8 (4862) 54-15-03

А.С. ТАРАПАНОВ, Р.В. АНИСИМОВ

## ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЗУБОДОЛБЛЕНИИ КОЛЕС С ВНУТРЕННИМИ ЗУБЬЯМИ НЕЭВОЛЬВЕНТНОГО ПРОФИЛЯ

*В статье на основе математического анализа схем резания и толщин срезаемого слоя при зубодолблении колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля разработана и испытана конструкция приспособления, позволяющего моделировать конфигурацию срезаемых слоев металла, оказывающих существенное влияние на износ режущих лезвий долбяков.*

**Ключевые слова:** износ, зубодолбление, неэвольвентный профиль.

Износ режущего инструмента, возникающий при обработке зубчатых колес с внутренними зубьями, является одним из основных факторов, препятствующих повышению режимов резания и ограничивающих производительность станков. Износ инструментов работающих по методу обката, являясь весьма сложным физическим процессом, возникает в результате перемещения стружки и обработанной поверхности детали относительно рабочих поверхностей инструмента в условиях и повышенных температур и больших давлений.

При обработке зубчатого венца колес с внутренними зубьями режущие лезвия долбяка изнашиваются неравномерно. Наибольший износ наблюдается на вершинной части выходного режущего лезвия. Автор в работе [1], исследуя обработку зубодолблением эвольвентных зубчатых колес, объясняет это тем, что при каждом резе возле вершины выходной кромки образуется зазор. Стружка, смещающаяся вдоль левого режущего лезвия (рисунок 1) встречает на своем пути стружку, срезаемую его активной частью. Дополнительно деформируясь, она попадает в образовавшийся зазор. В результате попадания и заклинивания стружки в зазоре, возникающем между режущими лезвиями инструмента и номинальной поверхностью обрабатываемой детали, возникает повышенное трение по задней поверхности, и появляются налипы, оставленные элементами стружки. В результате увеличивается абразивный износ инструмента и образуется локальный износ. На передней поверхности появляется лунка, образование которой связано с протаскиванием оторвавшегося элемента стружки через зазор между режущим лезвием и обрабатываемой поверхностью.

В настоящее время существует несколько неэвольвентных профилей зуба колес с внутренними зубьями, наиболее часто используемых в конструкциях машиностроительных изделий - это треугольный, прямоугольный и трапециевидный, циклоидальный и цевочный. Конфигурация режущих лезвий инструмента может оказать существенное влияние на его изнашивание, т.к. обработка каждого из них обладает своими особенностями схода стружки и образования зазоров между инструментом и номинальной обрабатываемой поверхностью заготовки. На основе математической модели, представленной в работе [2], были построены графики (рисунок 3,5,7) изменения толщины срезаемого слоя для точек входных и выходных лезвий зуба долбяка, при обработке зубодолблением зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля.

Исходными данными являлись число зубьев долбяка и нарезаемого колеса  $z_0=18$ ,  $z_1=24$ , диаметр основной окружности колеса  $d_u=67,5$  мм, круговая подача  $S_{кр}=0,44$  мм/дв.ход.

При исследовании схемы резания инструментом в конфигурации которого преобладают плавные кривые (инструмент для нарезания циклоидального и цевочного профиля зуба) были выделены точки А, В, и D которые характеризуются наибольшей нагруженностью и точка С, которая находится в зоне наиболее вероятного появления зазоров (рис. 2).

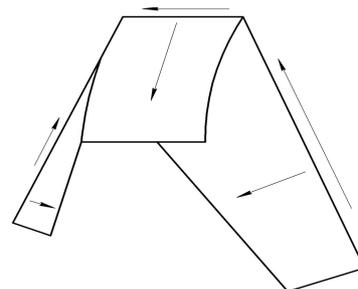


Рисунок 1 – Схема образования стружки

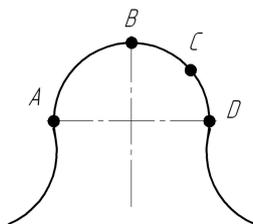


Рисунок 2 – Точки режущих лезвий долбяка при нарезания внутренних зубьев циклоидального профиля, для которых рассчитывались срезаемые толщины

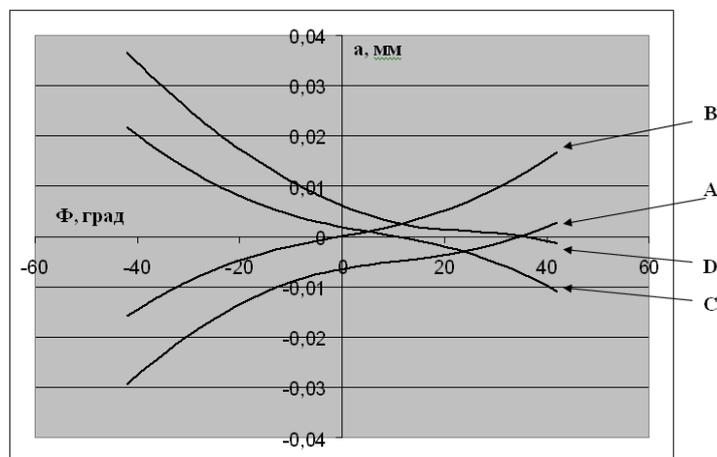


Рисунок 3 – График изменения толщины срезаемого слоя металла для точек режущих лезвий долбяка с циклоидальным профилем зуба

На рисунке 3 представлен график изменения срезаемых толщин точками **A**, **B**, **C**, **D**. Из графика видно, что во время начала обработки впадины колеса с внутренними зубьями циклоидального профиля работают точки **A** и **B**. Толщины металла срезаемые этими точками колеблются в интервале 0,002 мм до 0,016 мм. В точке **C** и **D** образуются зазоры во время начала обработки, но величина этих зазоров мала по сравнению со срезаемыми слоями металла и колеблется в интервале от 0,0012 мм до 0,0109 мм. На выходе инструмента выходными лезвиями, которым принадлежат точки **D** и **C** срезаются толщины металла равные соответственно 0,036 мм и 0,022 мм, а точками **A** и **B** – 0,0028 мм и 0,0167 мм соответственно, что говорит о нагруженности выходных лезвий долбяка более чем в 2 раза, по сравнению со входными. Это тоже является одним из факторов неравномерности износа режущих кромок инструмента.

При анализе семы резания зубчатых колес с внутренними зубьями трапецевидного профиля также были выделены точки **A**, **B** и **D**, которые характеризуются наиболее высокой нагруженностью (рис. 4) и точка **C**, которая находится в зоне возникновения наибольших зазоров.

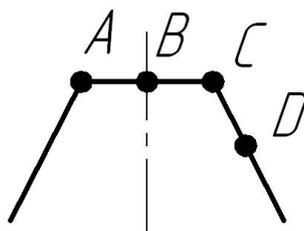


Рисунок 4 – Точки режущих лезвий долбяка при нарезания внутренних зубьев трапецевидного профиля, для которых рассчитывались срезаемые толщины

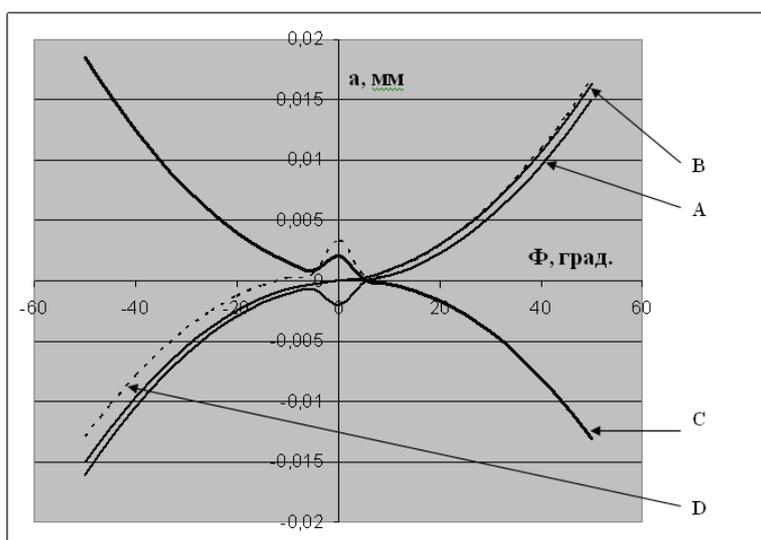


Рисунок 5 – График изменения толщины срезаемого слоя металла для точек режущих лезвий долбяка нарезающего зубчатые колеса с внутренними зубьями трапецевидного профиля

На графике (рис. 5) видно, что во время начала обработки впадины зуба колеса работают точки **A**, **B** и **D**. Причем толщины металла, срезаемые этими точками при различных резах, колеблются от 0,0004 мм до 0,0163 мм. Также мы видим, что в момент когда зуб долбяка находится во впадине колеса ( $\Phi=0^0$ ) нагрузка на выходные лезвия вырастает так как возрастают срезаемые толщины для точки **C** с 0,00008 мм до 0,002 мм, для **D** - с 0,0003 мм до 0,003 мм. При дальнейших резах в обработке участвует только точка **C** и толщины срезаемые этой точкой возрастают. Все это говорит о том, что зуб режущего инструмента нагружен неравномерно. На графике (рисунке 5) также видно, что во время обработки при работе точки **C** образуются зазоры величиной от 0,0002 мм до 0,013 мм.

При исследовании схемы резания зубчатых колес с внутренними зубьями треугольного были выделены (рис. 6) точки **A** и **C**, которые находятся в зоне наиболее высокой нагруженности и точка **B**, в которой наиболее вероятно появление зазоров.

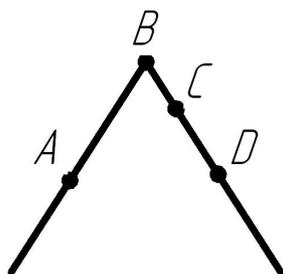


Рисунок 6 – Точки режущих лезвий долбяка при нарезания внутренних зубьев треугольного профиля, для которых рассчитывались срезаемые толщины

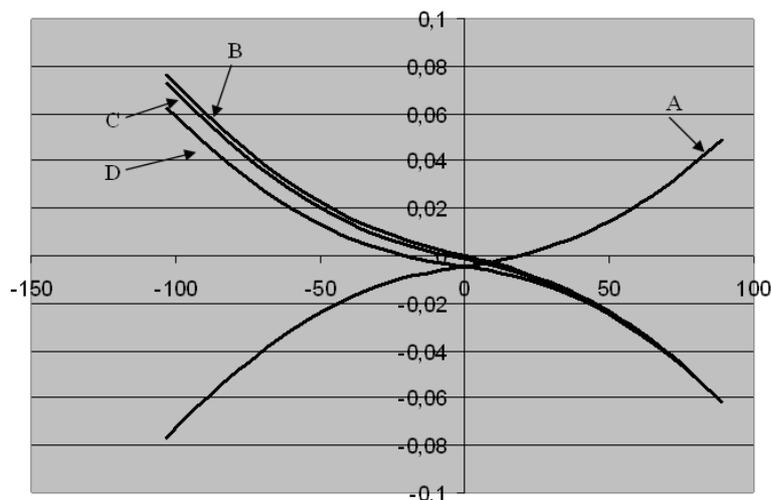


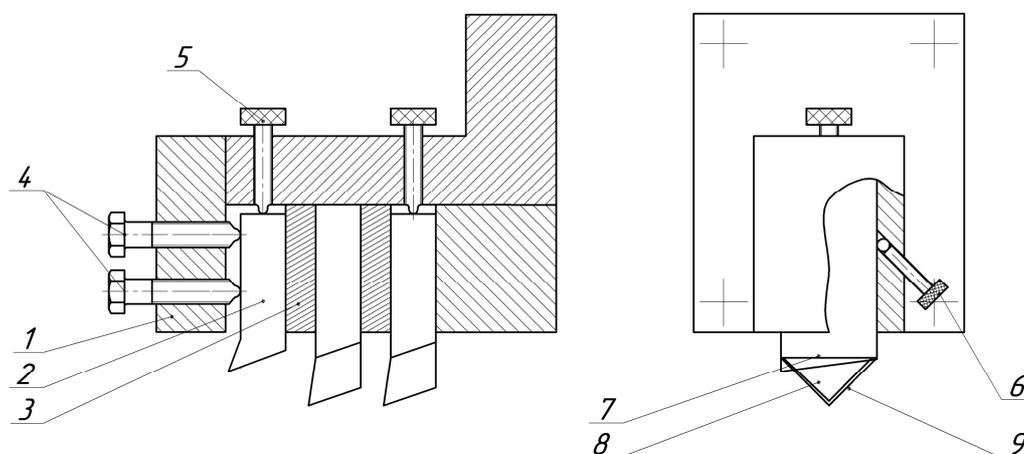
Рисунок 7 – График изменения толщины срезаемого слоя металла для точек режущих лезвий долбяка нарезающего зубчатые колеса с внутренними зубьями треугольного профиля

На графике (рис. 7) видно что во время начала обработки впадины зуба работает входное режущее лезвие зуба долбяка, а в частности точка **A** ( $\Phi= 100^0 \dots 0^0$ ). Причем срезаемые толщины металла в 1,5- 4 раза больше, чем в случаях обработки циклоидального

и трапециевидного профилей, и составляют до 0,06 мм. Толщины металла, срезаемые вершиной (точка **В**) и выходным лезвием (точка **С** и **Д**)- 0,076 мм и 0,072 мм соответственно, что примерно в 1,3 раза превышают толщины, срезаемые входным лезвием (точка **А**). Режущие лезвия долбяка для нарезания колес с внутренними зубьями треугольного профиля испытывают большую нагрузку по сравнению с режущими лезвиями инструмента для нарезания циклоидального и трапециевидного профиля. При этом данная нагрузка распределена неравномерно. На графике (рис. 7) также можно видеть, что при нарезании треугольно профиля при работе входного лезвия (точка **А**) между выходным режущим лезвием (точки **В**, **С** и **Д**) образуются зазоры величиной до 0,062 мм.

Для исследования износа зубодолбежного инструмента, работающего по методу обката, использовался метод, позволяющий выявить основные причины износа долбяков с неэвольвентными зубьями. В основе метода – инструмент, осуществляющий физическое моделирование режущих лезвий зуба возникающих при зубодолблении. Данный инструмент позволяет моделировать процесс нарезания впадины колеса с внутренними зубьями любого неэвольвентного профиля.

Моделирование производилось на поперечно-строгальном станке ГД-320, что позволяет сохранить такие специфические для процесса зубодолбления элементы, как прерывистость и начальное ударное воздействие инструмента на заготовку. Воспроизводилась обработка зубчатого колеса с внутренними зубьями треугольного профиля (имеющего по опыту эксплуатации наименьшую стойкость из ранее приведенных) из стали 45 ГОСТ 1050-88, с числом зубьев  $z_1 = 30$  и шириной  $b = 70$  мм, при скорости резания  $V_{рез} = 38$  м/мин. Шероховатость задней и передней поверхностей резцов соответствовала  $Ra 0,32$ . Большое влияние на стойкость долбяка для нарезания треугольного профиля оказывает радиус закругления при вершине зуба. Он выбирается минимальным, что обуславливается конструкцией детали. В нашем случае он составлял 0,3 мм.



**Рисунок 8 – Конструкция приспособления**

Взаимное расположение режущих лезвий зуба инструмента в процессе резания воспроизводится с помощью резцов из стали Р6М5, HRCэ 62 – 64, установленных в головке (рис. 8). Резцы изготовлены из одного предварительно термообработанного прутка с последующей проверкой твердости режущей части. Приспособление (рис. 8) состоит из корпуса 1 в котором закреплены резцы 2 и проставки 3 между ними. Точность расположения режущих лезвий относительно оси головки достигается перемещением резцов с помощью винтов 5 и 6 в нужном направлении. Закрепление резцов в корпусе производится винтом 4. Моделирование процесса резания производится тремя резцами.

Сопоставлялся износ резцов, работающих по трем схемам резания (рис. 9). Обработка по схеме I производится при свободном резании. Толщина слоя  $a_d$ , срезаемая резцом, соответствует толщине слоя срезаемой выходным режущим лезвием долбяка. При обработке по схеме II режущие лезвия работают в режиме несвободного резания. По этой схеме резания

толщина срезаемого слоя устанавливается соответственно каждому режущему лезвию доляка. Различное распределение толщин по отдельным режущим лезвиям резца достигается за счет определенного угла наклона режущих лезвий относительно подачи вглубь заготовки. Резание по схеме III отличается наличием зазора  $v_3$ , создаваемого в вершинной части левого режущего лезвия резца дополнительным резцом, устанавливаемым в приспособлении. Ширина зазора  $v_3$  выбирается в соответствии с принятым положением зуба долбяка.

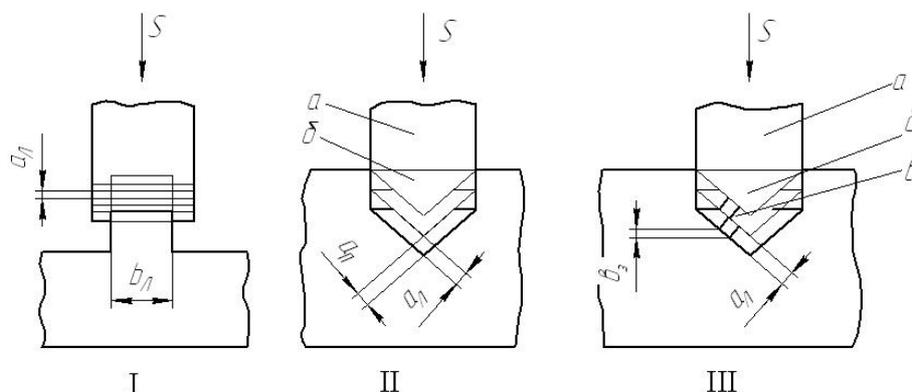


Рисунок 9 – Схемы резания

На графике (рис. 10) представлены кривые износа резца в зависимости от N- количества проделанных резов.

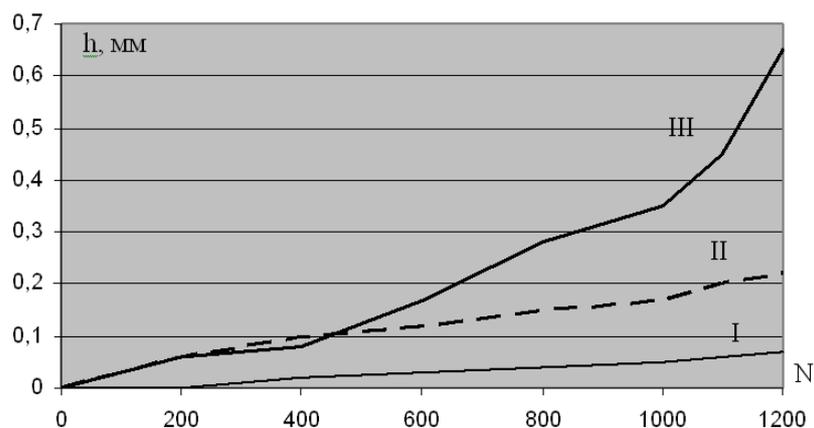


Рисунок 10 – Износ резца по схеме I и левого режущего лезвия по схемам II и III

Из графика видно, что износ резца работающего по схеме I незначителен по величине. Износ левого режущего лезвия резца, работающего по схеме II, значительно выше. Наибольший износ по левому режущему лезвию за равное время работы получил резец, работающий по схеме III. Причину повышенного износа можно объяснить наличием зазора, создаваемого дополнительным резцом. В результате чего стружка, смещающаяся вдоль левого режущего лезвия, встречала на своем пути стружку, срезаемую активной частью. Дополнительно деформируясь, она попадала в зазор между режущим лезвием инструмента и номинальной поверхностью обрабатываемой заготовки, вызывая повышенное трение по задней поверхности и возрастание абразивного износа.

Результаты моделирования показывают, что незвольентные профили долбяков могут изнашиваться по тем же причинам, что и эвольвентные. Вместе с тем для треугольных и трапециевидных профилей зона возникновения зазора у верхней части выходного режущего лезвия может быть больше при прочих равных условиях, что может привести к более интенсивному износу долбяков.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дерли, А.Н. Повышение эффективности зубодолбления [Текст] / А.Н. Дерли, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – Орел: ОрелГТУ, 2008. – 152 с.
2. Анисимов, Р.В. Математическое отображение схем резания и определение толщины срезаемого слоя при обработке неэвольвентных профилей зубчатых колес с внутренними зубьями / Р.В. Анисимов, С.И. Мионов // Фундаментальный и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №2/3(280). – С.16-21.

**Тарапанов Александр Сергеевич**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор  
Тел. 48-18-84  
E-mail: tarapanov@yandex.ru

**Анисимов Роман Викторович**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Аспирант  
Тел. 48-18-84  
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

---

A.S. TARAPANOV, R.V. ANISIMOV

**FEATURES OF TOOL DETERIORATION AT GEAR SHAPING COG-  
WHEELS WITH INTERNAL TEETH OF NON-INVOLUTE PROFILE**

*In the paper on the basis of mathematical analysis of cutting patterns and section thickness during gear shaping of cog-wheels with internal teeth of non-involute shape there was developed and tested the structure of a device allowing modeling a configuration of metal layers to be cut off and having an influence upon cutting edge wear of shaping cutters.*

**Key words:** wear, gear shaping, non- involute profile.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Derli, A.N. Povyshenie jeffektivnosti zubodolblenija [Tekst] / A.N. Derli, A.S. Tarapanov, G.A. Harlamov. – Орел: ОрелГТУ, 2008. – 152 с.
2. Anisimov, R.V. Matematicheskoe otobrazhenie shem rezanija i opredelenie tolwiny srezaemogo sloja pri obrabotke nejevol'ventnyh profilej zubchatyh koles s vnutrennimi zub'jami / R.V. Anisimov, S.I. Miro-nov // Fundamental'nyj i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – №2/3(280). – S.16-21.

**Tarapanov Aleksandr Sergeevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Doctor of technical science, professor  
Tel.: 4862-48-18-84  
E-mail: tarapanov@yandex.ru

**Anisimov Roman Vicktorovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Post-graduate student  
Tel.: 4862-48-18-84  
E-mail: roman.anisimov@bk.ru

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

УДК 687.022

Н.А. ДЕМИДОВА, Е.Л. МОСЬКИНА, С.А. ФОМИНА, Г.Д. ГУЩИНА

## **ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ НА РАБОТНИКОВ РАСКРОЙНОГО ЦЕХА В ПРОЦЕССЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ШВЕЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ЕЕ ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ**

*Снижение резонансных явлений, возникающих при раскрое текстильных полотен, влияющих на кисти рук и предплечье, вызывая болезненные ощущения.*

**Ключевые слова:** локальная вибрация, гигиеническое нормирование.

К локальной вибрации принято относить вибрацию, которая воздействует на человека через руки или отдельные участки его тела. В процессе работы с виброактивными ручными машинами полоса частот локальной вибрации составляет примерно 2...1000 Гц [1], [5].

Низкочастотная локальная вибрация может передаваться через руки на туловище (в особенности, если руки напряжены) и вызвать эффекты общего характера типа головной боли, тошноты и т.п. Локальная вибрация на высоких частотах оказывает негативное воздействие на процесс кровообращения в пальцах рук и на нервные окончания [14]. Как следствие это вызывает потерю чувствительности пальцев, онемение, ощущение покалывания. При длительном воздействии локальной вибрации возникают патологические изменения и проявляются симптомы так называемой вибрационной болезни.

При анализе локальной вибрации в системе «человек - машина» важно учитывать собственные частоты колебаний отдельных частей тела человека [8], [9], [12], [13]. Совпадение частоты возбуждения системы с ее собственной частотой колебаний приводит к проявлению резонансных явлений, при которых амплитуда колебаний резко возрастает. Входящие в резонанс кисти и предплечье рук нередко вызывают болезненные ощущения, связанные, в частности, с растягиванием соединительных образований, поддерживающих их вибрацию. В зависимости от изменений напряжения мышц резонансы сомкнутой кисти, предплечья и плечевого пояса проявляются, соответственно, на частотах 50...200 Гц, 16...30 Гц и 4...5 Гц [1], [7].

Нормирование вибрационных нагрузок на операторов ручных машин имеет первостепенное значение для улучшения условий труда и профилактики вибрационной болезни. Разработка нормативных актов имеет важное гуманитарное, социальное и экономическое значение. Однако их разработка является исключительно сложным делом, поскольку невозможно проводить на людях эксперименты, опасные для их здоровья, и трудно учесть множество критериев, которые могут и должны быть использованы для оценки вредного действия вибрации. Это порождает известные различия: международный стандарт (ИСО 2631-1986 [2], [4]) ориентируется, прежде всего, на данные биомеханических исследований и субъективное восприятие переносимости вибрации; отечественные нормы (ГОСТ 12.1.012-90 [10] и др.) в большей степени учитывают результаты гигиенических исследований.

В стандартах отдельно регламентируются требования к общей и локальной вибрации. В качестве показателей вибрационной нагрузки на оператора используют следующие параметры: виброскорость (которая непосредственно связана с колебательной энергией, передаваемой телу человека) или виброускорение (которое легче регистрировать); диапазон частот; время действия вибрации.

При оценке вибрационной нагрузки на оператора предпочтительным параметром является виброускорение. Причем для санитарного нормирования и контроля используются

средние квадратические значения виброускорений  $a$  ( $\text{м/с}^2$ ) или их логарифмические уровни в децибелах (дБ).

Среднее квадратическое значение виброускорения определяется по формуле:

$$a = \sqrt{(1/T) \cdot \int_0^T \ddot{x}^2 dt},$$

где  $T$  – время усреднения;

$\ddot{x}$  – ускорение колебательного процесса.

Если представить колебательный процесс в виде ряда Фурье, то среднее квадратическое значение виброускорения можно определить также по формуле:

$$a = \sqrt{0,5 \sum_{i=1}^{\infty} A_i^2},$$

где  $A_i$  – амплитуда  $i$  гармоник спектрального разложения искомого ускорения  $\ddot{x}$ .

Уровень виброускорений определяют по формуле:

$$L = 20 \lg \frac{a}{a_0},$$

где  $a_0$  – стандартизованное в международном масштабе пороговое значение виброускорения, равное  $10^{-6} \text{ м/с}^2$ .

Как уже отмечалось, интенсивность вибрационных воздействий на человека зависит от частоты. Поэтому диапазон частот принято разбивать на полосы и вычислять уровни вибрации для каждой полосы в отдельности. Используют октавные полосы частот, у которых верхняя граничная частота  $f_u^n$  вдвое больше нижней  $f_d^n$  (где  $n$  – номер полосы), и третьоктавные полосы частот, у которых отношение  $f_u^n / f_d^n$  равно  $\sqrt[3]{2}$ . Соответствующие полосы характеризуются значениями среднегеометрических частот. Среднегеометрические частоты октавных полос частот, которые определяются по формуле:  $f_n = \sqrt{f_d^n \cdot f_u^n}$ , стандартизованы и составляют: 1, 2, 4, 16, 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000 Гц. Аналогично для третьоктавных полос частот имеем: 0,8, 1,0, 1,25, 1,6, 2,0, 2,5, 3,15, 4,0, 5,0, 6,3, 8,0, 10,0, 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, Гц.

Средние квадратические значения виброускорения, отнесенные к  $n$ -ой полосе частот, определяются по формуле:

$$a_n = \sqrt{0,5 \sum_i A_i^2},$$

где номера гармоник ( $i = 1, 2, \dots$ ) берутся из диапазона  $i \in [T \cdot f_d^n \dots T \cdot f_u^n]$ .

Соответствующие логарифмические уровни виброускорений определяется по формуле:

$$L_n = 20 \lg \frac{a_n}{a_0}.$$

При виброизмерениях выделение из спектра виброускорения тех составляющих, которые принадлежат данной полосе частот, обычно осуществляется автоматически путем введения в измерительную систему полосовых фильтров.

Часто желательно определить взвешенную интегральную оценку вибрационной нагрузки, т.е. выразить интенсивность вибрации одним числом. Так, скорректированное по частоте значение виброускорения  $U$  и его логарифмический уровень  $L_U$ , определяются по формулам:

$$U = \sqrt{\sum_n (a_n \cdot K_n)^2}, \quad L_U = 10 \lg \sum 10^{0,1(L_n + K L_n)},$$

где  $K_n$ ,  $KL_n$  – весовые коэффициенты для среднего квадратического значения виброускорения и его логарифмического уровня в  $n$ -ой частотной полосе.

Санитарные нормы спектральных показателей вибрационной нагрузки регламентируются для длительности вибрационного воздействия равной 8 часам. При этом различают следующие критерии оценки неблагоприятного воздействия вибрации на человека и соответствующие номера категории вибрации:

1. Критерий «безопасность», обеспечивающий не нарушение здоровья оператора, оцениваемого по объективным показателям с учетом риска возникновения профессиональной болезни и патологии, а также исключаяющей возможность возникновения травмоопасных или аварийных ситуаций из-за воздействия вибрации;

2. Критерий «граница снижения производительности труда», обеспечивающий поддержание нормативной производительности труда оператора, не снижающейся из-за развития усталости под воздействием вибрации;

3. Критерий «комфорт», обеспечивающий оператору ощущение комфортности условий труда при полном отсутствии мешающего действия вибрации.

В таблице 1 приведены санитарные нормы спектральных показателей локальной вибрации, соответствующие критерию «безопасность».

Таблица 1 – Нормы локальной вибрации в октавных полосах частот

Нормируемый параметр	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц						
	8	16	31,5	63	125	250	500
Виброскорость, м/с	2,8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Логарифмический уровень, дБ	115	109	109	109	109	109	109
Виброускорение, м/с <sup>2</sup>	1,4	1,4	2,7	5,4	10,7	21,3	42,5
Логарифмический уровень, дБ	123	123	129	135	141	147	153

Важно подчеркнуть, что нормативные значения локальной вибрации, приведенные в таблице 1, отражают не только восприимчивость человека к воздействию вибрации, но и, в определенной мере, современное состояние вибрационной техники. Действительно, если удастся резко снизить виброактивность ручных машин, то это неизбежно приведет к пересмотру действующих норм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аруин, А.С. Эргономическая биомеханика / А.С. Аруин, В.М. Зациорский. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
2. А.с. 835736. Устройство для резки волокнистого материала / В.Ф. Абрамов, В.Н. Соколов, А.И. Комисаров, В.В. Карамышкин и др. // Бюл. изобр. – 1981. – № 21.
3. Баранова, В.М. О распространенности гипертонической болезни у рабочих, подвергающихся комбинированному воздействию вибрации и шума / В.М. Баранова, Ю.В. Зерцалов. – В кн.: Влияние вибраций на организм человека. М.: Наука, 1977. – С. 291-293.
4. Вибрации в технике: Справочник. Т.6. Защита от вибрации и ударов / Под ред. акад. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
5. Диментберг, Ф.М. Вибрация в технике и человек / Ф.М. Диментберг, К.В. Фролов. – М.: Знание, 1987. – 160 с.
6. Каспаров, А.А. Гигиена труда и промышленная санитария / А.А. Каспаров. – М.: Медицина, 1981. – 368 с.
7. Комкин, А.И. Вибрация. Воздействие, нормирование, защита (школа БЖД) / А.И. Комкин // Безопасность жизнедеятельности (приложение к журналу), 2004. – №5. – С.16

8. Пановко, Г.Я. Дискретная колебательная модель тела человека и определение ее параметров / Г.Я. Пановко, Б.Г. Трактюченко // *Машиноведение*. – 1974. – №4. – С. 16-20.
9. Потемкин, Б.А. Синтез оптимальной виброзащитной системы при случайных воздействиях с учетом динамических свойств тела человека / Б.А. Потемкин, Ю.Г. Сафронов, А.В. Синева, К.В. Фролов // *Виброзащита человека-оператора и вопросы моделирования*. – М.: Наука, 1973. – С. 53-63.
10. Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.1.012-90. – М.: Стандарт, 1990. – 46 с.
11. Суворов, Г.А. Гигиеническое нормирование производственных шумов и вибрации / Г.А. Суворов, Л.Н. Шаринов, Э.И. Денисов. – М.: Медицина, 1984. – 240 с.
12. Фролов, К.В. Прикладная теория виброзащитных систем / К.В. Фролов, Ф.А. Фурман. – М.: Машиностроение, 1980. – 276 с.
13. Хвингия, М.В. Колебания мышцы и динамика системы «человек – машина» / М.В. Хвингия, Т.Г. Татишвили, А.М. Багдоева, Г.Г. Цулая. – Тбилиси. – Мецниереба, 1984. – 88 с.
14. Шинев, В.Г. Охлаждение рук как фактор, усугубляющий неблагоприятное влияние локальной вибрации / В.Г. Шинев, Л.М. Комлева, А.В. Федоров // *Медицина труда и промышленной экологии*. – 1994. – №9. – С. 40-43.

**Демидова Наталья Александровна**

ФГОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

**Москина Елена Леонидовна**

ФГОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: elenamosk196110@mail.ru

**Фомина Светлана Алексеевна**

ФГОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Старший преподаватель кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

**Гущина Галина Дмитриевна**

ФГОУ ВПО «Государственный университет-УНПК», г. Орел

Старший преподаватель кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

---

N.A. DEMIDOVA, E.L. MOSKINA, S.A. FOMINA, G.D. GUSHCHINA

**LOCAL VIBRATION EFFECT ON CUTTING DEPARTMENT WORKERS  
AT TECHNOLOGICAL PROCESSING GARMENTS AND ITS HYGIENIC  
NORMALIZATION**

*The decrease of resonant phenomena arising at textile linen cutting affecting hands and forearms causing unhealthy symptoms*

**Key words:** local vibration, hygienic normalization.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Aruin, A.S. Jergonomicheskaja biomehanika / A.S. Aruin, V.M. Zaciorskij. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 256 s.
2. A.s. 835736. Ustrojstvo dlja rezki voloknistogo materiala / V.F. Abramov, V.N. Sokolov, A.I. Ko-misarov, V.V. Karamyshkin i dr. // *Bjul. izobr.* – 1981. – № 21.
3. Baranova, V.M. O rasprostranennosti gipertonicheskoj bolezni u rabochih, podvergajuwihsa kombinirovannomu vozdejstviyu vibracii i shuma / V.M. Baranova, Ju.V. Zercalov. – V kn.: *Vlijanie vibracij na organizm cheloveka*. М.: Nauka, 1977. – S. 291-293.

4. Vibracii v tehnike: Spravochnik. T.6. Zawita ot vibracii i udarov / Pod red. akad. K.V. Frolova.– M.: Mashinostroenie, 1981.– 456 s.
5. Dimentberg, F.M. Vibracija v tehnike i chelovek / F.M. Dimentberg, K.V. Frolov. – M.: Znanie, 1987. – 160 s.
6. Kasparov, A.A. Gigiena truda i promyshlennaja sanitarija / A.A. Kasparov. – M.: Medicina, 1981. – 368 s.
7. Komkin, A.I. Vibracija. Vozdejstvie, normirovanie, zawita (shkola BZhD) / A.I. Komkin // Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti (prilozhenie k zhurnalu), 2004. – №5. – S.16
8. Panovko, G.Ja. Diskretnaja kolebatel'naja model' tela cheloveka i opredelenie ee parametrov / G.Ja. Panovko, B.G. Traktovenko // Mashinovedenie. – 1974. – №4. – S. 16-20.
9. Potemkin, B.A. Sintez optimal'noj vibrozawitnoj sistemy pri sluchajnyh vozdejstvijah s uchetom dinamicheskikh svojstv tela cheloveka / B.A. Potemkin, Ju.G. Safronov, A.V. Sinev, K.V. Frolov // Vibrozawita cheloveka-operatora i voprosy modelirovanija. – M.: Nauka, 1973. – S. 53-63.
10. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vibracionnaja bezopasnost'. Obwie trebovanija. GOST 12.1.012-90. – M.: Standart, 1990. – 46 s.
11. Suvorov, G.A. Gigienicheskoe normirovanie proizvodstvennyh shumov i vibracii / G.A. Suvorov, L.N. Sharinov, Je.I. Denisov. – M.: Medicina, 1984. – 240 s.
12. Frolov, K.V. Prikladnaja teorija vibrozawitnyh sistem / K.V. Frolov, F.A. Furman. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 276 s.
13. Hvingija, M.V. Kolebanija myshej i dinamika sistemy «chelovek – mashina» / M.V. Hvingija, T.G. Tashvili, A.M. Bagdoeva, G.G. Culaja. – Tbilisi. – Mecniereba, 1984. – 88 s.
14. Shinev, V.G. Ohlazhdenie ruk kak faktor, usugublajuwij neblagoprijatnoe vlijanie lokal'noj vibracii / V.G. Shinev, L.M. Komleva, A.V. Fedorov // Medicina truda i promyshlennoj jekologii. – 1994. – №9. – S. 40-43.

**Demidova Natalia Aleksandrovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Technology and design of garment”

Tel.: 4862-55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

**Moskina Elena Leonidovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Technology and design of garment”

Tel.: 4862-55-11-20

E-mail: elenamosk196110@mail.ru

**Fomina Svetlana Alekseevna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Senior teacher of department “Technology and design of garment”

Tel.: 4862-55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

**Gushchina Galina Dmitrievna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Senior teacher of department “Technology and design of garment”

Tel.: 4862-55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

УДК 687.016.5:677.55

Т.В. КВАСКОВА, А.А. ОСОКИНА, Е.В. ПРОКОПОВА

## О МОДИФИКАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЯ ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА

*Сокращению сроков разработки конструкторско-технологической документации при проектировании изделий из трикотажных полотен способствует применение базовых конструкций, что обязывает учитывать величины, характеризующие его формовочные свойства.*

**Ключевые слова:** базовая конструкция, типовая фигура, модификация, чертеж, трикотажное полотно, деформация, коэффициент деформации, растяжимость полотна.

Быстротечность моды диктует необходимость резкого сокращения сроков подготовки производства и снижения затрат труда при одновременном повышении конкурентоспособности продукции. Известно, что свойства и качество одежды зависят от следующих факторов: свойства материалов, модели и конструкции, качества изготовления. Выполнение этих условий проблематично, если рассматривать каждую модель одежды как конструкцию, проектируемую и создаваемую заново. Поэтому сокращению сроков разработки конструкторско-технологической документации при проектировании новых изделий из трикотажных полотен способствует применение базовых конструкций.

Процесс проектирования базовых конструкций изделий из трикотажных полотен аналогичен разработке моделей из ткани. Однако, специфические свойства трикотажного полотна, такие как: растяжимость в поперечном и в продольном направлениях, эластичность, усадка, толщина и др. влияют на дифференцированный выбор конструктивных прибавок.

Базовая конструкция отражает типовое положение и форму основных формообразующих элементов. Внедрение раскроя материалов для швейных изделий по лекалам базовых конструкций обеспечивает рост производительности труда на 8-10% за счет сокращения времени на примерку изделия. Экономия времени происходит в основном за счет получения более точного кроя, не требующего дополнительной корректировки. Для разработки конструкций кроеных изделий, из трикотажных полотен, различных силуэтных форм, всех полнотных групп при одном обхвате груди, несомненно, достоинством является использование унифицированных конструкций, исключающих необходимость разработки макетов внешней формы трикотажных изделий.

Все методы, используемые в промышленности для конструирования трикотажных изделий, отличаются друг от друга, главным образом, структурой расчетных формул, способами графических построений и условиями развертывания объемной формы деталей изделия на плоскость. В основе этих методов лежат размерные признаки фигуры человека с учетом размеров и модели готового изделия, припуски на швы, форма и назначение изделия.

Одежда из трикотажа имеет свои особенности конструирования, выраженные уменьшением количества типовых фигур. Конструкцию трикотажных изделий разрабатывают с учетом не только измерений типовых фигур, но и ряда специфических свойств трикотажа, проявляющихся при изготовлении и эксплуатации изделия. К таким свойствам относится, прежде всего, деформация, возникающая при надевании трикотажного изделия на фигуру и при движении человека, вызванная растяжением. Учитывая эти особенности, общий припуск на свободное облегание в трикотажных изделиях выбирается меньше, чем в изделиях из тканей. Толщина полотна также влияет на параметры конструкции изделия. В конструкции изделий из полотен толщиной более 3 мм учитывают припуск на толщину материала, равный утроенной толщине полотна. Если этот припуск не предусмотрен, изделие будет заужено по ширине. Все детали располагают по длине, вдоль петельных столбиков, т.к. трикотажные полотна имеют наименьшее удлинение по длине и наибольшую прочность.

Деформация растяжения трикотажа после снятия нагрузки состоит из упругой, эластической и пластической или остаточной. Доля исчезающей части деформации растяжений трикотажа, так называемая условно-упругая деформация полотен составляет 60-90% от полной деформации для большинства видов трикотажных полотен. Это главная характеристика способности сохранения размеров и формы деталей при носке. Искажает форму в процессе носки неисчезающая часть деформации или условно-остаточная деформация, которая состоит из двух видов деформации: эластической с большим периодом релаксации и пластической.

На основании результатов исследования деформации трикотажных полотен было установлено, что при расчете размеров деталей изделий надо учитывать не полную деформацию растяжения трикотажного полотна, а условно-остаточную, приводящую к искажению формы изделия во время эксплуатации. Установлено, что наибольшая ее величина составляет 6% в изделиях свободной формы, которую и учитывают при конструировании изделий. Все припуски в конструкции трикотажного изделия устанавливаются с учетом степени растяжимости полотна, его способности накапливать остаточные деформации. Степень и характер растяжимости полотна зависит как от вида переплетения так и от вида пряжи, из которого вывязано данное полотно. Поэтому в каждом конкретном случае рекомендовано проводить физико-механические исследования полотна, с целью определения группы деформации.

При конструировании верхних трикотажных изделий массового производства используют заужение проектируемой ширины изделия на величину условно-остаточной деформации полотна. Для упрощения расчетов по определению нужных размеров проектируемых деталей из трикотажного полотна введено понятие коэффициента условно-остаточной деформации полотна  $K_{о.д.}$ , показывающий, на какую часть необходимо уменьшить ширину изделия с учетом условно-остаточной деформации полотна. Рассчитывается коэффициент следующим образом:

$$K = \frac{D}{100},$$

где  $K$  – коэффициента условно-остаточной деформации полотна;

$D$  – величина условно-остаточной деформации полотна.

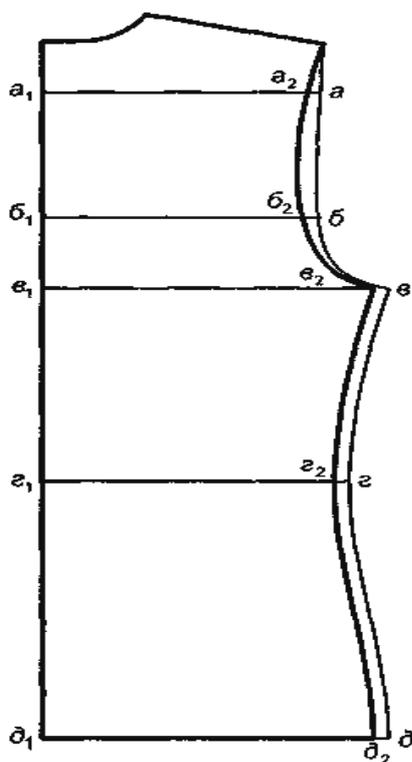


Рисунок 1 – Модификация конструкции с учетом условно-остаточной деформации

Для этого на лекалах базовой конструкции намечают ряд горизонталей. Первая горизонталь проводится на расстоянии не менее 5 см от наружных концов плечевых срезов (точки, расположенные выше не работают на растяжение и поэтому эти участки не деформируются). Расстояния между последующими горизонталями определяются в зависимости от кривизны проймы и сложности конструкции. Контуры новой детали, построенной с учетом условно-остаточной деформации будут проходить через точки  $a_2, b_2, v_2, \dots$ , полученные расчетным путем:

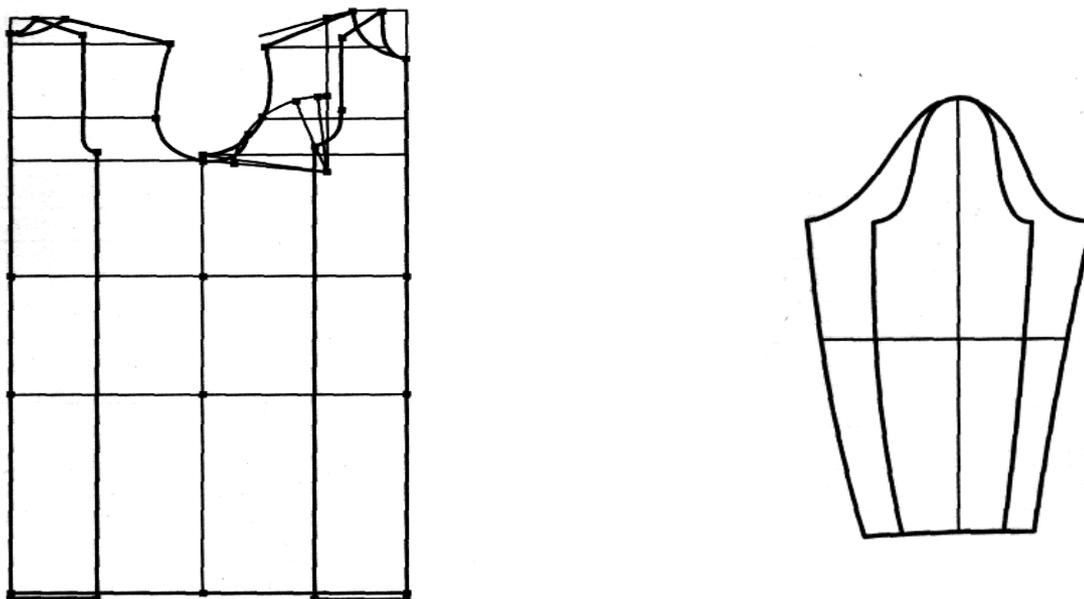
$$|a_2| = K \cdot |a_1|;$$

$$|b_2| = K \cdot |b_1| \text{ и т.д.}$$

Таким образом, уменьшение величины участка конструкции с учетом условно-остаточной деформации равно коэффициенту условно-остаточной деформации, умноженному на исходную величину этого участка. Линии боковых срезов для приталенных изделий проводят эквидистантно исходным линиям.

Модификация конструкции с использованием коэффициента при разработке чертежей лекал трикотажного изделия показана на рисунке 1.

При разработке конструкции с отрицательными прибавками к обхватным измерениям выбирают чертеж, построенный с нулевой прибавкой к обхвату груди. Верхнюю вытачку переводят в срез проймы (при необходимости возможно в боковой срез). Далее уточняют размеры деталей на всех конструктивных участках, используя при пересчете коэффициенты желаемого заужения (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Модификация конструкции с учетом условно-упругой деформации**

Заужение на различных участках по длине детали может быть различным. Это зависит от желаемой степени прилегания изделия к фигуре, вида переплетения, его плотности. В зависимости от формы плечевого пояса в изделии по участкам конструкции могут быть различные соотношения величин заужения части конструкции выше линии проймы и верхней части оката рукава. При этом нужно учитывать, что растяжение полотна по ширине ведет к его укорочению по длине. Поэтому необходимо экспериментально определить величину (%) уменьшения продольных размеров, при задаваемом растяжении по ширине. Эти изменения обычно касаются только габаритной длины детали (в приталенных изделиях – линии талии и бедер). Изменением по вертикали координат точек верхних контурных линий можно пренебречь.

Таким образом, можно сделать вывод, что конструирование верхних трикотажных изделий с учетом условно-остаточной деформации полотна позволяет сократить сроки подготовки производства, повысить производительность труда, снизить отходы при раскрое полотна, удешевить себестоимость верхних трикотажных изделий и добиться желаемого качества посадки изделия на фигуру.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Флерова, Л.Н. Промышленная технология поузловой обработки верхних трикотажных изделий / Флерова Л.Н. Золотцева Л.В. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 176 с.
2. Булычева, Е.Б. Конструктивное моделирование одежды: учеб. пособие для студентов вузов / Е.Б. Булатова, М.Н. Евсеева – 2-е изд. – М.: Издательский центр «Аккадемия»: 2004 – 302 с.
3. Гусейнов, Г. М. Композиция костюма [Текст] : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Г. М. Гусейнов, В. В. Ермилова, Д. Ю. Ермилова. – М. : Академия, 2004. – 432 с.

**Кваскова Тамара Викторовна**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТикШИ  
Тел. (4862) 55 – 11- 20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

**Осокина Алла Александровна**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Старший преподаватель кафедры ТекШИ  
Тел. (4862) 55 – 11- 20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

**Проконова Елена Владимировна**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТекШИ  
Тел. (4862) 55 – 11- 20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

T.V. KVASKOVA, A.A. OSOKINA, E.V. PROKOPOVA

**MODIFICATION OF PRODUCT DESIGN TAKING INTO ACCOUNT  
TENSILE STRAIN OF STOCKINET**

*To the decrease of terms for the development of design and technological documentation during designing products made of stockinet contributes the application of basic designs that makes take into consideration values characterizing its forming properties.*

***Key words:** basic design, standard figure, modification, drawing, stockinet, deformation, coefficient of deformation, stockinet (linen) stretchability*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Flerova, L.N. Promyshlennaja tehnologija pouzlovoj obrabotki verhnih trikotazhnyh izdelij / Flerova L.N. Zolotceva L.V. – M.: Legkaja i piwevaja promyshlennost', 1983. – 176 s.
2. Bulycheva, E.B. Konstruktivnoe modelirovanie odezhdy: ucheb. posobie dlja studentov vuzov / E.B. Bulatova, M.N. Evseeva – 2-e izd. – M.: Izdatel'skij centr «Akkademija»: 2004 – 302 S.
3. Gusejnov, G. M. Kompozicija kostjuma [tekst] : ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij / G.M. Gusejnov, V.V. Ermilova, D.JU. Ermilova. – M. : Akademija, 2004. – 432 S.

**Kvaskova Tamara Viktorovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor of department “Technology and design of garment”  
Tel.: 4862-55-11-20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

**Osokina Alla Aleksandrovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Senior teacher of department “Technology and design of garment”  
Tel.: 4862-55-11-20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

**Prokopova Elena Vladimirovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor of department “Technology and design of garment”  
Tel.: 4862-55-11-20  
E-mail: tikshi@ostu.ru

Н.С. НЕКРАСОВА, Ю.Н. НЕКРАСОВ

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ КОЖЕВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ЦЕПОЧКИ ДОБАВЛЕННОЙ ЦЕННОСТИ

*Каждая функция по созданию ценности на конкретном предприятии характеризуется матрицей определенных факторов, которые объясняют различия в методах управления для отдельных технологических процессов. В результате внедрения цепочки добавленной ценности возможна оптимизация существующей технологии производства и управление производственным потенциалом в целом в соответствии с нуждами конечных покупателей, максимизация общей ценности товара для потребителей и создание уникальных источников получения конкурентного преимущества.*

**Ключевые слова:** *методы управления, цепочка добавленной ценности, оптимизация производственной технологии, производственный потенциал, максимизация общей ценности.*

Легкая промышленность в настоящее время переживает бурный рост, и это в большей части обусловлено возрастающими требованиями потребителей к качеству, разнообразию и экологичности продукции. В этом смысле кожевенное производство является одной из приоритетных отраслей экономики и одновременно - весьма традиционным технологическим предприятием.

Специфика кожевенного производства как производства с многочисленными применяемыми в процессах и операциях материалами, а также с уникальным автоматизированным или частично автоматизированным оборудованием требует от технического и рабочего персонала современного кожевенного завода высокого технического и исполнительского мастерства, а также диктует необходимость применения актуальных механизмов управления процессами на предприятии.

Одним из инновационных подходов к разработке современной модели генерации методов управления является концепция цепочки добавленной ценности. С ее помощью можно провести сегментацию деятельности предприятия на отдельные бизнес-процессы, основываясь на сферах компетентности. Сегментный анализ дает основу для понимания механизма создания ценности в каждом сегменте, что, в свою очередь, позволит оценить конкурентную позицию фирмы с точки зрения удовлетворения рыночного спроса на продукты или услуги.

Кожевенное производство сегодня опирается на установившиеся, классические технологические принципы, характеризуется многочисленными и разнообразными обработками кожевенного сырья в определенной последовательности.

По степени воздействия на сырье эти обработки делятся на 2 группы:

1. Технологические процессы-обработки, основу которых составляют химические и физико-химические воздействия.

2. Операции-обработки, базирующиеся на механических воздействиях

По степени готовности продукты переработки сырья эти обработки делятся на 3 стадии (графически процесс производства изображен на рис. 1).

При поступлении кожевенного сырья на завод производят приемку и сортировку сырья, комплектацию сырьевых партий в производственные партии по развесам.

1-ая стадия обработки сырья. Отмочно-зольные и дубильные технологические процессы, результатом которых является получение хромированного полуфабриката «Вет-блю», то есть превращение природного белкового быстро портящегося материала кожи в полуфабрикат со сроком хранения более месяца.

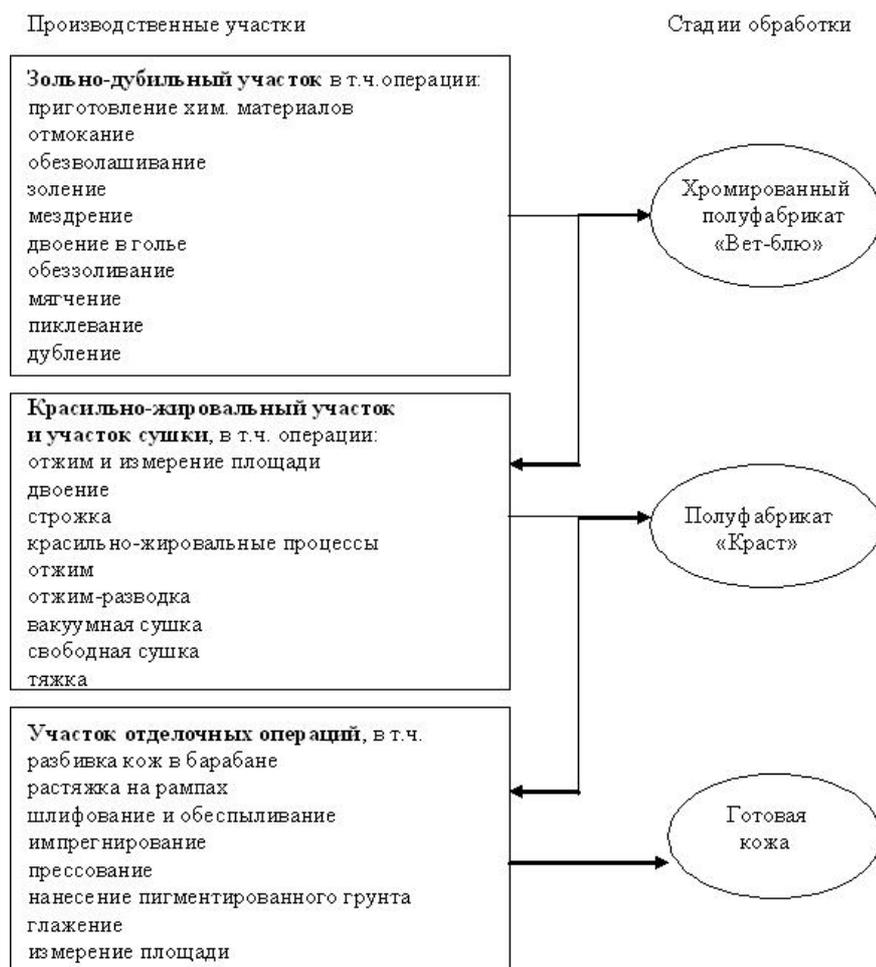


Рисунок 1 – Графическая схема технологии кожевенного производства

2-ая стадия. Механические красильно-жировальные и сушильные процессы. На данной стадии формируется ассортимент готовых кож по назначению. Эта стадия включает в себя механические операции, проводимые с хромированным полуфабрикатом «Вет-блю», такие как отжим, сортировка, комплектация партий по назначению, сушка. Далее скомплектованные по ассортименту и назначению партии «Вет-блю» подвергаются обработке в водных растворах хим. материалов, проходя стадии нейтрализации, крашения, жирования и наполнения. Следующие затем сушильные процессы заканчивают процесс формирования полуфабриката «Краст» и включают в себя следующие процессы: разводка, сушка вакуумная, сушка в свободном состоянии, сушка в фиксированном состоянии, тяжка, разбивка в барабане. Полученный таким образом полуфабрикат «Краст» может храниться неограниченное время.

3-я стадия. Является заключительной, включает в себя отделочные операции, которые проходит «Краст» до получения готовой кожи. На этой стадии на высушенные кожи наносится полимерное водное покрытие с добавлением пигмента по цвету и закрепляющее покрытие. Применение механических операций в сочетании с использованием для покрытий различных по свойствам полимеров и вспомогательных материалов позволяет получить кожи модной гаммы расцветок и модного ассортимента. Состав покрывных красок позволяет придать коже необходимую гидрофобность и износостойкость, одновременно придает коже нарядный внешний вид и защищает от механических повреждений и загрязнений. Для получения особо мягких кож предусмотрена разбивка в барабане.

Продолжительность производственного цикла зависит от количества вырабатываемого сырья в партии и в целом (чем меньше вес партии и замочки, тем медленнее происходит формирование партий для второй стадии обработки), от режима работы: односменный, двухсменный, трехсменный, непрерывный.

Длительность производственного цикла по стадиям составляет:

1-ая стадия-8 дней

2-ая стадия-15 дней

3-я стадия-16-20 дней в зависимости от технологии отделки.

Оптимизация технологии производства кожевенного предприятия на основе внедрения цепочки добавленной ценности предусматривает сегментирование ассортимента на группы, в зависимости от предлагаемых видов готовой продукции. В данной статье предлагается 3 сегмента, определяющих продукцию на разных стадиях производственного цикла – сегмент «полуфабрикат Вет-блю», сегмент «полуфабрикат Краст», и сегмент «Готовая Кожа».

Ценность, добавляемая каждым сегментом, может быть определена на основе данных о продажах отдельных видов готовой продукции (по каждому предприятию) или на основе мониторинга рынка кож и полуфабрикатов.

В 2009 году наблюдался спад кожевенного производства по всем видам продукции. Падение производства натуральной кожи 25, 2% - одно из самых существенных. Сокращение выпуска кожи началось в IV кв. 2008 г и за 10 месяцев падение, по сравнению с 2008 г., увеличилось до 26% и составило за 2009 год 25,2 % (табл. 1)

Таблица 1 – Динамика кожевенного производства в 2009 году

Ассортимент	Выпуск	Темп, % к 2008 г.			
		За 3 мес.	За 6 мес.	За 9 мес.	За год
Кожевенное производство		72,7	78,7	82,8	74,8
Кожы хромового дубления, млн. дм <sup>2</sup>	1839	71,5	78,9	85,7	95,4
Юфть, млн. дм <sup>2</sup>	50,3	73,6	87,0	65,2	73,7
Кожы для низа обуви, млн. дм <sup>2</sup>	53,8	76,8	80,7	78,4	81,0

Одной из основных причин падения производства натуральной кожи является уменьшение поставки ее на экспорт, доля которого в объеме производства достаточно велика. В 2008 г. на экспорт поставлено 833,1 млн. дм<sup>2</sup> – 40,4% всего выпуска готовой кожи. А в 2009 г. выпуск кожи уменьшился на 118,7 млн. дм<sup>2</sup>. В 2009 г. сократился также экспорт вет-блю (на 8,7 %) и краста – на 11,5% (табл. 2)

Таблица 2 – Экспорт кож и полуфабрикатов в 2009 году

Экспорт	2006	2007	2008	2009	2009 г. в % к 2008	Уменьшение
Вет-блю, т	46415	35321	31135	28419	91,3	2716
Краст, т	1062	2	26	23	88,5	3
Кожа, млн. дм <sup>2</sup>	462,1	607,5	833,1	628,7	75,5	204,4
Кожа, % к выпуску	21,0	22,9	40,4	32,4		
Выпуск кожи, млн. дм <sup>2</sup>	2200,0	2652,0	2062,0	1943,3	94,2	118,7

В 2009 резко сократился и импорт кожи и полуфабрикатов (таблица 3). В частности импорт вет-блю сократился в 5,7 раз, а краста - в 4,6 раза.

Таблица 3 – Импорт кож и полуфабрикатов в 2009 году

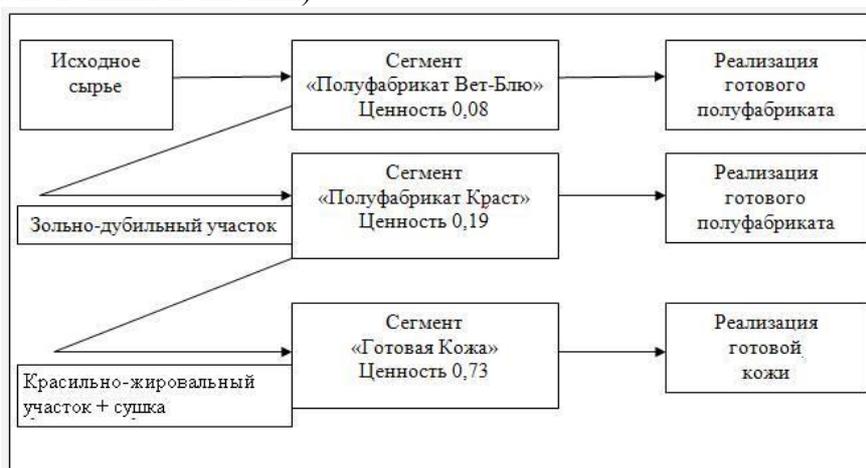
Экспорт	2006	2007	2008	2009	2009 г. в % к 2008	Уменьшение
Вет-блю, т	730	1172	2921	516	27,6	2116
Краст, т	2986	2920	1198	261	21,8	937
Кожа, млн. дм <sup>2</sup>	497,9	557,3	1049,2	472,3	45,1	576,9
Кожа, % к выпуску	22,6	21,8	50,9	24,3		

Импорт полуфабрикатов обусловлен нехваткой качественного отечественного сырья. Проблема увеличения поголовья скоты, разумной заготовки, первичной обработки (особенно

качественной консервации) и рационального использования кожевенной сырья по-прежнему актуальна в России. В начале 2007 Правительство РФ были приняты 3 целевых программы, имеющих прямое отношение к обеспечению легкой промышленности сырьем. В связи с дефицитом кожевенного сырья была также отменена ввозная пошлина на необработанные шкуры, в результате чего в ближайшее время ожидается увеличение импорта кожевенного сырья.

В условиях дефицита кожевенного сырья и с целью минимизации производственных затрат, многие предприятия запускают в производство импортные полуфабрикаты Вет-Блю и Краст, а также совмещают обработку собственных полуфабрикатов и давальческого сырья для полной загрузки производственных мощностей.

С учетом состояния кожевенной промышленности и объемов производства и реализации кож и кожевенных полуфабрикатов в 2009 году было сделано предположение, что основная ценность в процессе технологии кожевенного производства добавляется при переходе от сегмента «Полуфабрикат КРАСТ» к сегменту «Готова Кожа». Минимальная ценность образуется при переходе исходного сырья, закупаемого предприятиями к сегменту «Полуфабрикат Вет-Блю». Приняв общую ценность производственного потенциала кожевенного предприятия за 1, получим следующую укрупненную цепочку ценности производственного потенциала кожевенного предприятия (рис. 2 - \*на основе данных об объемах производства и реализации кожевенных компаний)



**Рисунок 2 – Укрупненная цепочка добавленной ценности производственного потенциала кожевенного предприятия**

Детализированная цепочка добавленной ценности (рис. 3) должна быть выстроена с учетом длительности отдельного технологического процесса или операции в рамках производственной технологии (уточнена добавленная ценность самых длительных фаз). Данные о продолжительности производственных процессов были получены на кожевенном предприятии ОАО «Кожа».

В результате возможно создание цепочки добавленной ценности уникальной для каждого предприятия, с конфигурацией, зависящей от модели бизнеса.

Наибольшую важность для руководства при пересмотре существующей технологии представляют сегменты и отдельные технологические процессы с наивысшей ценностью – сегменты приоритетны при планировании сбыта и выработке методов управления производством, а основные инвестиции необходимо осуществлять в обособленные технологические процессы и оборудование для осуществления целевых операций производственного цикла. В целях минимизации затрат и длительности производственного цикла допускается также исключение определенных участков и внедрение на этой стадии импортного сырья.

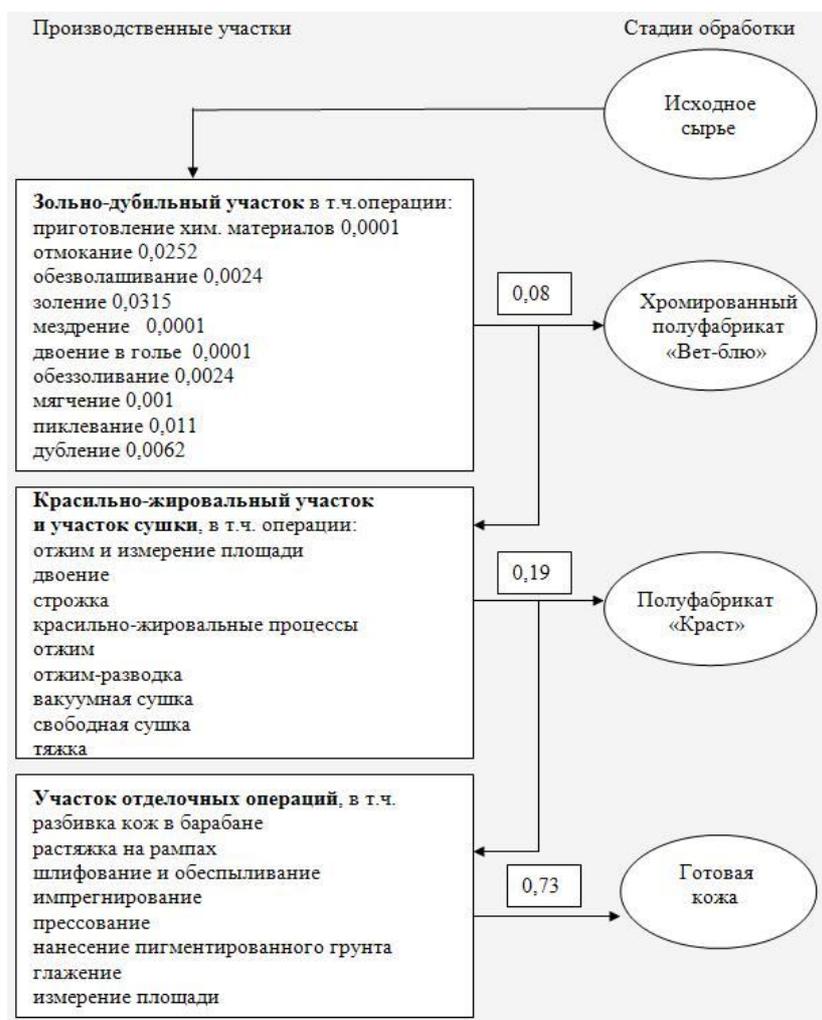


Рисунок 3 – Детализированная цепочка добавленной ценности производственного потенциала кожевенного предприятия

Таким образом, для каждого предприятия создается обособленная совокупность методов управления производственным потенциалом, позволяющая приспособить существующую технологию производства под нужды конечных покупателей, максимизировать общую ценность товара для потребителей, минимизировать затраты предприятия и уменьшить длительность производственного цикла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков, В.Ю. Итоги работы легкой промышленности в 2009 г. / В.Ю. Жуков // Кожевенно-обувная промышленность. – 2010. – №2. – С. 3–15
2. Ивлеев, В.А. Цепочка создания добавленной стоимости – инструмент для анализа эффективности деятельности / В.А. Ивлеев, Т.В. Попова // Методы менеджмента качества. – 2006.
3. Каплински, Р. Распространение положительного влияние глобализации: анализ цепочек приращения стоимости / Р. Каплински // Вопросы экономики. – 2003. – №10. – С. 4–26.
4. Титова, М.Н. Менеджмент предприятий легкой промышленности и индустрии моды: учеб. пособие / М.Н. Титова, Ю.А. Киселева. – СПб.:СПГУТД, 2006. – 120 с.
5. Новикова, О.А. Коммерческая деятельность производственных предприятий (фирм) / О.А. Новикова, В.В. Щербakov. – СПб.:СПбГУЭФ, 1999. – 416 с.
6. Стратегия развития легкой промышленности России на период до 2020 года. Информация с официального сервера Российской легкой промышленности [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www.roslegprom.ru/Go/ViewArticle/id=1691](http://www.roslegprom.ru/Go/ViewArticle/id=1691)
7. Информация открытого акционерного общества Рослегпром [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www.roslegprom.ru](http://www.roslegprom.ru)
8. Информация Российского союза кожевников и обувщиков [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www.souzkogevenikov.ru](http://www.souzkogevenikov.ru)
9. Данные бухгалтерской отчетности ОАО «Кожа» [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www.emitter.narod.ru/koja.html](http://www.emitter.narod.ru/koja.html)

**Некрасова Надежда Сергеевна**

Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна, г. Санкт-Петербург  
Аспирант кафедры «Менеджмент»  
Тел. (812) 355-50-66  
E-mail: nekrasovanadia@rambler.ru

**Некрасова Юрий Николаевич**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология и конструирования швейных изделий»  
Тел. (4862) 55-10-31  
E-mail: tikshi@ostu.ru

N.S.NEKRASOVA, Y.N. NEKRASOV

**INDUSTRIAL TECHNOLOGY OPTIMIZATION OF TANNING  
ENTERPRISE BASED ON INTRODUCTION OF ADDED VALUE CHAIN**

*Each function for the value creation at a certain company is characterized with the matrix of certain factors explaining differences in control methods for separate engineering procedures. As a result of the introduction of an added value chain appears a possibility for the optimization of current engineering procedure and productive potential control as a whole in accordance with the requirement of ultimate consumers, maximization of a general value of goods for customers and creation of unique sources for competitive advantage obtaining.*

**Key words:** control methods, added value chain, engineering procedure optimization, productive potential, general value maximization.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Zhukov, V.Ju. Itogi raboty legkoj promyshlennosti v 2009 g. / V.Ju. Zhukov // Kozhevenno-obuvnaja promyshlennost'. – 2010. – №2. – S. 3–15
2. Ivleev, V.A. Cepochka sozdaniya dobavlennoj stoimosti – instrument dlja analiza jeffektivnosti dejatel'nosti / V.A. Ivleev, T.V. Popova // Metody menedzhmenta kachestva. – 2006.
3. Kaplinski, R. Rasprostranenie polozhitelnogo vlijanie globalizacii: analiz cepochek priraweniya stoimosti / R. Kaplinski // Voprosy jekonomiki. – 2003. – №10. – S. 4–26.
4. Titova, M.N. Menedzhment predpriyatij legkoj promyshlennosti i industrii mody: ucheb. posobie / M.N. Titova, Ju.A. Kiseleva. – SPb.:SPGUTD, 2006. – 120 s.
5. Novikova, O.A. Kommercheskaja dejatel'nost' proizvodstvennyh predpriyatij (firm) / O.A. Novikova, V.V. Werbakov. – SPb.:SPbGUJEF, 1999. – 416 s.
6. Strategija razvitiya legkoj promyshlennosti Rossii na period do 2020 goda. Informacija s ofici-al'nogo servera Rossijskoj legkoj promyshlennosti [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.roslegprom.ru/Go/ViewArticle/id=1691](http://www.roslegprom.ru/Go/ViewArticle/id=1691)
7. Informacija otkrytogo akcionernogo obwestva Roslegprom [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.roslegprom.ru](http://www.roslegprom.ru)
8. Informacija Rossijskogo sojuza kozhevennikov i obuwvikov [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.souzkogevenikov.ru](http://www.souzkogevenikov.ru)
9. Dannye buhgalterskoj otchetnosti OAO «Kozha» [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: [www.emitter.narod.ru/koja.html](http://www.emitter.narod.ru/koja.html)

**Nekrasova Nadezhda Sergeevna**

Saint-Petersburg state university of technology and design, Saint-Petersburg  
Post-graduate student of department “Management”  
Tel.: 812-355-50-66  
E-mail: nekrasovanadia@rambler.ru

**Nekrasov Yuriy Nickolaevich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor of department “Technology and design of garment”  
Tel.: 4862-55-10-31  
E-mail: tikshi@ostu.ru

УДК 530.17:697

М.В. РОДИЧЕВА, А.В. АБРАМОВ, Е.М. АГАШКОВ, Т.И. БЕЛОВА

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

*Для расчета конструктивных параметров элементов системы вентиляции в средствах индивидуальной защиты используются критериальные уравнения конвективного теплообмена. Такие расчеты в некоторых случаях могут приводить к существенным ошибкам. Поэтому, применение критериальных уравнений требует предварительной проверки правильности расчетов. Авторами приводится методика расчета интенсивности свободной конвекции и результаты экспериментальной проверки критериальных уравнений.*

**Ключевые слова:** естественная вентиляция, теория подобия конвективного теплообмена, критериальные уравнения.

За счет вентиляции обеспечивается оптимальный тепловой и газовый обмен между человеком и окружающей средой. Элементы системы вентиляции применяются для регулирования параметров воздуха, как в рабочих помещениях, так и в пододежном пространстве.

Устройства для обеспечения вентиляции производственных помещений хорошо известны и классифицированы. В патентной литературе приведены многочисленные решения конструктивных элементов для обеспечения вентиляции пододежного пространства (рис. 1).



а)

б)

**Рисунок 1 – Образцы вентилируемой специальной одежды**

*(а – куртка с элементами принудительной вентиляции пододежного пространства;  
б – брюки с элементами естественной вентиляции пододежного пространства)*

Режимы вентиляции рассчитываются на основе критериальных уравнений теплообмена, которые выведены на положениях теории подобия конвективных процессов.

Каждое критериальное уравнение описывает совокупность процессов, протекающих в геометрически подобных системах, и выводится путем обобщения опытных данных.

Из-за расхождения в результатах обработки данных разными исследователями, применение критериальных уравнений, в некоторых случаях, может привести к значительным ошибкам.

Поэтому при проведении расчетов на основе теории подобия, необходимо проводить численную или экспериментальную проверку выбранных зависимостей. Методика проверки уравнений естественноконвективной теплоотдачи вертикальной плиты, описана в работе [1]. Однако, при проектировании технических решений элементов системы вентиляции, основным объектом защиты является человек. Поэтому более точные результаты могут быть получены при решении задачи для цилиндрического элемента, а не для плоской пластины.

В общем виде, уравнение естественноконвективной теплоотдачи может быть представлено в следующем виде (1):

$$Q_{ек} = \alpha_{ек} (t_{нов} - t_{окр}) F_{нов} \quad (1)$$

где  $\alpha_{ек}$  – коэффициент естественноконвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_{нов}$  – температура на поверхности тела, °С;

$t_{окр}$  – температура окружающей среды, °С;

$F_{нов}$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>.

Для расчета параметров теплоотдачи по формуле (1), необходимо знать коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{ек}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), который является сложной функцией от формы тела, режимов теплоотдачи, и др. Для тел правильной геометрической формы, расчетная зависимость принимает следующий вид (2):

$$\alpha_{ек} = \frac{\lambda \cdot Nu}{L} \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м·К;

$Nu$  – критерий Нуссельта;

$L$  – характерный размер тела.

Критерий Нуссельта является основным определяемым критерием. Для естественноконвективного теплообмена, он рассчитывается по уравнению (3):

$$Nu = a \cdot Ra^n \quad (3)$$

где  $Ra$  – критерий Релея,

$a, n$  – постоянные (таблица 1).

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $a$  и  $n$

$Ra$	$10^{-3}$	$10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2} \div 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 \div 10^{18}$
$a$	0,5	1,18	0,54	0,135
$n$	0	0,125	0,25	0,33

Критерий Релея определяется исходя из значений критериев Грасгофа ( $Gr$ ) и Прандтля ( $Pr$ ), по уравнениям (4-6):

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (4); \quad Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (t_{нов} - t_{окр}) \quad (5); \quad Pr = \frac{\nu}{a} \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха, К<sup>-1</sup> (7);

$g$  – ускорение силы тяжести (9,8 м/с<sup>2</sup>);

$L$  – характерный размер тела, м;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с<sup>-1</sup> (8);

$a$  – коэффициент температуропроводности воздуха, м<sup>2</sup>/с;

$$\beta = \frac{1}{T_{возд}} \quad (7)$$

где  $T_{возд}$  – абсолютная температура воздуха, К;

$$\nu = \frac{g \cdot \mu}{\gamma} \quad (8)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, кг·с/м<sup>2</sup>;

$\gamma$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

А.В. Нестеренко предложена математическая зависимость плотности воздуха от температуры, барометрического давления и влагосодержания (9) [2]:

$$\gamma = 1,293 \frac{273}{T_e} \left( \frac{P_e}{760} - 0,378 \frac{P_{mm}}{760} \right) \quad (9)$$

где  $T_e$  – температура воздуха, К;

$P_6$  – барометрическое давление, мм. рт.ст.;

$P_{нп}$  – давление насыщенного пара, мм рт.ст.

Результаты численной оценки интенсивность естественновнективной теплоотдачи элемента тела человека, имеющего цилиндрическую форму с размерами  $l=1000$  мм;  $d=120$  мм для нескольких режимов теплоотдачи, характеризующихся разностью температур между рабочей поверхностью и окружающей средой ( $\Delta t$ ) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты численной оценки интенсивности естественноконвективного охлаждения вертикального цилиндра

$\Delta t,$ °C	$\lambda,$ Вт/м·К	$P_6,$ мм.рт.ст	$P_{нп}$ мм.рт.ст	$\gamma$ кг/м <sup>3</sup>	$\beta$ К <sup>-1</sup>	Gr	Pr	Nu	$\alpha$ Вт/м·К	$Q_{ек}$ Вт
20	0,0259	745	17,75	1,169	0,0034	$2,8 \cdot 10^9$	0,696	158	4,1	34
30	0,0259	745	17,75	1,171	0,0034	$4,1 \cdot 10^9$	0,695	178	4,6	51
40	0,0259	745	17,75	1,173	0,0034	$5,2 \cdot 10^9$	0,694	192	4,9	69
50	0,0259	745	17,75	1,174	0,0034	$6,7 \cdot 10^9$	0,693	208	5,4	96

Методика проведения экспериментальной оценки интенсивности естественноконвективной теплоотдачи тел различной геометрической формы, разработана авторами ранее [3] (рис. 2).

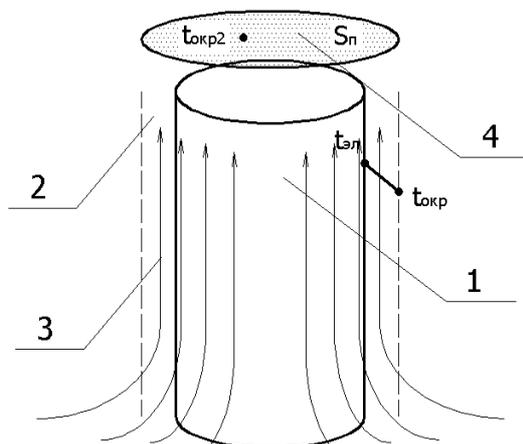


Рисунок 2 – Общая схема экспериментального исследования теплоотдачи путем свободной конвекции

Воздух, соприкасаясь с телом (1) нагревается и поднимается вверх за счет естественной конвекции в рамках гидродинамического пограничного слоя (2,3). По величине сечения  $S_n$  восходящей струи воздуха (4), может быть определен массовый расход воздуха, участвующего в теплообмене (10):

$$P_m = \gamma \cdot v \cdot S_n \quad (10)$$

где  $v$  – скорость движения воздуха за счет естественной конвекции, м/с.

Величина естественноконвективной теплоотдачи определяется по уравнению (11):

$$Q_{ек} = P_m \cdot c \cdot \Delta t \quad (11)$$

где  $c$  – теплоемкость воздуха, кал/(г·°C);

$\Delta t$  – разность температур воздуха до контакта с телом и после теплообмена, °C (12):

$$\Delta t = t_{окр2} - t_{окр} \quad (12)$$

где  $t_{окр2}$  – температура воздуха после контакта с нагретым телом, °C.

Авторами была проведена экспериментальная оценка свободноконвективной теплоотдачи элемента тела человека, имеющего цилиндрическую форму с размерами  $l=1000$  мм;  $d=120$  мм для нескольких режимов теплоотдачи. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментального исследования естественноконвективной теплоотдачи вертикального цилиндра

$t_{окр}$	$t_{эл}$	$\Delta t$	$\nu$	$\gamma$	$Q_{ек}$
°С	°С	°С	м/с	кг/м <sup>3</sup>	Вт
20,2	40,8	≈ 20	0,58	1,169	33
20,2	49,6	≈ 30	0,68	1,171	50,5
20,2	57	≈ 40	0,75	1,173	70,1
20,2	67	≈ 50	0,82	1,174	89,2

Как видно, результаты численных исследований интенсивности свободно конвективной теплоотдачи, полученные с помощью критериальных уравнений (1-9), показывают хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований. Поэтому представленные критериальные уравнения могут быть использованы для определения интенсивности теплообмена цилиндрического элемента тела человека с окружающей средой и последующего расчета конструктивных элементов системы вентиляции помещений, или специальной одежды.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, Грант № 09-08-97557 на проект "Моделирование процессов тепло- и массообмена в биотехнической системе "Человек – одежда - окружающая среда".*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грубский, Е.В. О критериальных уравнениях для расчета теплообмена вертикальных гладких поверхностей в условиях свободной конвекции [Текст] / Е.В. Грубский. // «Санитарная техника», выпуск XV, 1974г., К.: «Будивельник». – С. 45-51.
2. Нестеренко, А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования [Текст] / А.В. Нестеренко // М.: «Высшая школа», 1971. – 460 с.
3. Родичева, М.В. Моделирование процессов тепломассообмена в биотехнической системе "человек - одежда - окружающая среда" [Текст] / М.В. Родичева, А.В. Абрамов, А.В. Уваров // «Швейная промышленность». – №6. – 2009. – С.38-40.
4. Родичева, М.В. Проектирование одежды с естественной вентиляцией пододежного пространства с естественной вентиляцией для работы в условиях термонейтрального и нагревающего микроклимата [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / М.В. Родичева. // Орел, 1999, 210 с.

**Родичева Маргарита Всеволодовна**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и конструирование швейных изделий»

Телефон (4862) 55-11-20

E-mail tikshi@ostu.ru

**Абрамов Антон Вячеславович**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»

Телефон (4862) 76-14-39

E-mail bgdgtu@mail.ru

**Агашков Евгений Михайлович**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Аспирант кафедры «Охрана труда и окружающей среды»

Телефон (4862) 76-14-39

E-mail evgenii-agashkov@mail.ru

**Белова Татьяна Ивановна**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел

Доктор технических наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»

Телефон (4862) 76-14-39

E-mail belova911@mail.ru

M.V. RODICHEVA, A.V. ABRAMOV, E.M. AGASHKOV, T.I. BELOVA

## **NATURAL VENTILATION FACTOR COMPUTATION AT INDIVIDUAL DEFENCE DEVELOPMENT**

*This paper reports the criterial equations of convective heat transfer used in the computation of design factors in ventilation system elements of individual protection. In some cases such computations can result in substantial errors. That is why the criterial equation application requires preliminary tests to determine computation accuracy. The authors produce the procedure for the computation of free convection rate and results of an experimental check-up of criterial equations.*

**Key words:** *natural ventilation, similarity theory of convective heat transfer, criteria equations.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Grubskij, E.V. O kriterial'nyh uravnenijah dlja rascheta teploobmena vertikal'nyh gladkih po-verhnostej v uslovijah svobodnoj konvekcii [Tekst] / E.V. Grubskij. // «Sanitarnaja tehnika», vypusk XV, 1974g., K.: «Budivel'nik». – S. 45-51.
2. Nesterenko, A.V. Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventiljaccii i kondicionirovanija [Tekst] / A.V. Nesterenko // M.: «Vysshaja shkola», 1971. – 460 s.
3. Rodicheva, M.V. Modelirovanie processov teplomassobmena v biotehnicheskoi sisteme "chelovek - odezhda - okruzhajuwaja sreda" [Tekst] / M.V. Rodicheva, A.V. Abramov, A.V. Uvarov // «Shvejnjaja promyshlennost'». – №6. – 2009. – S.38-40.
4. Rodicheva, M.V. Proektirovanie odezhdy s estestvennoj ventiljaciej pododezhnogo prostranstva s estestvennoj ventiljaciej dlja raboty v uslovijah termonejtral'nogo i nagrevajuwego mikroklimate [Tekst]: diss. ... kand. tehn. nauk / M.V. Rodicheva. // Orel, 1999, 210 s.

#### **Rodicheva Margarita Vsevolodna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor, head of department “Technology and design of garment”

Tel.: 4862-55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

#### **Abramov Anton Vyacheslavovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department “Engineering safety of environment”

Tel.: 4862-76-14-39

E-mail: bgdgtu@mail.ru

#### **Agashkov Evgeniy Mihailovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department “Engineering safety of environment”

Tel.: 4862-76-14-39

E-mail: evgenii-agashkov@mail.ru

#### **Belova Tatiana Ivanovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel

Doctor of technical science, associate professor of department “Engineering safety of environment”

Tel.: 4862-76-14-39

E-mail: belova911@mail.ru

**ИННОВАЦИИ И КАДРЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 004.915

В.И. АВЕРЧЕНКОВ, Е.В. ШКУМАТ, В.В. НАДУВАЕВ

**МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПО СПЕЦИАЛЬНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ**

*Рассмотрен обобщенный подход к проектированию контента электронных образовательных ресурсов (ЭОР) на основе формирования единой методологии обучения специальным техническим дисциплинам при широком использовании современных информационных технологий.*

**Ключевые слова:** электронные образовательные ресурсы, проектирование ЭОР, формирование контента, визуализация объектов содержания.

В настоящее время существует множество методик разработки электронных образовательных ресурсов (ЭОР), которые, как правило, содержат общие рекомендации по построению структуры электронного курса, т.е. имеют рекомендательный характер. ГОСТ Р 52653-2006 «Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Термины и определения» вводит такое определение ЭОР: «Под электронным образовательным ресурсом понимается образовательный ресурс, представленный в цифровой форме и включающий в себя структуру, предметное содержание и метаданные о них, а также данные, информацию, программное обеспечение, необходимые для его использования в учебном процессе». В данном ГОСТе выделяются следующие виды обучения: электронное, мобильное, сетевое, автономное, смешанное, совместное. При этом дополнительно вводится понятие «образовательный контент», под которым понимается структурированное предметное содержание, используемое в образовательном процессе. В электронном обучении образовательный контент является основой электронного образовательного ресурса.

Электронные учебные ресурсы различной направленности, комплектности и применимости в учебном процессе могут иметь следующие формы (из опыта разработки и внедрения в вузах России):

- конспект лекций;
- учебное пособие;
- руководство по лабораторному практикуму;
- учебное пособие по циклу практических и семинарских занятий;
- демонстрационные презентации (слайд-лекции, лекционные и практические презентации и т.п.);
- методическое обеспечение и материалы для самостоятельной работы;
- организационно-методические указания по изучению дисциплины (обычно дублируются в бумажном виде);
- контрольно-измерительные материалы, вопросы для самопроверки и др.

Совокупность всех перечисленных материалов и их реализация в одном стиле может быть преобразована в электронный учебно-методический комплекс.

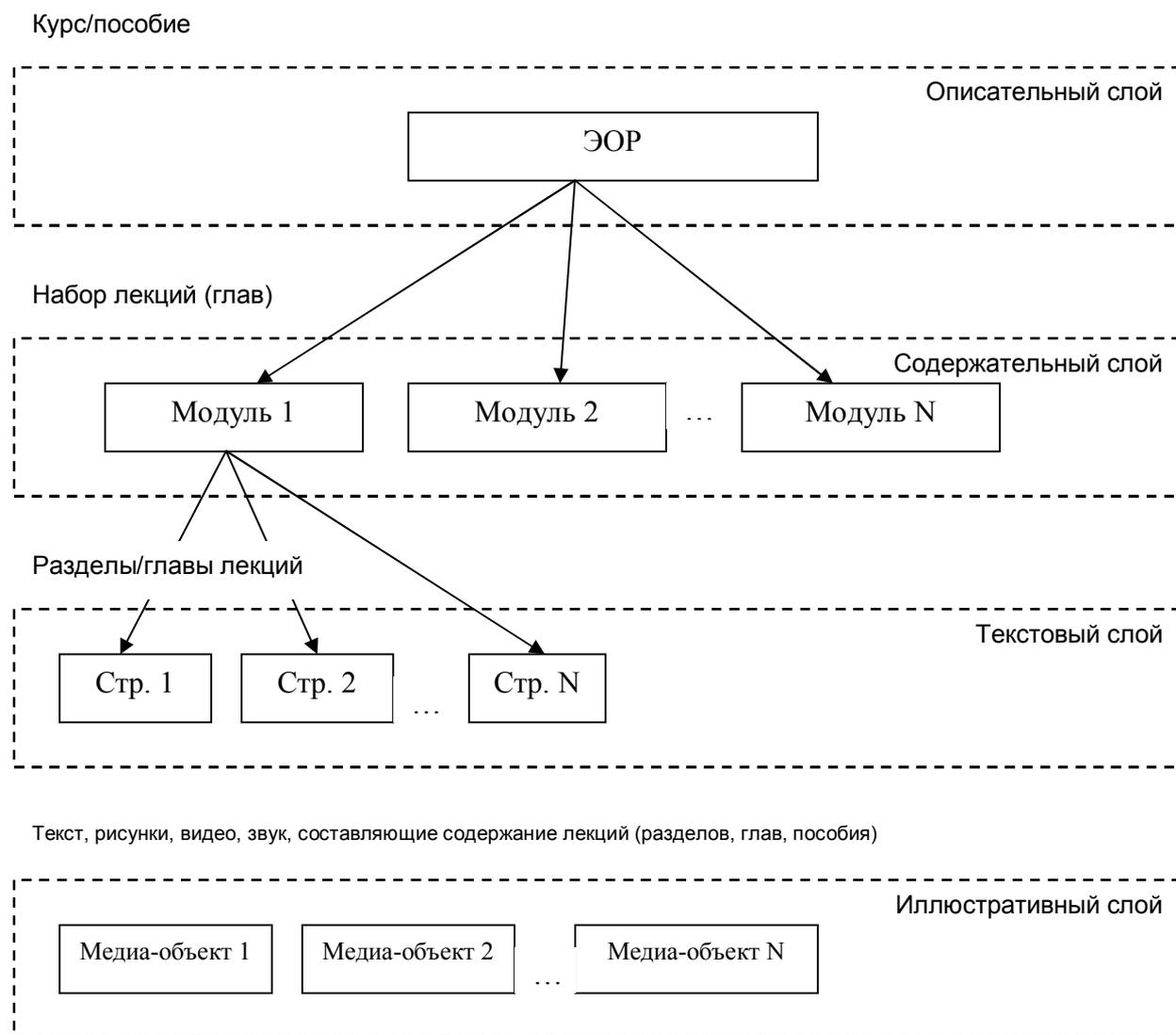
Определенный опыт создания ЭОР отражен в работах Л.Х. Зайнутдиновой [1], А.В. Соловова [2], А.В. Осина [3], И.П. Норенкова [4], В.В. Гура [5] и др.

В основу технологии формирования ЭОР, предлагаемой этими учеными, заложены психолого-педагогические требования, модели содержания и освоения материала, современные концепции информационно-образовательной среды и методика построения электронных образовательных ресурсов и т.д.

Особенностью ЭОР для специальных технических дисциплин [1; 6] является построение учебного процесса с опорой на теоретические знания, полученные при изучении физи

ко-математических и общетехнических дисциплин, а также на практический опыт работы с реальными техническими устройствами и системами. Сложность обучения в этой области обусловлена огромной номенклатурой реальных технических систем и устройств. В этих условиях необходимо обеспечение понимания сущности происходящих процессов на базе изученных ранее теоретических основ для успешного усвоения основ проектирования, производства и эксплуатации целых классов реальных технических устройств и систем. Сложность формирования профессиональных компетенций у обучаемых зависит также от стоимости и уникальности требуемого лабораторного оборудования, сложности технологических процессов и их реализации в учебных заведениях.

Наиболее универсальный вид структуры ЭОР был представлен В.В.Гура (рис.1) [5].



*Рисунок 1 – Структурная схема электронного образовательного ресурса (ЭОР)*

В данном случае основными компонентами создаваемого ресурса являются модули – относительно самостоятельные части учебной информации, по которым возможно осуществить как самопроверку, так и педагогическое тестирование знаний. Страницей считается логически самостоятельная часть учебного материала, входящая в модуль, которая состоит из медиа-ресурсов, разворачивающих учебный материал в логической последовательности, предполагаемой автором - проектировщиком ЭОР. Медиа-ресурсом здесь является минимальная единица учебной информации различной модальности: текст, видео, изображение, звук, тест, гиперссылки, представляющие собой единицы медиа-текста. Модель содержания ЭОР, предлагаемая другими авторами [2] строится подобным образом.

Указанные особенности дисциплин цикла специальных дисциплин (СД) оказывают существенное влияние на формирование образовательного контента, который анализируется и определяется при создании электронных образовательных ресурсов.

Рассмотрим основной процесс разработки ЭОР. Так как электронный образовательный ресурс является информационной системой, то соответственно его жизненный цикл есть жизненный цикл информационной системы, представляющий собой непрерывный процесс, начинающийся с момента принятия решения о создании информационной системы и заканчивающийся в момент полного изъятия ее из эксплуатации (в данном случае - из процесса обучения).

С учетом необходимости постоянного обновления и совершенствования ЭОР может быть предложена спиралевидная модель жизненного цикла этого вида информационной системы (ИС) (рис.2).

Спецификой разработки ЭОР на этапе завершения цикла является тестирование, внедрение в учебный процесс, оценка его эффективности и последующая корректировка, а также рецензирование и регистрация.

Оценка эффективности образовательных ресурсов и их корректировка проводятся, как правило, при помощи анкетирования контрольных групп студентов, при котором учитывается усваиваемость материала. На уровень усвоения материала влияет качество его передачи, доступность, наглядность и эргономичность ресурса.

Достижение эффективности ЭОР можно спрогнозировать на этапе анализа и проектирования системы путем проведения системного анализа при формировании исходных требований и задач.

Основной задачей разработки ЭОР для специальных технических дисциплин является формирование профессиональных компетенций. Компетентностный подход предполагает технологичность учебного процесса, необходимую для достижения заданных целей при обучении. При технологическом способе достижения учебных целей выпускник представляется «продуктом», качество которого определяется качеством образования. Такой подход дает возможность на основе структуризации и параметризации критериев качества оценивать воздействие технологии обучения на подготовку инженеров [7].

Успешность процесса обучения во многом зависит от организации учебного материала. Если курс предназначен для обучения при интенсивном взаимодействии преподавателя и обучаемого, то и требования к организации такого курса, принципы отбора, организации и структурирования материала, обеспечения контроля будут определяться особенностями этого взаимодействия.

К качеству подготовки инженеров можно отнести следующие базовые понятия:

- технические знания – знания, обеспечивающие выпускнику технического вуза базовый квалификационный уровень знаний по специальности;
- функциональные знания – знания, дающие понимание политики, процедур, практики и функциональных взаимосвязей, оказывающих существенное влияние на эффективность работы производственных систем в целом;
- технические способности – способности, возникающие на фоне общечеловеческих (таких, как индивидуально-психологические характеристики), обеспечивающие успешность выполнения инженерных видов деятельности;
- инженерный тип мышления - разновидность конструктивного мышления с особенностями, обусловленными характером инженерной деятельности при присутствии продук-



**Рисунок 2 – Спиральная модель жизненного цикла ЭОР**

тивного, когнитивного, аналитического, логического, креативного типов мышления, как его отдельных характеристик;

- инженерно-мыслящая личность – личность, обладающая инженерным типом мышления и сформированными в процессе подготовки личностными качествами, позволяющими ей профессионально реализовываться в производственной системе управления;

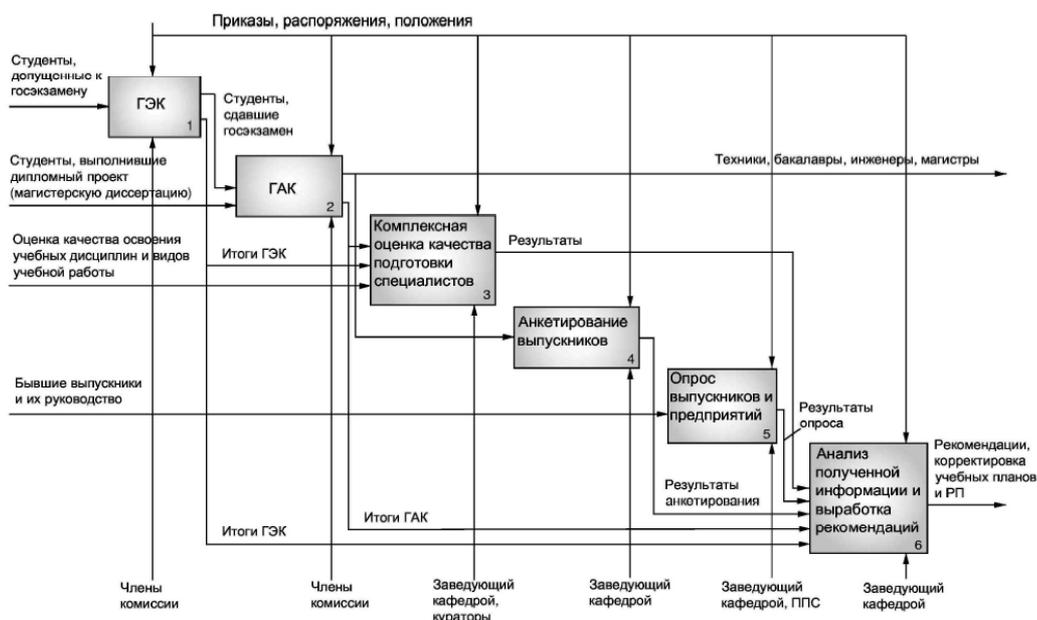
- профессионализм – способность реализовывать профессиональную готовность в конкретной специальности на уровне своей компетентности, приобретаемая личностью в процессе профессиональной деятельности и доведенная до автоматизма.

С учетом этих требований на этапе анализа должны решаться следующие задачи:

- систематизация основных недостающих знаний;
- оценка недостаточной глубины усвоения материалов вводных общетехнических дисциплин, недостаточной интегрированности знаний дисциплин цикла ОПД в цикл СД;
- учет разнообразия и сложности междисциплинарных связей;
- использование опыта других вузов в обучении дисциплин цикла СД.

Решение данных задач способно обеспечить создание ресурса на первом витке спирали жизненного цикла ИС (для новых курсов).

Для развития ресурса на втором и последующих этапах, а также для разработки ЭОР по уже преподаваемым дисциплинам можно использовать данные системы менеджмента качества вуза, где на различных этапах проводится оценка качества подготовки специалистов (рис.3).



**Рисунок 3 – Процесс контроля качества подготовки специалистов**

При контроле качества подготовки специалистов оценивается усвоение учебных дисциплин с использованием результатов ГЭК и ГЭК. Также проводится анкетирование выпускников и анализ отзывов предприятий об их работе, что позволяет осуществить комплексную оценку подготовки специалистов.

Для выполнения анализа и завершения предпроектных работ должны использоваться все перечисленные данные. Кроме того, необходимо проведение работ по систематизации опыта преподавателей в данной области, что определит наиболее сложные для усвоения темы и потребует проработки системы их визуального отображения.

Поскольку, как уже было отмечено, дисциплинам цикла СД присуща интегративность знаний, то необходимо учитывать формирование научных понятий на междисциплинарной основе при обязательном рассмотрении следующих вопросов:

1. Согласованность во времени изучения отдельных учебных дисциплин, при которой каждая из них опирается на предшествующую понятийную базу и готовит обучаемых к успешному усвоению понятий последующей дисциплины.

2. Необходимость обеспечения преемственности и непрерывности в развитии понятий. Понятия, являющиеся общими для ряда дисциплин, должны от дисциплины к дисциплине непрерывно развиваться, наполняться новым содержанием, обогащаться новыми связями.

3. Единство в интерпретации общенаучных понятий.

4. Исключение дублирования одних и тех же понятий при изучении различных предметов.

5. Осуществление единого подхода к раскрытию одинаковых классов понятий.

Широкое использование ЭОР создает возможности для применения новых информационных технологий при отображении различных моделей сложных объектов с учетом взаимосвязей законов и явлений междисциплинарного характера, а также обеспечивает творческий подход.

В блоке разработки необходимо особое внимание уделить процессу формирования образовательного контента в соответствии с образовательным стандартом.

Как правило, в существующих методиках используется модульная система представления материала. Модуль имеет неопределенный объем и может быть приравнен к теме, параграфу или подразделу дисциплины.

Темы могут быть разными по объему, сопровождаться различным числом графических интерпретаций, и для обновления приходится полностью изменять существующий материал, что создает проблемы при его последующей корректировке. В качестве примера можно привести разделы, посвященные современным достижениям науки и техники и перспективам их развития. Данные разделы наиболее быстро морально устаревают и могут подвергаться коррекции на этапах проектирования, тестирования и отладки, что может замедлить введение создаваемого ресурса в эксплуатацию, а соответственно и увеличить время на его разработку или понизить его эффективность в обеспечении учебного процесса.

Данную проблему можно решить путем уменьшения объема модуля и придания ему размерности термина (определения). При этом увеличится его универсальность, упростится процесс замены, а также появится возможность многократного использования созданного объекта в разнообразных комплексах.

Рассмотрим специфику терминологии в рамках технологии обучения специальным техническим дисциплинам. Учебный материал по общетехническим и специальным учебным дисциплинам машиностроительного профиля представляет собой систему научно-технических понятий и специальных сведений в виде научных фактов, теорий, законов и гипотез, отобранных из соответствующих базовых наук, связанных с развитием техники, технологий производств и производственной деятельности людей. Систему технических понятий в этом случае можно рассматривать как скоординированное множество, в котором они находятся в определенных отношениях друг с другом, образуя тем самым целостность, единство суждений об изучаемом объекте.

На выборку технических понятий влияют следующие факторы: требования к формированию профессиональных компетенций, педагогические принципы разработки ЭОР (наглядность, научность, доступность, системность и т.п.). Также при использовании понятия в качестве модуля упрощается формирование его визуальной концепции, т.е. визуализация. В данном случае под термином «визуализация» понимается представление понятия в графической форме. Технические понятия могут принадлежать и использоваться как группой общепрофессиональных дисциплин (ОПД), так и группой специальных дисциплин (СД).

Таким образом, взаимосвязь определений, тем и дисциплин может быть представлена в виде схем, показанных на рис. 4, 5.

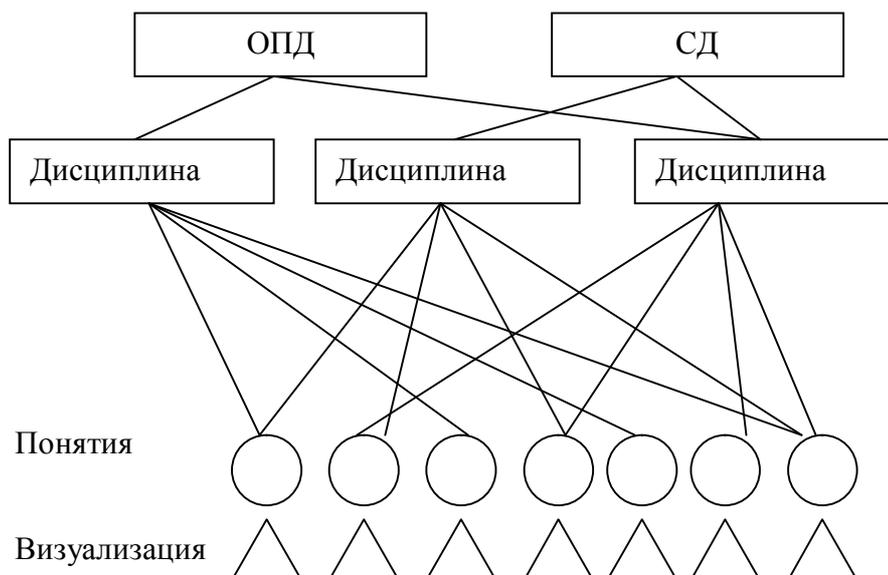


Рисунок 4 – Схема взаимосвязи понятий и соответствующей им визуализации по дисциплинам циклов ОПД и СД

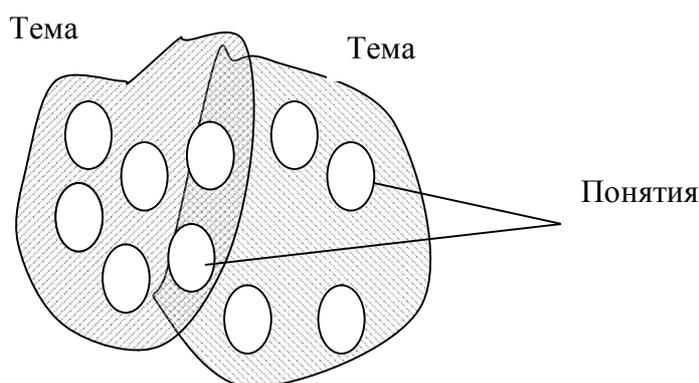


Рисунок 5 – Возможные области распределения определений по темам одного цикла или между темами различных циклов

Под техническим понятием, согласно теории проектирования технологии обучения, понимается обобщенная форма отражения физических, механических и технологических объектов, технических, физических, механических и технологических процессов и явлений посредством фиксации их общих и специфических признаков, свойств и характеристик. В качестве исходных понятий выступают термины, с помощью которых описываются [6]:

– технические объекты, например механизмы машин, металло-

режущие станки и мерительный инструмент, технологическая оснастка;

- технологические процессы обработки деталей машин, сборки, испытания и ремонта;
- различные явления – механические, технологические, физические;
- конструкционные и инструментальные материалы;
- свойства и признаки технических объектов, явлений и процессов и т.д.

Ввиду сложности визуализации технических понятий можно предусмотреть следующие ее формы: простые: схема, рисунок, фото, график, формула, диаграмма, таблица; сложные: 2d-модель, видео, анимация, имитационная модель, 3D-модель.

При проработке на уровне проектирования формы визуализации понятия были сформированы сценарии-задания для специалистов в области мультимедиа, что существенно сократило время на разработку ЭОР. Комплект «понятие-визуализация» становится универсальным элементом создаваемой системы знаний и может быть использован как во всех видах образовательных ресурсов (электронный учебник, конспект лекций, практикум, информационно-справочная система и т.п.), так и при формировании наглядного сопровождения (презентации) всех типов занятий.

При выборе технических понятий, составляющих основу ЭОР, необходимо критично подойти к выбору источников исходных данных. Основой для выбора является государственный образовательный стандарт, а источниками исходных данных могут служить учебная

литература, справочные и методические материалы, статьи в периодических изданиях и т.п., которые могут находиться как в бумажном, так и в электронном виде. Совокупность этих источников можно считать распределенными источниками информации, для которых может применяться методика критериального отбора с выбором части, наиболее полно отвечающей поставленной задаче. В качестве критериев выборки использовались актуальность материала, качество и глубина его изложения, новизна, возможность использования для теоретических и практических курсов, соблюдение стандартов, качество графического материала, грамотность изложения и научно-технический уровень.

Возможно также создание банка данных о применяемости распределенных информационных источников при проектировании ЭОР.

Таким образом, был сформирован общий алгоритм проектирования содержательной части (рис.6).



*Рисунок 6 – Алгоритм проектирования содержательной части ЭОР*

Посредством предлагаемого подхода к проектированию содержательной части учебного материала формируется методика отбора и унификации понятий, а также реализуется системный подход к используемой информации. В результате анализа, проведенного на предпроектном этапе, уменьшается время на тестирование и отладку уже готового образовательного ресурса.

На этапе предпроектной подготовки для новых курсов необходимо проводить предварительный анализ исходной информации, который включает: систематизацию опыта преподавателей, оценку достаточности глубины усвоения материалов вводных общетехнических дисциплин, достаточности интегрированности знаний дисциплин цикла ОПД в цикл СД, учет разнообразия и сложности междисциплинарных связей, а также использование опыта других вузов. При корректировке ресурса помимо перечисленных вопросов учитываются результаты контроля качества подготовки специалиста, получаемые в ходе работы системы менеджмента качества учебного заведения.

На этапе анализа распределенных источников информации выделяются основные группы источников, которые содержат необходимую для обучения информацию. К ним относятся: бумажные источники различного рода, такие, как учебные и учебно-методические пособия, методические указания, статьи, а также источники, имеющие и не имеющие бумажных аналогов, находящиеся в Интернете. Выборка из множества источников ведется с помощью экспертной оценки по указанным ранее ограничениям с учетом года издания, известности коллектива авторов и др. В таком случае выборка принимает следующий вид:

$$R = \sum w_i r_i, \quad (1)$$

где  $r_i$  – оценка распределенного источника по  $i$ -му критерию;

$w_i$  – вес  $i$ -го критерия.

Выделение базовых смысловых единиц определяется государственным образовательным стандартом и учитывает междисциплинарные связи. На данном этапе возможна унификация (или развитие) понятий, используемых на уровне СД, с учетом циклов ЕН и ОПД.

Отбор понятий ведется с учетом наибольшего соответствия целям учебного процесса, т.е. с учетом педагогических принципов и формирования профессиональной компетентности. В качестве основного принципа выделяется системность, требуемая обоими видами ограничений. Сравнивая попарно противоположные допущения, например научность и доступность, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 0, & p_i \notin AB; \\ P = 0,5, & p_i \in AB; \\ 1, & p_i = A, p_i = B, \end{cases} \quad (2)$$

где  $P$  – множество соответствующих выборке понятий;

$p_i$  – рассматриваемые понятия;

$AB$  – отрезок, ограничивающий рассматриваемые понятия.

После того как основные понятия выбраны, необходимо подобрать каждому из них соответствующую форму визуализации. Подготовка к формированию визуального ряда позволит создать исходный сценарий для реализации идеи в виде перечисленных форм, а также оценить рациональность создания сложных имитационных моделей и анимации. Эта задача базируется на данных этапа предпроектной подготовки, поскольку зависит не только от профессиональных компетенций, но и от проблем с усвоением материала и формирования целостных представлений о техническом объекте. Дополнительная информация носит описательный характер, связывает визуальный компонент с определением, формируется в зависимости от специфики предмета цикла СД.

Определения и сопутствующая им визуализация, а также дополнительная информация заносятся в базу знаний и сопровождаются стандартным описанием. При формировании базы знаний необходимо предусмотреть рекомендации по использованию включенных в нее объектов в учебном процессе с учетом его специфики, а также с учетом междисциплинарных связей (возможна трансформация в советующую систему). Основы формирования репозитория в виде базы знаний соответствуют существующим стандартам электронного обучения.

По предложенному алгоритму формирования контента разрабатываются отдельные программные модули, которые планируется объединить в программный комплекс для обеспечения поддержки проектирования ЭОР.

Разработка и использование ЭОР в техническом вузе позволяет фиксировать и сохранять знания наиболее опытных преподавателей, а также создать предпосылки для повышения эффективности обучения за счет введения в образовательный процесс элементов интерактивности и мультимедиа.

Электронные образовательные ресурсы потенциально позволяют сократить объем обязательных занятий, проводимых в аудиториях и лабораториях вуза, без потери качества обучения. В то же время этот потенциал может реализовываться только в случае высокой мотивации студентов к приобретению знаний и их умения выполнять учебную работу самостоятельно. Доступ к ЭОР становится особенно важным на старших курсах, когда многие студенты сочетают учебу с работой.

Современные информационные технологии в ряде случаев позволяют сокращать время создания электронных образовательных ресурсов по сравнению с традиционными образовательными ресурсами, в то же время существенно удлиняя их жизненный цикл благодаря возможности оперативного внесения дополнений и изменений не только в процессе разработки ЭОР, но и при их применении в учебном процессе [8].

Рассмотренный подход не противоречит ранее разработанным концепциям (рис.1), а расширяет и дополняет методику работы с контентом, а также учитывает современные тенденции формирования компетентности, влияние международных и разрабатываемых стандартов электронного обучения. Предлагаемая концепция подготовки контента не зависит от условия выбора среды (оболочки) ЭОР, она достаточно универсальна и позволяет формировать на дальнейших этапах разработки педагогические сценарии для любого вида обучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайнугдинова, Л.Х. Создание и применение электронных учебников (на примере общетехнических дисциплин): монография/ Л.Х. Зайнугдинова. – Астрахань: ЦНТЭП, 1999. – 278 с.
2. Краснова, Г.А. Технология создания электронных обучающих средств/ Г.А.Краснова, А.В.Соловов, М.И.Беляев. - М.: МГИУ, 2002. – 157 с.
3. Осин, А.В. Мультимедиа в образовании: контекст информатизации/ А.В. Осин. - М.: Издательский сервис, 2004. – 186 с.
4. Норенков, И.П. Информационно-образовательные среды на базе онтологического подхода/И.П.Норенков, М.Ю.Уваров// Интернет-порталы: содержание и технологии: сб.науч.ст./ редкол.: А.Н. Тихонов (пред.) [и др.]; ФГУ ГНИИ ИТТ «Информика». - М.: Просвещение, 2005. Вып.3, с. 137 – 149.
5. Гура, В.В. Теоретические основы педагогического проектирования личностно-ориентированных электронных образовательных ресурсов и сред: автореф. дис. ... д-ра пед. наук/В.В.Гура.- Ростов н/ Д, 2007. – 30 с.
6. Радченко, А.К. Проектирование технологии обучения техническим дисциплинам: учеб.пособие/ А.К.Радченко. - Минск: Адукация і выхаванне, 2003. – 105 с.
7. Образцов, П.И. Дидактика высшей школы: учеб.пособие/ П.И.Образцов, В.М.Косухин. – Орел: Академия спецсвязи России, 2004. – 165 с.
8. Аверченков, В.И. Методика проектирования содержательной части электронных образовательных ресурсов для специальных технических дисциплин/ В.И. Аверченков, Е.В. Шкумат, В.В. Надуваев. – Брянск: Вестник БГТУ, 2009. Вып. 3, с. 125 – 134.

### **Аверченков Владимир Иванович**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск  
Доктор технических наук, зав. кафедрой «КТС», профессор (БГТУ)  
Тел. (4832) 56-40-90  
E-mail: aver@tu-bryansk.ru

### **Шкумат Елена Владимировна**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск  
Старший преподаватель кафедры «КТС» (БГТУ)  
Тел. (4832) 58-82-06  
E-mail: staff@tu-bryansk.ru

**Надуваев Владимир Васильевич**

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Кандидат технических наук, доцент кафедры «ТМ» (БГТУ)

Тел. (4832) 58-82-20

E-mail: atali12@rambler.ru

---

V.I. AVERCHENKOV, E.V. SHKUMAT, V.V. NADUVAYEV

## **METHODOLOGY FOR CREATION OF ELECTRONIC EDUCATIONAL RESOURCES IN SPECIAL ENGINEERING SUBJECTS**

*In the paper a generalized approach to designing the content of electronic educational resources on the basis of forming of an integrated methodology for instruction in special engineering disciplines with the wide use of modern information technologies and educational resources is considered.*

**Key words:** *electronic educational resources (EER), designing EER, content formation, visualization of content object*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Zajnutdinova, L.H. Sozdanie i primeneniye jelektronnyh uchebnikov (na primere obwetechnicheskikh disciplin): monografiya/ L.H. Zajnutdinova. – Astrahan': CNTJeP, 1999. – 278 s.
2. Krasnova, G.A. Tehnologija sozdaniya jelektronnyh obuchajuwih sredstv/ G.A.Krasnova, A.V.Solovov, M.I.Beljaev.- M.: MGIU, 2002. – 157 s.
3. Osin, A.V. Mul'timedia v obrazovanii: kontekst informatizacii/ A.V. Osin. - M.: Izdatel'skij servis, 2004. – 186 s.
4. Norenkov, I.P. Informacionno-obrazovatel'nye sredy na baze ontologicheskogo podhoda/I.P.Norenkov, M.Ju.Uvarov// Internet-portaly: sodержanie i tehnologii: sb.nauch.st./ redkol.: A.N. Tiho-nov (pred.) [i dr.]; FGU GNII ITT «Informika». - M.: Prosvewenie, 2005. Vyp.3, s. 137 – 149.
5. Gura, V.V. Teoreticheskie osnovy pedagogicheskogo proektirovaniya lichnostno-orientirovannyh jelektronnyh obrazovatel'nyh resursov i sred: avtoref. dis. ... d-ra ped. nauk/V.V.Gura.- Rostov n/ D, 2007. – 30 s.
6. Radchenko, A.K. Proektirovanie tehnologii obuchenija tehničeskimi disciplinami: ucheb.posobie/ A.K.Radchenko. - Minsk: Adukacija i vyhavanje, 2003. – 105 s.
7. Obrazcov, P.I. Didaktika vysšej shkoly: ucheb.posobie/ P.I.Obrazcov, V.M.Kosuhin. – Orel: Aka-demija specsvjazi Rossii, 2004. – 165 s.
8. Averchenkov, V.I. Metodika proektirovaniya sodержatel'noj chasti jelektronnyh obrazovatel'nyh resursov dlja special'nyh tehničeskikh disciplin/ V.I. Averchenkov, E.V. Shkumat, V.V. Naduvaev. – Brjansk: Vestnik BGTU, 2009. Vyp. 3, s. 125 – 134.

**Averchenkov Vladimir Ivanovich**

Bryansk state technical university, Bryansk

Doctor of technical science, head of department “KTS”, professor (BGTU)

Tel.: 4862-56-40-90

E-mail: aver@tu-bryansk.ru

**Shkuman Elena Vladimirovna**

Bryansk state technical university, Bryansk

Senior teacher of department “KTS” (BGTU)

Tel.: 4862-58-82-06

E-mail: staff@tu-bryansk.ru

**Naduvaev Vladimir Vasilievich**

Bryansk state technical university, Bryansk

Candidate of technical science, associate professor of department “ТМ” (BGTU)

Tel.: 4862-58-82-20

E-mail: atali12@rambler.ru

УДК 377.5 : 006.015.5

А.В. МОРОЗОВА, С.В. ДЬЯЧЕНКО, Т.А. НОЗДРАЧЕВА, Ю.К. СОТНИКОВ

## СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРАКТИКООРИЕНТИРОВАННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

*В статье анализируется опыт разработки содержания образовательной программы среднего профессионального образования по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» в соответствии с ФГОС специальности в условиях многоуровневой практикоориентированной подготовки кадров для машиностроительного производства.*

*Ключевые слова:* автоматизация технологических процессов, содержание образования, многоуровневая система подготовки кадров, машиностроительное производство, практикоориентированная подготовка специалистов

Принципиальным отличием федерального образовательного стандарта нового поколения является заложенная в них идеология разработки содержания образования «по достижению конечного результата», в связи с чем, системообразующим компонентом становятся характеристики профессиональной деятельности выпускников, наличие которых и степень сформированности которых определяет уровень конкурентоспособности молодых специалистов в условиях современного производства. В отличие от предыдущих поколений образовательных стандартов, где критерием успешного освоения студентом определенной образовательной программы являлось получение знаний, умений и навыков, соответствующих требованиям к минимуму содержания обучения (т.е. фиксированный объем учебного материала в соответствие с определенным перечнем заложенных в стандарте дидактических единиц), то для третьего поколения ФГОС СПО основой является характеристика профессиональной деятельности выпускника, в которую входит описание области, объектов и основных видов профессиональной деятельности, представляющих собой относительно автономные профессиональные функции, каждая из которых основана на использовании специфических объектов, условий, инструментов, и имеет специфический характер и результаты труда, детерминированные «обобщенным работодателем».

Анализ научных публикаций позволяет выделить некоторые наиболее актуальные для современного инженерного образования проблемы. Инвариантная часть ФГОС профессионального образования в области подготовки инженерно-технических кадров имеет приоритетную ориентацию на получение фундаментальной теоретической подготовки. Однако, на региональном рынке труда наиболее востребованы молодые специалисты, имеющие практические навыки работы на производственном оборудовании, владеющие современными методами обработки данных технических изменений для контроля параметров качества реализации технологических процессов и систем автоматизации, а также устойчивые навыки пользования специализированными CAD-CAM пакетами компьютерных программ [1], [2].

Модернизация российского машиностроения эффективна при наличии кадровой стратегии на подготовку и привлечение специалистов инженерно-технического профиля, приоритетно имеющих практикоориентированную подготовку в области автоматизации технологических процессов машиностроительных производств. В этой связи при разработке содержания образовательной программы СПО по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств» коллектив авторов считает наиболее целесообразным сделать акцент на практикоориентированность при формировании ее вариативной части, а также при разработке уровней системы компетентностной оценки конкурентоспособности молодых специалистов на рынке труда.

Компетенция – базовое качество индивидуума, имеющее причинное отношение к эффективности и/или наилучшему на основе критериев исполнению в работе или в других ситуациях. Базовое качество означает, что компетенция является очень глубоко лежащей и ус-

тойчивой частью человеческой личности и может предопределять поведение человека во множестве ситуаций и рабочих задач. Причинное отношение означает, что компетенция предопределяет или вызывает определенное поведение или исполнение. На основе критериев – значит, что компетенция действительно прогнозирует плохое или хорошее исполнение, которое измеряется при помощи конкретного критерия, или стандарта [3].

Различают пять типов базовых качеств специалиста: мотивы, психофизиологические особенности, Я-концепция, знание и навык. Тип и уровень компетенции имеет практический смысл для планирования человеческих ресурсов. При этом знания и навыки имеют тенденцию быть видимыми и относительно поверхностными характеристиками людей, их относительно просто развить, при этом тренинг является наиболее рентабельным способом укрепления и сохранения этих способностей у сотрудников. Я-концепция, свойства и мотивы, присущие профессиональной компетенции специалиста, более скрыты, «глубоки» и спрятаны в самой сердцевине личности. Компетенции на основе Я-концепции (установки, ценности и т.д.) можно изменить при помощи длительного тренинга, психотерапии и/или упражнений для позитивного развития, но это требует значительных усилий и времени и является для работодателя мало-рентабельным. Мотивы и психофизиологические особенности очень сложно оценить и развить, поэтому, как считают американские исследователи в области кадрового ассессмента Л. и С. Спенсер, рентабельнее отбирать людей по наличию этих характеристик [3].

Многие компании выбирают сотрудников, основываясь на компетенциях поверхностных знаний и навыков, и либо предполагают, что новички имеют скрытые компетенции, связанные с мотивами и психофизиологическими свойствами, либо их можно привить при помощи хорошего руководства. При выполнении работы по должности специалиста среднего звена, например, техника, преимущество за знаниями и навыками в сфере профессиональной деятельности. В сложных работах, при прогнозировании наилучшего исполнения, компетенции относительно важнее, чем связанные с заданием навыки, умственные способности или дипломы, поэтому в таких работах (ведущий инженер, начальник цеха, главный технолог и т.д.) наилучшего исполнителя отличает мотивация, межличностные навыки и навыки политеса – и все они являются компетенциями [3].

При изучении компетенций чаще всего применяются критерии наилучшее исполнение (определяется статистически как одно стандартное отклонение от среднего исполнения, уровень которого достигает приблизительно один лучший человек из десяти в конкретной рабочей ситуации) и эффективное исполнение (обычно означает «минимально приемлемый» уровень работы, крайний ограничительный уровень, ниже которого сотрудник будет считаться некомпетентным для этой работы) [4]. Термин «одно стандартное отклонение» (статистическое обозначение  $\sigma$ ) используется для определения наилучшего исполнителя по двум причинам. Во-первых, многие исследования документально подтвердили экономическую ценность этого уровня исполнения для компании. Во-вторых, чтобы улучшить исполнение, компании должны использовать характеристики наилучших исполнителей в качестве «шаблона» или «плана» для отбора и развития сотрудников. Причина неудачи подобной попытки всегда кроется в подборе и обучении посредственных исполнителей – среднего текущего уровня исполнения в компании. По мнению немецких психологов J.E. Hunter, F.L. Schmidt и M.K. Judiesch управленческий процесс достигает результативной мотивации, если одно стандартное отклонение добавляет 19-120 % к стоимости конечного продукта (например, для сложных работ одно стандартное отклонение обходится в 48% заработной платы исполнителей) [4].

В этой связи особое значение приобретает категоризация компетенций на две группы – пороговые компетенции и дифференцирующие компетенции. Пороговые компетенции являются неотъемлемой характеристикой (обычно знания или базовые навыки), в которой каждый выполняющий работу должен быть минимально эффективен, но которая не разграничивает средних исполнителей от наилучших. Дифференцирующие компетенции позволяют отличить наилучших исполнителей от средних. В этой связи, переход системы профессионального образования на ФГОС, основу которого составляет компетентностная модель специалиста, с одной стороны, позволяет в процессе обучения «отсеять» ту часть обучающихся, кото-

рая не может преодолеть пороговый уровень компетенции, а, с другой стороны, провести отбор наиболее перспективных выпускников на основе уровней дифференцирующих компетенций специалистов с целью их дальнейшего обучения.

Этот переход особенно актуален для специалистов среднего звена, приоритетом подготовки которых является практикоориентированность получаемого профессионального образования. По-нашему мнению, практикоориентированность подготовки специалиста среднего звена является мерой сформированности практических навыков специалиста-техника, который реализует свою деятельность в условиях производства, основанного на экономике знаний и ориентированного на выпуск конкурентоспособной продукции, удовлетворяющей установленным нормативам ее качества.

На основе принятой в современном рекрутменте персонала [3] компетентностной модели максимальной эффективности работы практикоориентированность подготовки специалиста среднего звена, по нашему мнению, приоритетно обеспечивают следующие компетенции:

- ориентация на обслуживание клиента (имеет общие представления о потребностях клиента → фокусирует внимание на собственных способностях → предоставляет минимально требуемое обслуживание → держит клиента в курсе выполнения его задания ...);

- самоконтроль в работе с неудачами (постоянно винит себя во всем → находит логические объяснения или винит в неудаче других или обстоятельства → занимает нейтральную позицию → берет на себя ответственность → учится на своих ошибках → действует, чтобы исправить ошибки ...);

- поиск информации (задает прямые вопросы → спрашивает тех, кто ближе всего к проблеме → старается понять причину ситуации → обращается к другим специалистам → проводит исследование под руководством опытного специалиста ...);

- ориентация на достижение (сосредоточенность на задании → желание выполнить работу хорошо → работает над тем, чтобы соответствовать стандартам других → создает собственную меру совершенства...);

- техническая экспертиза (первичная подготовка → элементарная профессиональная подготовка → профессиональная подготовка → ...; сопротивляется приобретению новых знаний и умений → нейтрален → поддерживает имеющиеся технические знания → расширяет базу знаний → приобретает новые или другие знания ...);

- инициатива (демонстрирует настойчивость → действует в случае появившейся возможности → действует заблаговременно...; работает независимо → работает в дополнительное время на результат → делает больше, чем требуется ...);

- аналитическое мышление (не занимается анализом → разбивает проблемы на простые списки заданий и действий → анализирует взаимосвязи между основными частями проблемы → расставляет приоритеты в решении проблемы → видит множественные отношения в решении проблемы ...);

- командная работа и сотрудничество (нейтрален → участвует в совместной работе → делится с коллегами информацией → выражает уважение к достижениям других членов команды → защищает идеи и мнения → ...);

- концептуальное мышление (мыслит только конкретно → использует здравый смысл и свой предшествующий опыт → наблюдает соответствия, тенденции, взаимосвязь данных → применяет сложные концепции...);

- забота о порядке (поддерживает в порядке организованное рабочее место → добивается ясности в формулировке задания и полученных данных → проверяет собственную работу → контролирует качество работы других ...).

Для специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» в рамках реализации ФГОС СПО в соответствии с требованиями к результатам освоения основной профессиональной образовательной программы техник должен обладать общими компетенциями (ОК), и профессиональными компетенциями (ПК), которые сформированы в пять подгрупп: контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации (по отраслям), организация работ по монтажу, ремонту и наладке систем

автоматизации (по отраслям), эксплуатация систем автоматизации (по отраслям), разработка и моделирования несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов (по отраслям) и проведение анализа характеристик и обеспечение надежности систем автоматизации (по отраслям).

При разработке примерного учебного плана по специальности СПО 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» авторами были реализованы следующие направления исследований, позволяющие реализовать практикоориентированность как обобщенную компетентность специалистов среднего звена в области автоматизации технологических процессов и производств:

– сравнительный анализ компетентностной модели максимальной эффективности работы технических специалистов среднего звена и системы требований к результатам освоения основной профессиональной образовательной программы ФГОС СПО по специальности 220703 (таблица 1);

– экспертная оценка приоритетности для технического специалиста среднего звена (техника) компонентов компетентностной модели максимальной эффективности работы (с применением метода анализа иерархий и системы поддержки принятия решений Expert Decide) (рисунок 1-3);

– формирование вариативной части ОПОП с учетом полученного на основании экспертной оценки вектора приоритетов в структуре компетенций специалистов (таблица 2).

ФГОС СПО по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» предъявляет следующие требования к результатам освоения основной профессиональной образовательной программы.

Техник должен обладать следующими общими компетенциями, включающими в себя способность:

ОК 1. Понимать сущность и социальную значимость своей будущей профессии, проявлять к ней устойчивый интерес.

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 3. Принимать решения в стандартных и нестандартных ситуациях и нести за них ответственность.

ОК 4. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 5. Использовать информационно-коммуникативные технологии в профессиональной деятельности.

ОК 6. Работать в коллективе и команде, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.

ОК 7. Брать на себя ответственность за работу членов команды (подчиненных), результат выполнения задания.

ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 9. Ориентироваться в условиях частой смены технологий в профессиональной деятельности.

ОК 10. Исполнять воинскую обязанность, в том числе с применением полученных профессиональных знаний (для юношей).

Техник должен обладать профессиональными компетенциями, соответствующими основным видам профессиональной деятельности:

1. Контроль и метрологическое обеспечение средств и систем автоматизации (по отраслям).

ПК 1.1 Проводить анализ работоспособности измерительных приборов и средств автоматизации.

ПК 1.2 Диагностировать измерительные приборы и средства автоматического управления.

ПК 1.3 Производить проверку измерительных приборов и средств автоматизации.

2. Организация работ по монтажу, ремонту и наладке систем автоматизации (по отраслям)

ПК 2.1 Выполнять работы по монтажу систем автоматического управления с учетом специфики технологического процесса.

ПК 2.2 Проводить ремонт технических средств и систем автоматического управления.

ПК 2.3 Выполнять работы по наладке систем автоматического управления.

3. Эксплуатация систем автоматизации (по отраслям)

ПК 3.1 Выполнять работы по эксплуатации систем автоматического управления с учетом специфики технологического процесса.

ПК 3.2 Контролировать и анализировать функционирование параметров систем в процессе эксплуатации.

ПК 3.3 Снимать и анализировать показания приборов.

4. Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов (по отраслям)

ПК 4.1 Проводить анализ систем автоматического управления с учетом специфики технологических процессов.

ПК 4.2 Выбирать приборы и средства автоматизации с учетом специфики технологических процессов.

ПК 4.3 Составлять схемы автоматизированных узлов, блоков, устройств и систем автоматического управления.

ПК 4.4 Рассчитывать параметры типовых схем и устройств.

ПК 4.5 Оценивать и обеспечивать эргономические характеристики схем и систем автоматизации.

5. Проведение анализа характеристик и обеспечение надежности систем автоматизации (по отраслям)

ПК 5.1 Осуществлять контроль параметров качества систем автоматизации.

ПК 5.2 Проводить анализ характеристик надежности систем автоматизации.

ПК 5.3 Обеспечивать соответствие состояния средств и систем автоматизации требованиям надежности.

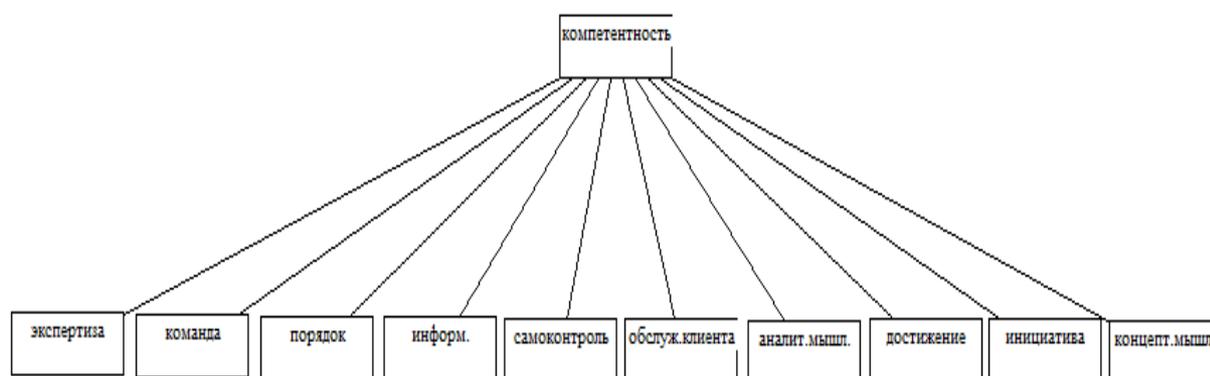
В ходе разработки вариативной части примерного учебного плана в соответствии с ФГОС СПО по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» (базовая подготовка) с целью реализации практикоориентированности как обобщенной компетенции специалиста среднего звена (техника) был проведен сравнительный анализ компетентностной модели максимальной эффективности работы технических специалистов среднего звена и системы требований к результатам освоения основной профессиональной образовательной программы ФГОС СПО по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» (базовая подготовка), результаты которого представлены таблицей 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ компетентностной модели максимальной эффективности работы технических специалистов среднего звена и системы требований к результатам освоения основной профессиональной образовательной программы ФГОС СПО по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» (базовая подготовка)

Компоненты компетентностной модели максимальной эффективности работы технических специалистов среднего звена	Система требований к результатам освоения основной профессиональной образовательной программы					
	Общие компетенции (ОК)	Профессиональные компетенции (ПК)				
		ПК 1	ПК 2	ПК 3	ПК 4	ПК 5
Экспертиза	ОП2, ОП3, ОП4, ОП5, ОП8	ПК1.1, ПК1.2, ПК1.3	ПК2.1, ПК2.2, ПК2.3	ПК3.1, ПК3.2, ПК3.3	ПК4.1, ПК4.2, ПК4.3, ПК4.4, ПК4.5	ПК5.1, ПК5.2, ПК5.3
Аналитическое мышление	ОП2, ОП3, ОП4, ОП5, ОП8, ОП9	ПК1.1, ПК1.2, ПК1.3	ПК2.1, ПК2.2, ПК2.3	ПК3.1, ПК3.2, ПК3.3	ПК4.1, ПК4.2, ПК4.3, ПК4.4, ПК4.5	ПК5.1, ПК5.2, ПК5.3
Командная работа и сотрудничество	ОП3, ОП6, ОП7		ПК2.4			
Забота о порядке	ОП2, ОП6, ОП7, ОП10	ПК1.1, ПК1.2, ПК1.3	ПК2.1, ПК2.2, ПК2.3			
Поиск информации	ОП1, ОП2, ОП3, ОП4, ОП5, ОП8, ОП9	ПК1.1, ПК1.2, ПК1.3		ПК3.2, ПК3.3	ПК4.1, ПК4.2, ПК4.3	ПК5.1, ПК5.2, ПК5.3
Ориентация на обслуживание клиента	ОП2, ОП3, ОП6	ПК1.2				
Самоконтроль, работа с неудачами	ОП1, ОП3, ОП5, ОП6	ПК1.1	ПК2.1, ПК2.2, ПК2.3, ПК2.4	ПК3.2, ПК3.3	ПК4.1, ПК4.2, ПК4.3, ПК4.4, ПК4.5	ПК5.1, ПК5.2, ПК5.3
Ориентация на достижение	ОП1, ОП2, ОП3, ОП6, ОП8, ОП9		ПК2.4			

продолжение таблицы 1						
Инициатива	ОП2, ОП7, ОП8, ОП9		ПК2.4			
Концептуальное мышление	ОП1, ОП4, ОП5, ОП8, ОП9, ОП10		ПК2.3 ПК2.4	ПК3.2, ПК3.3	ПК4.1, ПК4.3, ПК4.5	ПК5.1, ПК5.2, ПК5.3

С целью выявления долевой приоритетности в системе компетенций, обеспечивающих реализацию практикоориентированной подготовки специалиста, на основании метода МАИ была сформирована иерархия, представленная на рисунке 1.



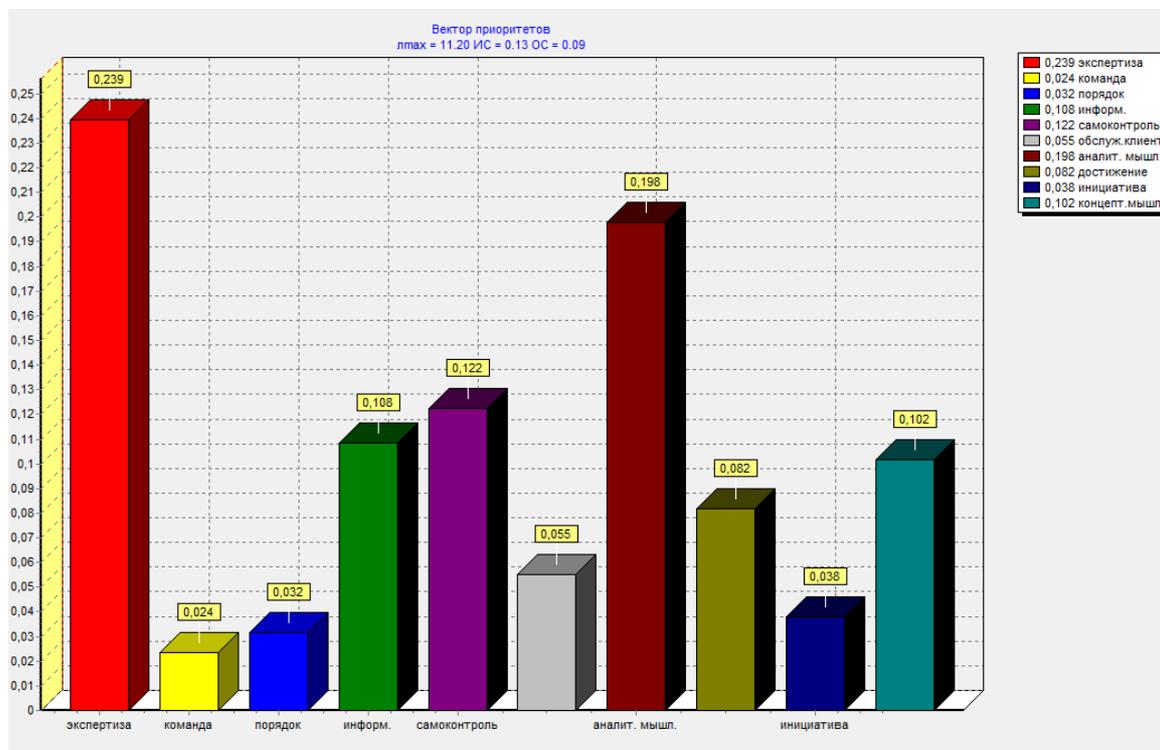
**Рисунок 1 – Иерархия компонентов компетентности техника в соответствии с компетентностной моделью максимальной эффективности работы технических специалистов среднего звена**

	экспертиза	команда	порядок	информ.	самоконтроль	обслуж. клиента	аналит. мышл.	достижение	инициатива	концепт. мышл.
экспертиза	1.000	0.167	0.200	0.333	0.500	0.167	1.000	0.200	0.167	0.250
команда	0.167	1.000	2	5	5	2	6	2	3	4
порядок	0.200	2	1.000	0.250	0.333	0.500	0.200	1.000	0.500	0.333
информ.	0.333	5	4	1.000	1.000	4	0.333	3	2	0.500
самоконтроль	0.500	5	3	1.000	1.000	3	0.500	4	3	1.000
обслуж. клиента	0.167	2	2	0.250	0.333	1.000	0.167	2	3	0.333
аналит. мышл.	1.000	6	5	3	2	6	1.000	1.000	5	3
достижение	0.200	2	2	0.333	0.250	0.500	1.000	1.000	2	3
инициатива	0.167	3	2	0.500	0.333	0.333	0.200	0.500	1.000	0.200
концепт. мышл.	0.250	4	3	2	1.000	3	0.333	0.333	5	1.000

**Рисунок 2 – Таблица сравнения приоритетов компонентов компетентности техника в соответствии с компетентностной моделью максимальной эффективности работы технических специалистов среднего звена**

Экспертно-аналитическое оценивание вектора приоритетов в системе компонентов компетентности техника на основе компетентностной модели максимальной эффективности работы технических специалистов среднего звена [1] было проведено с группами экспертов специалистов-производственников и специалистов-преподавателей, результаты которой по-

казали (рис. 2 и рис. 3), что для специалиста среднего звена в области автоматизации технологических процессов и производств дифференцирующими компетенциями являются подгруппы «КОМАНДА» (Командная работа и сотрудничество) и «ПОРЯДОК» (Забота о порядке), а дифференцирующими компетенциями являются подгруппы компетенций «ЭКСПЕРТИЗА» (Глубина и широта специальных технических знаний) и «АНАЛИТ. МЫШЛЕНИЕ» (Аналитическое мышление).



**Рисунок 3 – Вектор приоритетов компонентов компетентности техника в области автоматизации технологических процессов и производств в соответствии с компетентностной моделью максимальной эффективности работы технических специалистов среднего звена**

Проведенный анализ позволит специалистам выпускающей кафедры предложить для формирования вариативной части примерного учебного плана по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» следующие дисциплины, позволяющие реализовать задачи практикоориентированной подготовки специалистов и повысить их профессиональную востребованность на региональном рынке труда: «Чертежи и схемы по специальности», «Промышленная экология», «Системы автоматизированного проектирования электрических схем», «Средства измерений», «Правила устройства электроустановок», «Микроконтроллеры и микропроцессоры», «Гидравлика и пневматика», «Компьютерный анализ данных технических измерений».

Перечисленные учебные дисциплины совместно с учебными дисциплинами инвариантной части ФГОС СПО по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» позволят преподавательскому коллективу выпускающей кафедры и в дальнейшем успешно реализовать методику практикоориентированной подготовки кадров в области автоматизации технологических процессов и производств [2]. Она основана на поэтапном вовлечении студентов в учебно-исследовательскую работу, которая завершается подготовкой дипломных проектов с практическим подтверждением (действующим макетом или устройством). Эффективность этой методики обучения неоднократно подтверждалась высокими результатами участия студентов в международных, всероссийских и региональных конкурсах и научно-практических конференциях. В частности, в рамках программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») студент Лосев О. получил I место, грант, а также возможность заключения государственного

контракта для реализации своего проекта, студенты профильной кафедры «Электротехнические дисциплины» становились дипломантами и лауреатами Всероссийского конкурса научно-исследовательских и творческих работ молодежи «Меня оценят в XXI веке» и Всероссийского конкурса достижений талантливой молодежи «Национальное достижение России».

### **ВЫВОД**

ФГОС СПО по специальности 220703 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)» позволяет образовательным учреждениям реализовать задачи практикоориентированной подготовки кадров, сформировать приоритет технических знаний, аналитического и концептуального мышления, умения самостоятельно контролировать результаты своей работы, самостоятельного исправления допущенных ошибок как дифференцирующих компетенций, и командной работы, сотрудничества, заботы о порядке и следовании принятым стандартам как пороговых компетенций, что позволит значительно повысить качество подготовки технических кадров, отбора студентов в процессе обучения и дифференциации их при поступлении в вузы по системе непрерывного профессионального образования.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Морозова, А.В. Управление профессиональной социализацией студентов в условиях многоуровневой практикоориентированной системы подготовки кадров для машиностроения. Монография [Текст] / А.В. Морозова; Под ред. д.т.н., проф. А.В. Киричека - М.: Издательский дом «Спектр», 2010. - 230 с.
2. Морозова, А.В. Применение квалиметрических методов в оценке специалиста технического профиля [Текст] / А.В. Морозова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2010. - № 5(283). – С. 105-110.
3. Спенсер, Л. Компетенции в работе [Текст] / Л. Спенсер, С. Спенсер; Пер с англ. А. Яковенко. – М.: Издательство ГИППО, 2010. – 384 с.
4. Hunter, J.E. Individual differences in output variability as a function of job complexity [Text] / J.E. Hunter, F.L. Schmidt, M.K. Judiesch. – Journal of Applied Psychology. – 1990. - № 75 (1). – P. 28-42.

#### **Морозова Анна Валентиновна**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел  
Кандидат социологических наук, доцент кафедры ТМиКТИ  
Тел. (4862) 55-55-24  
E-mail: notiostu@gmail.com

#### **Дьяченко Сергей Викторович**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электротехнические дисциплины»  
Тел. (4862) 55-51-45  
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

#### **Ноздрачева Таисия Алексеевна**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел  
Заведующий лабораторией  
Тел. (4862) 55-51-45  
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

#### **Сотников Юрий Кузьмич**

ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г. Орел  
Заведующий лабораторией  
Тел. (4862) 55-51-45  
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

---

A.V. MOROZOVA, S.V. DYACHENKO, T.A. NOZDRACHYOVA, SOTNIKOV Yu. K.

## **FORMATION SPECIFICITY IN PRACTICE-ORIENTED CONTENTS FOR EXPERT TRAINING FOR MECHANICAL ENGINEERING AUTOMATION**

*In the paper the experience of the educational program development for the secondary vocational training for specialty 220703 "Automation of engineering procedure and production (according to branches)" in accordance with the FSS for a specialty under conditions of multilevel practice-oriented training personnel for mechanical engineering.*

**Key words:** *workflow automation, education content, multilevel system for personnel training, mechanical engineering, practice-oriented training of specialists*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Morozova, A.V. Upravlenie professional'noj socializaciej studentov v uslovijah mnogourovnevoj praktikoorientirovannoj sistemy podgotovki kadrov dlja mashinostroenija. Monografija [Tekst] / A.V. Morozova; Pod red. d.t.n., prof. A.V. Kiricheka - M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. - 230 s.
2. Morozova, A.V. Primenenie kvalimetriceskikh metodov v ocenke specialista tehničeskogo profilja [Tekst] / A.V. Morozova // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii – 2010. - № 5(283). – S. 105-110.
3. Spenser, L. Kompetencii v rabote [Tekst] / L. Spenser, S. Spenser; Per s angl. A. Jakovenko. – M.: Izdatel'stvo GIPPO, 2010. – 384 s.
4. Hunter, J.E. Individual differences in output variability as a function of job complexity [Text] / J.E. Hunter, F.L. Schmidt, M.K. Judiesch. – Journal of Applied Psychology. – 1990. - № 75 (1). – P. 28-42.

### **Morozova Anna Valentinovna**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of sociological science, associate professor of department “”  
Tel.: 4862-55-55-24  
E-mail: notiostu@gmail.ru

### **Dyachenko Sergey Viktorovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of technical science,  
head of department “Electro technical disciplines”  
Tel.: 4862-55-51-45  
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

### **Nozdrachyeva Taisiya Alekseevna**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Laboratory chief  
Tel.: 4862-55-51-45  
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

### **Sotnikov Yuriy Kuzmich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Laboratory chief  
Tel.: 4862-55-51-45  
E-mail: fspo-ti@rambler.ru

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 620.179.16

А.С. ЗУБАРЕВ

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ СТЕНОК ТРУБ ВНУТРЕННИХ ГАЗОПРОВОДОВ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ**

*Проведены исследования точности измерений при автоматической регистрации результатов ультразвукового измерения толщины стенок труб внутренних газопроводов жилых зданий в зависимости от параметров сканирования и вида контактной жидкости. Для различных пространственных положений контролируемой области ультразвукового измерения толщины стенок труб установлены оптимальные направления и скорости сканирования и сформулированы критерии обеспечения акустического контакта.*

***Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), толщиномер, акустический контакт, контактная жидкость, скорость сканирования.*

В большинстве случаев ультразвуковая толщинометрия изделий (стенок труб, корпусов и др.) осуществляется в статическом режиме путем установки пьезопреобразователя в заданное положение на поверхности изделия и фиксации показаний толщиномера.

Рассмотрим возможность проведения измерений толщины стенок труб в динамическом режиме. Для этих целей был использован ультразвуковой толщиномер УТ-98 «СКАТ», который позволяет осуществлять непрерывное сканирование поверхности (рельефа поверхности) изделия с одновременной автоматической регистрацией результатов измерений толщины. При этом появляется возможность регистрировать рельеф изделия в области сканирования. Однако возникает вопрос о допустимых скоростях сканирования (перемещения пьезопреобразователя) и точности измерений в динамическом режиме. Последнее особенно важно, поскольку при динамическом режиме измерений локальные изменения качества акустического контакта, возникающие при движении ПЭП по контролируемой поверхности, очевидно, могут создавать дополнительные погрешности.

Исследования данного вопроса проводились с помощью толщиномера УТ-98 «СКАТ» с датчиком пути, оснащенный пьезоэлектрическим преобразователем П112-5-Ø10/2-01. Указанный толщиномер позволяет вести измерения толщины с шагом около 0,1 мм и автоматической регистрацией результатов измерения с шагом 2 мм. При этом на каждом шаге в 2 мм в памяти толщиномера фиксируется минимальная измеренная толщина, которая может быть выведена на дисплей компьютера или на печать.

Измерения производились:

- с различной скоростью (20 мм/с, 30 мм/с, 40 мм/с, 60 мм/с, 100 мм/с);
- в различных пространственных положениях области контроля (горизонтальное, боковое, движение вверх, движение вниз, потолочное);
- при сканировании использовались различные контактные жидкости (глицерин и обойный клей).

Эксперименты проводились на заранее подготовленной поверхности с нанесенной смазкой так, чтобы исключить влияние изменения качества поверхности на результаты измерений. За максимально допустимое отклонение результатов измерения от реальной толщины изделия была принята погрешность измерений прибора – 0,1 мм.

При обработке результатов толщинометрии проводился подсчет количества и длины участков с потерей акустического контакта для различных скоростей и направлений скани-

рования, а также анализировалась зависимость между точностью измерений толщины в динамическом режиме и количеством потерь акустического контакта в процессе сканирования.

В условиях проведения экспериментов для использованного оборудования было установлено следующее:

1. С увеличением скорости сканирования во всех пространственных положениях растет погрешность измерений (рис. 1);

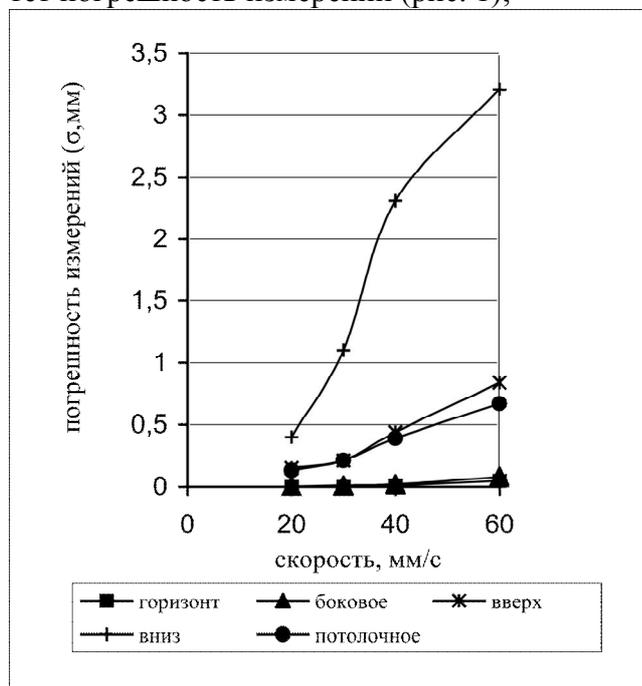


Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности измерений от скорости сканирования

– при движении вверх – не более 20 мм/с; при этом отклонение измеренной толщины от номинальной - не более 0,15 мм с вероятностью 95%, количество потерь акустического контакта – 2,9% проконтролированной длины;

– в «потолочном» положении – не более 20 мм/с; при этом отклонение измеренной толщины от номинальной - не более 0,13 мм с вероятностью 95%, количество потерь акустического контакта – 2,5 % проконтролированной длины.

4. При движении в направлении «вниз» измерения нецелесообразны из-за недопустимого количества потерь акустического контакта и низкой точности контроля. Так в результате стечения контактной жидкости, неравномерности сканирования, образования жидкостного клина и биений датчика, в данных, полученных автоматической регистрацией толщинометрии, более 10% проконтролированной длины занимают потери акустического контакта, а точность не превышает 0,4 мм.

5. Использование в качестве контактной жидкости глицерина в 3,5 раза, по сравнению с обойным клеем, уменьшает количество обрывов акустического контакта.

6. Предельная скорость сканирования во всех положениях 100 мм/с, выше которой прибор не фиксирует все точки пути. Так при сканировании в горизонтальном положении количество зафиксированных точек (индикация происходит через 2 мм) вместо 150 (300мм) колебалась от 124 до 144, что соответствует 248 и 288 мм пути.

7. Зависимость между количеством потерь акустического контакта и скоростью сканирования монотонна (рис. 3).

8. Зависимость между количеством потерь акустического контакта и точностью толщинометрии монотонна (рис. 4).

2. Наилучшие результаты толщинометрии получены при сканировании в горизонтальном и боковом положениях;

3. Оптимальная скорость сканирования при различных пространственных положениях областей сканирования составила:

– в горизонтальном положении – не более 60 мм/с; при этом отклонение измеренной толщины от номинальной - не более 0,05 мм с вероятностью 95%, количество потерь акустического контакта – не более 1,4% проконтролированной длины (рис. 2);

– в боковом положении – не более 60 мм/с, при этом отклонение измеренной толщины от номинальной не более 0,08 мм с вероятностью 95%, количество потерь акустического контакта – 2,1% проконтролированной длины;

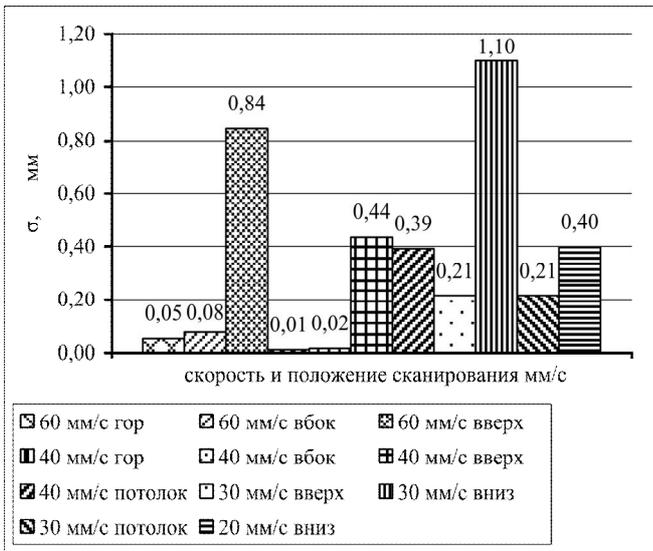


Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности измерений от положения и скорости сканирования

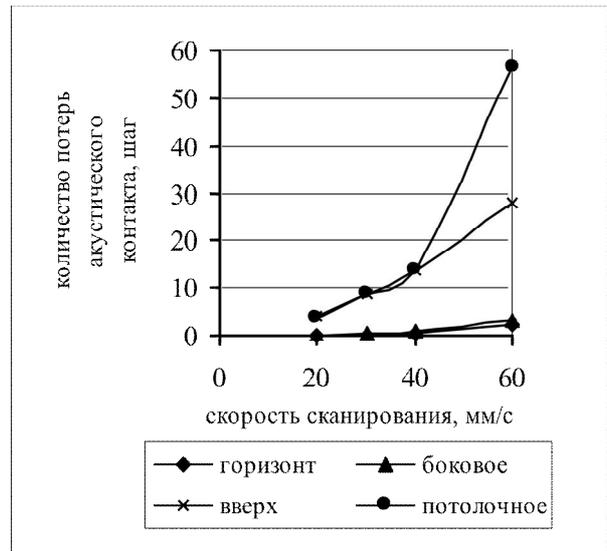


Рисунок 3 – Зависимость количества потерь акустического контакта от скорости сканирования

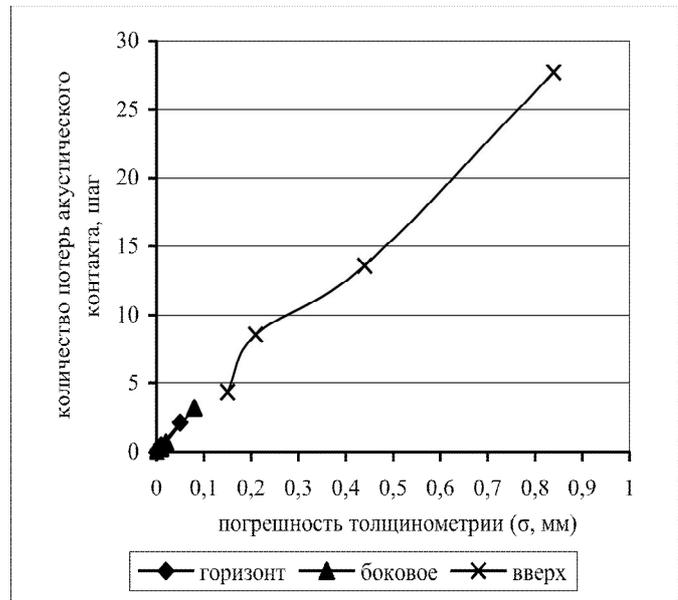
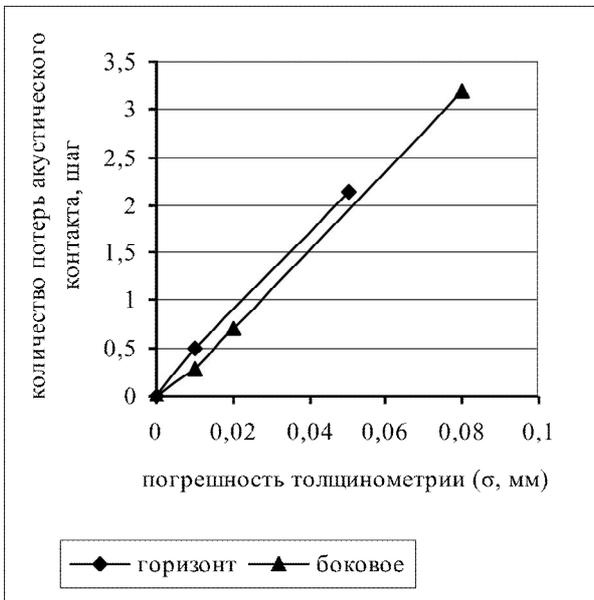


Рисунок 4 – Зависимости количества потерь акустического контакта от точности толщинометрии

Основываясь на анализе полученных экспериментальных данных были установлены оптимальные параметры ультразвукового контроля стальных труб внутренних газопроводов жилых зданий, такие как скорость сканирования и тип контактной жидкости. Также следует отметить преимущества измерений толщины стенок труб в динамическом режиме, главным из которых является построение рельефного рисунка контролируемой поверхности с указанием толщины стенки трубы в каждой конкретной точке. Данная дефектограмма позволяет нам судить о степени коррозионного повреждения и остаточной толщине стенки трубы и сделать прогноз относительно пригодности трубы к дальнейшей эксплуатации.

### ВЫВОДЫ

1. Экспериментальным путем были установлены оптимальные параметры ультразвукового контроля стальных труб внутренних газопроводов жилых зданий, такие как скорость сканирования и тип контактной жидкости.
2. Количество потерь акустического контакта при динамических измерениях толщины стенки трубы зависит от скорости сканирования и типа контактной жидкости. Предельно до-

пустимая скорость сканирования не должна превышать 100 мм/с (для исследуемого оборудования).

3. Для контроля коррозионных повреждений и степени износа стенок труб внутренних газопроводов жилых зданий целесообразно применять ультразвуковые толщинометры имеющие в своем составе датчик пути, позволяющий сделать изображение рельефа контролируемой поверхности посредством динамического измерения толщины в реальном времени, что дает возможность определить степень коррозионного износа трубы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербинский, В.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.Г. Щербинский, Н.П. Алешин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 496 с.
2. Алешин, Н.П. Повышение выявляемости объемных дефектов / Н.П. Алешин, В.Ю. Баранов, Л.Ю. Могильнер // Дефектоскопия. – 1985. – № 7. – С. 24 – 32.
3. Горная, С.П. Физические основы ультразвуковых методов контроля / С.П. Горная. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 75 с.
4. Ермолов, И.Н. Контроль ультразвуком: Краткий справочник / И.Н. Ермолов. – М.: НПО ЦНИИТ-МАШ, 1992. – 86 с.
5. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
6. ГОСТ 3262 – 75 Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия. Дата введения 01.01.1977 - М.: Издательство Стандартов, 1975. – 7 с.
7. СНиП 3.05.02-88 Газоснабжение. М: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1988. – 33 с.
8. СНиП 3.05.05-84 Технологическое оборудование и технологические трубопроводы. - М: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1985. – 40 с.

#### **Зубарев Алексей Сергеевич**

ОАО «АК «Транснефтепродукт»

Специалист 1 категории

142155, Московская область, Подольский район, поселок Львовский, улица Садовая, д. 7, кв. 43

тел. 8-926-568-39-43, (495)915-98-66

E-mail: aZubarev@aktnp.ru, alexey\_zoubarev@list.ru;

---

A.S. ZUBAREV

## **RESEARCH OF PARAMETERS OF ULTRASONIC MEASUREMENT OF A THICKNESS OF WALLS OF PIPES OF INTERNAL GAS PIPELINES OF RESIDENTIAL BUILDINGS AT DYNAMIC MEASUREMENTS**

*Researches of accuracy of measurements are conducted in the given work at automatic registration of results of ultrasonic measurement of a thickness of walls of pipes of internal gas pipelines of residential buildings depending on parameters of scanning and a kind of a contact liquid. For various spatial positions of controllable area of ultrasonic measurement of a thickness of walls of pipes optimum directions and speeds of scanning are established and criteria of maintenance of acoustic contact are formulated.*

**Key words:** *ultrasonic testing, piezoelectric transducer (PET), thickness gage, acoustic contact, contact fluid, speed of scanning.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Werbinskij, V.G. Ul'trazvukovoj kontrol' svarnyh soedinenij / V.G. Werbinskij, N.P. Aleshin. – М.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2000. – 496 s.
2. Aleshin, N.P. Povyshenie vyjavljaemosti ob'emnyh defektov / N.P. Aleshin, V.Ju. Baranov, L.Ju. Mogil'ner // Defektoskopija. – 1985. – № 7. – S. 24 – 32.
3. Gornaja, S.P. Fizicheskie osnovy ul'trazvukovyh metodov kontrolja / S.P. Gornaja. – М.: Mashino-stroenie-1, 2007. – 75 s.

4. Ermolov, I.N. Kontrol' ul'trazvukom: Kratkij spravochnik / I.N. Ermolov. – M.: NPO CNIIT-MASh, 1992. – 86 s.
5. Ermolov, I.N. Teorija i praktika ul'trazvukovogo kontrolja / I.N. Ermolov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 240 s.
6. GOST 3262 – 75 Truby stal'nye vodogazoprovodnye. Tehnicheskie uslovija. Data vvedenija 01.01.1977 - M.: Izdatel'stvo Standartov, 1975. – 7 s.
7. SNiP 3.05.02-88 Gazosnabzhenie. M: Gosudarstvennyj komitet SSSR po delam stroitel'stva, 1988. – 33 s.
8. SNiP 3.05.05-84 Tehnologicheskoe oborudovanie i tehnologicheskie truboprovody. - M: Gosudarstvennyj komitet SSSR po delam stroitel'stva, 1985. – 40 s.

**Zubarev Aleksey Sergeevich**

Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Sciences (MGUPI)

The expert of 1 category

142155, Moscow Region, Podolsk area, Settlement Lvovsky, Sadovaya street, 7, 43,

Tel.: +7 903 6820269

# **ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА** **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 620.179.112

И.О. КОБЗЕВ, Е.В. ПАХОЛКИН

## **МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПОДШИПНИКЕ КАЧЕНИЯ**

*Описано методическое обеспечение исследований, связанных с оценкой максимальной температуры в зоне трения. Исследования базируются на использовании электрических параметров микроконтактирования. Объекты исследования – подшипники качения. В работе представлены актуальность проблемы, сущность предложенного расчетно-экспериментального метода, указаны фундаментальные и прикладные области применения потенциальных результатов.*

***Ключевые слова:** электрические параметры микроконтактирования, температура зоны трения.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность оценки температуры в зоне трения объясняется тем, что температура является фактором, который определяет условия протекания практически всех процессов и явлений фрикционного взаимодействия. Изменение температурных режимов при трении приводит к изменению микро- и макрогеометрии деталей трибосопряжения, к изменению несущей способности смазочного слоя, к изменению состава смазочного материала (как результат термодеструкции), к изменению условий граничной смазки (процессы адсорбции и десорбции компонентов смазочного материала на трущихся поверхностях) и др. В прикладных аспектах оценка и прогнозирование температуры в зоне трения имеет важнейшее значение при выборе смазочных материалов (СМ), оценке скорости термической деструкции СМ, исследовании качества процессов модификации поверхностей трения ремонтно-восстановительными составами (составы на основе минералов), при входном контроле опор качения с ресурсным режимом смазывания [1].

Особое место среди перечисленных задач занимает проблема оценки качества смазки трущихся поверхностей, особенно, если речь идет о режимах граничного и смешанного трения, когда снижение интенсивности изнашивания обеспечивается качеством «третьего тела», представленного поверхностными граничными слоями смазочного материала [2]. Прочность (защитная способность) таких слоев определяется динамикой процессов адсорбции и десорбции компонентов СМ на трущихся поверхностях, а также интенсивностью термодеструкции СМ. Исследование тепловых процессов в зоне трения является необходимым условием для полноценного решения данной проблемы.

Максимальная температура внутри узла трения реализуется на фактических пятнах контакта трущихся поверхностей. В узлах трения качения такие пятна образуются в местах значительных напряжений и относительных скоростей скольжения вследствие явления микропроскальзывания тел качения относительно дорожек качения. Температура этих пятен складывается из:

- начальной температуры;
- приращения объемной температуры;
- приращения поверхностной температуры;
- приращения температуры непосредственно на фактических пятнах контакта.

При оценке максимальной температуры трибоузла экспериментальными методами возникают существенные затруднения. В работах [3, 4] был предложен расчетно-экспериментальный метод оценки данной температуры, основанный на совместном использовании тепловой модели А.В. Чичинадзе и электрических параметров микроконтактирования.

В данной работе предлагается методика экспериментальной проверки возможности использования таких электрических параметров как нормированное интегральное время электрического контактирования (НИВ) и средняя частота микроконтактирования (СЧМ), принятых в качестве диагностических в соответствии с разработанным расчетно-экспериментальным методом определения максимальной температуры трибосопряжений.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Физическая основа параметров НИВ и СЧМ, а также теоретическое обоснование возможности их использования для оценки временных параметров трения изложены в работе [4]. Временные параметры трения – среднее время цикла трения и среднее время цикла охлаждения в свою очередь входят в математическую модель, имеющую вид:

$$\begin{aligned} g_{max(i)} = & \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\tau_N \cdot W_{\text{ТП}} \cdot d_r \cdot a^{*0,5}_{(i)}}{A_r \cdot t_T \cdot \left[ 4 \cdot \lambda^*_{(i)} \cdot a^{*0,5}_{(i)} + \lambda^*_{(i)} \cdot (\pi \cdot d_r \cdot v_{\text{СК}})^{0,5} \right]} \\ & + \frac{\alpha_{\text{ТП}} \cdot \Psi_{V(i)} \cdot W_{\text{ТП}} \cdot b_{\text{эф}(i)}}{\lambda_{(i)} \cdot A_a \cdot t_T} \cdot \left( 0,6 - 0,4 \cdot \sum_{n=1}^5 \frac{1}{n^2} \cdot \exp(-0,333 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot \tau) \right) \\ & + \frac{\alpha_{\text{ТП}} \cdot W_{\text{ТП}}}{m_{(i)} \cdot c_{(i)}} \cdot (10 - 45 \cdot K_{(i)} \cdot t_{\text{охл}}) + g_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau_N$  – временной фактор мощности трения;

$W_{\text{ТП}}$  – работа сил трения за один цикл;

$d_r$  – диаметр среднего пятна касания;

$a^*_{(i)}$ ,  $\lambda^*_{(i)}$  – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала элемента узла трения при температуре равной средней поверхностной температуре номинальной площади контакта;

$A_r$  – фактическая площадь контакта;

$t_T$  – среднее время цикла трения;

$v_{\text{СК}}$  – скорость относительного перемещения поверхностей при трении;

$\alpha_{\text{ТП}}$  – коэффициент разделения тепловых потоков для  $i$ -го элемента пары трения;

$\Psi_{V(i)}$  – коэффициент, учитывающий понижение температуры за счет ее передачи в дополнительный теплопоглощающий объем;

$b_{\text{эф}(i)}$  – эффективная глубина передачи теплоты соответствующего элемента за время трения;

$\lambda_{(i)}$  – коэффициент теплопроводности материала при температуре 20 °С;

$A_a$  – номинальная площадь контакта элементов трения;

$n$  – число членов ряда;

$\tau$  – относительное время трения (текущее время в одном цикле трения);

$m_{(i)}$  – масса элемента трения (внешнего кольца, тела качения, внутреннего кольца);

$c_{(i)}$  – удельная теплоемкость элемента пары трения;

$K_{(i)}$  – коэффициент, характеризующий теплопоглощающую и теплоотдающую способность элемента трения;

$t_{\text{охл}}$  – интервал времени между циклами трения (среднее время цикла охлаждения);

$\vartheta_0$  – начальная температура пары трения.

Данная модель является работоспособной при значениях чисел Пекле, удовлетворяющих условию:

$$Pe = \frac{v_{\text{ск}} \cdot d_r}{a} \geq 20. \quad (2)$$

Использование расчетно-экспериментального метода [2, 4] определения температуры в зоне трения возможно при реализации полужидкостного режима смазки, когда параметры НИВ принимает значения, отличные от 0 и 1 (граничные случаи). Значения же СЧМ, исходя из критерия работоспособности модели, должны отвечать условию (3), которое вытекает из (2):

$$\text{СЧМ} \geq \frac{20 \cdot a_{(i)} \cdot \text{НИВ}}{\left( \left( \frac{8 \cdot r_1 \cdot h_{1\text{max}}}{v_1} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{F_a}{A_C \cdot b_{01} \cdot C \cdot \sigma_s} \right)^{\frac{1}{2 \cdot v_1}} \right)^2}, \quad (3)$$

где НИВ – измеренное значение НИВ;

СЧМ – измеренное значение СЧМ;

$a_{(i)}$  – коэффициент температуропроводности материала неподвижного кольца при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ ;

$r_1$  и  $h_{1\text{max}}$  – соответственно радиус закругления и максимальная высота микронеровностей контролируемой поверхности;

$v_1$  и  $b_{01}$  – параметры опорной кривой поверхности трения более твердого элемента (в рамках поставленной задачи – поверхности неподвижного кольца);

$F_a$  – нагрузка в контакте;

$A_C$  – контурная площадь контакта (для приближенных расчетов допускается принять  $A_C = A_a$ ).

$C \cdot \sigma_s$  – твердость материала неподвижного кольца по Бринеллю.

В идеале диапазон измерения СЧМ должен определяться на основании времени существования температурных всплесков  $10^{-3} \dots 10^{-9}$  с, и составлять  $10^3 \dots 10^9$  Гц [4].

#### УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Все операции, связанные с измерением параметров НИВ и СЧМ, а также средней объемной температуры неподвижного кольца, необходимо проводить в лабораторных помещениях при нормальных климатических условиях:

- температура воздуха  $15\text{-}35^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная влажность воздуха не более 80 % при  $25^{\circ}\text{C}$ ;
- атмосферное давление  $84,0\text{-}106,7$  кПа ( $630\text{-}800$  мм рт. ст.).

#### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Оборудование для измерений должно состоять из:

- привода;
- устройства нагружения подшипника;
- электронных средств контроля;
- средств коммутации с объектом (токосъемные устройства).

Привод должен обеспечивать вращение вала узла с заданной скоростью в соответствии с реализуемыми алгоритмами контроля. Устройство нагружения должно создавать радиальное нагружение подшипника. Электронные средства контроля должны осуществлять измерение значений диагностических параметров НИВ и СЧМ, их регистрацию (сбор и хранение данных). При этом необходимо также обеспечивать возможность измерения приращения

температуры наружного кольца в различных точках. Средства коммутации должны обеспечивать надежный электрический контакт электронных средств контроля с элементами узла, электрически связанными с наружным и внутренним кольцами подшипника (корпусом и валом узла).

В качестве привода может использоваться привод узла, применяемый в изготавливаемом или ремонтируемом изделии, или стендовое оборудование, диапазон устанавливаемых частот вращения которого, должен перекрывать диапазон эксплуатационных частот работы контролируемых типов узлов изготавливаемых или ремонтируемых изделий.

Устройство нагружения должно обеспечивать возможность регулирования радиальной нагрузки в диапазоне допустимых значений (определяемых условиями эксплуатации опоры качения).

Для измерения диагностических параметров допускается применять электронные средства, удовлетворяющие нижеприведенным требованиям:

- диапазон измерения НИВ – от 0 до 1 с шагом  $10^{-7}$  (при времени измерения параметра 1 с);
- диапазон измерения СЧМ должен лежать в пределах от 0 до  $20 \cdot 10^6$  Гц (минимальные требования);
- диапазон измерения температуры неподвижного кольца подшипника – от 15 до 60 °С с разрешением 0,1 °С (на основании теоретического расчета, приведенного в [4]).

Приращение температуры в различных участках наружного кольца будет неодинаковым, ввиду неравномерности нагрева (наибольший нагрев будет происходить вблизи зоны максимального нагружения). Для оценки приращения средней объемной температуры значения температуры предлагается измерять в 4-6 диаметрально противоположных точках неподвижного кольца и усреднять полученные значения.

### **ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Подготовка объекта диагностирования производится в соответствии с регламентированной действующей на предприятии технической документацией (ТД) процедурой подготовки узлов к сборке.

Подготовка оборудования включает в себя следующее:

- контролируемый подшипник устанавливают на стенд контроля;
- через электроизоляционную муфту присоединяется вал контролируемого узла к валу привода;
- устанавливается устройство нагружения;
- подключаются электронные средства контроля через средства коммутации к неподвижным и подвижным элементам узла, например, к корпусу и валу, электрически связанными с кольцами контролируемого подшипника;
- проводится подготовка привода и электронных средств контроля согласно рекомендациям эксплуатационной документации на них (руководство по эксплуатации, паспорт).

После завершения операций подготовки следует этап проведения эксперимента, включающий следующие действия:

- устанавливается значение нагрузки, равное 10 % от эксплуатационной.
- для равномерного распределения смазочного материала по деталям подшипника скорость вращения выбирается минимальной (10 % от эксплуатационной). При дальнейших измерениях режимы должны соответствовать эксплуатационным;
- регулированием радиальной нагрузки необходимо добиться жидкостного режима работы подшипника;
- фиксируется температура воздуха в помещении;
- при работе подшипника в данном режиме проводится регистрация параметров НИВ, СЧМ, а также значений температуры наружного кольца (результаты измерений заносятся в протокол);

– выполняется приращение нагрузки, достаточное для увеличения параметра НИВ на значение, существенно превышающее погрешность измерения параметра при текущем его уровне. Осуществляется работа подшипника в заданном режиме до тех пор, пока значение средней объемной температуры, оцениваемой по 4-6 точкам неподвижного кольца, перестанет изменяться (до окончания переходного режима);

– фиксируется температура воздуха в помещении;

– измеряются значения НИВ, СЧМ.

– производятся действия, связанные с приращением нагрузки, до тех пор, пока режим трения не перейдет в граничный, что можно зафиксировать по уровню значений НИВ.

### ТРЕБОВАНИЯ К ПРОТОКОЛУ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Протокол должен содержать следующие данные:

– дату проведения эксперимента;

– наименование подшипника: условное обозначение, стандарт;

– конструктивные параметры подшипника: диаметр отверстия внутреннего кольца  $d$ , наружный диаметр наружного кольца  $D$ ;

– частота вращения внутреннего кольца  $n_{\theta}$ ;

– радиальная нагрузка  $F_r$ ;

– наименование электронных средств контроля;

– используемые контролируемые параметры и время их измерения  $T_{и}$ ;

– температура воздуха в помещении -  $\vartheta_{\text{возд}}$ , измеряемая перед каждым изменением режима работы подшипника;

– зарегистрированные значения контролируемых параметров НИВ и СЧМ, для соответствующих значений  $F_r$ , представленные в виде диаграмм с приложением цифровых данных в виде файлов на электронных носителях;

– значения температуры наружного кольца в 4-6 точках, а также соответствующее приращение средней объемной температуры наружного кольца;

– заключение о результатах эксперимента.

Обработка результатов измерения включает в себя следующее:

– по измеренным значениям температуры в 4-6 точках для каждого установившегося уровня НИВ и СЧМ, соответствующих фиксированным значениям  $F_r$ , определяется среднее значение избыточной объемной температуры;

– строится график зависимости приращения средней объемной температуры от значений НИВ и СЧМ

– полученные значения приращений средней объемной температуры наружного кольца сравниваются с теоретическими;

– делаются выводы об адекватности предложенной математической модели [3, 4] и работоспособности предложенного метода.

*Работа выполняется при поддержке аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)”, код проекта 10423.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахолкин, Е.В. Разработка на основе электрических методов трибомониторинга диагностического обеспечения узлов трения с ресурсным режимом смазывания [Текст] / Е.В. Пахолкин, А.М. Сидоров // Известия ОрёлГТУ. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2007, №4-3/268(535). – С. 65-70.

2. Пахолкин, Е. В. Предпосылки использования методов электрического контроля при оценке состояния и функционирования в трибосопряжениях «третьего тела» [Текст] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - №4 / 276 (575). – 2009. – С. 116-121.

3. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарико-подшипнике. Часть 1. Математическая модель максимальной температуры [Текст] / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2010. – № 6 – С. 143-150.

4. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 2. Применение диагностических параметров электрической группы [Текст] / Е.В. Пахолкин, И.О. Кобзев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2010. – № 6-2 (284). – С. 34-40.

**Кобзев Илья Олегович**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. 89208085387  
E-mail: K87-I07O19@yandex.ru

**Пахолкин Евгений Васильевич**

ФГОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. 89208112686  
E-mail: eugene\_p@bk.ru

I.O. KOBZEV, E.V. PAKHOLKIN

**METHODICAL SUPPORT OF THE RATED-EXPERIMENTAL  
ELECTRORESISTIVE VALUATION METHOD OF THE MAXIMUM  
TEMPERATURE IN THE ROLLING BEARING**

*Methodical support of the researches connected to an estimation of the maximum temperature in a zone of a friction is described. Researches are based on electrical parameters microcontacting. Objects of research – rolling bearings. In operation the problem urgency, essence of the offered rated-experimental method are presented, specified fundamental and application areas of application of potential results.*

**Key words:** *electrical microcontacting parameters, temperature of a friction zone.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Paholkin, E.V. Razrabotka na osnove jelektricheskikh metodov tribomonitoringa diagnosticheskogo obespechenija uzlov trenija s resursnym rezhimom smazyvanija [Tekst] / E.V. Paholkin, A.M. Sidorov // Izvestija OrjolGTU. – Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii, 2007, №4-3/268(535). – s. 65-70.
2. Paholkin, E. V. Predposylki ispol'zovanija metodov jelektricheskogo kontrolja pri ocenke sostojanija i funkcionirovanija v tribosoprjazhenijah «tret'ego tela» [Tekst] // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii. - №4 / 276 (575). – 2009. – s. 116-121.
3. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temeperatury v shariko-podshipnike. chast' 1. matematicheskaja model' maksimal'noj temperatury [Tekst] / I.O. Kobzev, E.V. Paholkin // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii – 2010. – № 6 – s. 143-150.
4. Kobzev, I.O. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki maksimal'noj temperatury v sharikopod-shipnike. Chast' 2. Primenenie diagnosticheskikh parametrov jelektricheskoy grupy [Tekst] / E.V. Paholkin, I.O. Kobzev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehnik i tehnologii – 2010. – № 6-2 (284). – s. 34-40.

**Kobzev Iliya Olegovich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”  
Tel.: 89208085387  
E-mail: K87-I07O19@yandex.ru

**Paholkin Evgeniy Vasilievich**

State University – Education Science Production Complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor of department “Instrument engineering, metrology and certification”  
Tel.: 89208112686  
E-mail: eugene\_p@bk.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 и вверху – 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.ostu.ru](http://www.ostu.ru).

*Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.*

*Адрес учредителя*

Федеральное государственное 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.ostu.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции*

Федеральное государственное 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.ostu.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Технический редактор Григорьева О.Ю.  
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 16.05.2011 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,8.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГОУ ВПО «Госунивесритет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.