

**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.  
**Астафичев П.А.** д-р юрид. наук, проф.  
**Иванова Т.Н.** д-р техн. наук, проф.  
**Колчунов В.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Константинов И.С.** д-р техн. наук, проф.  
**Новиков А.Н.** д-р техн. наук, проф.  
**Попова Л.В.** д-р экон. наук, проф.  
**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук, проф.

**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 редколлегии**

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
41-98-03  
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»

© ОрелГТУ, 2010

## Содержание

### Естественные науки

<i>Аллахвердиев Р.А.</i> Когезионная трещина в полосе (балке).....	3
<i>Гордон В.А., Бруслова В.И.</i> Асимптотические решения линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами в полярных координатах.....	7
<i>Искендерова С.П.</i> Зарождение трещины в пластине переменной толщины с круговым отверстием.....	14
<i>Авдеева Е.С., Кузнецова В.Н.</i> Математическое описание процесса внедрения частиц грунта в материал рабочего органа.....	21
<i>Кузнецов С.А., Владимиров А.В., Лысянский В.А., Харламов П.В.</i> Определение силового передаточного отношения планетарного нагружателя с замкнутым контуром.....	26
<i>Гасанов Ш.Г.</i> Когезионная трещина на границе раздела упругих сред.....	30

### Моделирование технологических процессов

<i>Фёдоров Т.В.</i> Моделирование гибки трубы с дорном наматыванием в deform-3d.....	36
--	----

### Конструирование, расчеты, материалы

<i>Хромов В.Н., Корень В.Н., Родичев А.Ю.</i> Исследование перекосов корпуса балансира и полюси балансира устройства заднего моста автогрейдера.....	39
<i>Петров Н.В., Москвитин С.А., Злобин С.Н.</i> Расчет параметров дроссельного синхронизатора гидравлических вырубных прессов.....	46
<i>Шишкарев М.П.</i> Определение эксплуатационных показателей предохранительных пружинно-кулачковых муфт.....	52
<i>Иващенко Ю.М.</i> Исследование влияния хрома на прочностные и пластические свойства стали 20Гл для отливок железнодорожного транспорта.....	58

### Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Борзенков М.И., Трубицин А.Ф.</i> Совершенствование технологии производства заготовок для изделий, получаемых холодной высадкой.....	61
<i>Исаев А.Н., Лебедев А.Р.</i> Расчеты диаметров зубьев многозубого дорна для обработки отверстий в деталях из трубчатых заготовок.....	65
<i>Селифонов В.С.</i> Исследование взаимосвязи силовых характеристик с режимами резания в процессе механической обработки резинотканевой конвейерной ленты.....	70

### Приборостроение и биотехнические системы

<i>Илюшин М.В., Афанасьев А.А., Басов О.О.</i> Психоакустический классификатор кадров при низкоскоростном кодировании широкополосного речевого сигнала.....	73
<i>Санников Д.П.</i> Расширение динамического диапазона работы фотоэлектронных умножителей.....	78
<i>Катков О.Н.</i> Уменьшение структурной сложности динамической нейросети при распознавании речи.....	83
<i>Иванов Ю.Б.</i> Исследование характеристик микроощного светочастотного преобразователя.....	89
<i>Терентьев С.В., Шишков И.И.</i> О проблеме визуализации изображений в информационной системе компьютерной томографии.....	94

### Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Сычев С.Н., Подмастерьев К.В., Пахолкин Е.В., Пузырев С.Г., Гаврилина В.А.</i> Применение метода главных компонент для выявления межмолекулярных характеристик, входящих в явление когезии.....	99
<i>Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Пузачев А.А., Хохлов А.Д.</i> Автоматическая система регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов.....	106
<i>Марков В.В.</i> Лабораторная установка для экспериментальных исследований признаков и параметров трибосопряжений.....	112
<i>Комова В.И.</i> Возможности использования хелата ванадия (V) с БГК и N-БФГА в качестве электродноактивного компонента жидкостного ионоселективного электрода в целях разработки метода контроля и диагностики сточных вод промышленных предприятий на содержание ионов ванадия (V).....	116

*Editorial council*

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

© OSTU, 2010

## Contents

### Natural science

<i>Allakhverdiyev R.A.</i> Cohesion crack in stripe (beam).....	3
<i>Gordon V.A., Brusova V.I.</i> Asymptotic solutions of typical differential equations with the variable coefficients in the polar coordinates.....	7
<i>Iskenderova S. P.</i> Nucleation of crack in a plate of variable thickness with a circular hole.....	14
<i>Avdeeva E.S., Kuznetsova V.N.</i> Mathematical description of process of introduction of particles of a soil in a material of working member.....	21
<i>Kuznetsov S.A., Vladimirov A.V., Lysyanskiy V.A., Kharlamov P.V.</i> Definition force of mechanical advantage planetary loading device with closed circuit.....	26
<i>Hasanov Sh.H.</i> Cohesive crack at the interface of elastic media.....	30

### Process modeling

<i>Fedorov T.V.</i> The modelling pipe bending by winding with mandrel in the environment of deform-3D.....	36
---	----

### Construction, calculation, material

<i>Chromov V.N., Korenev V.N., Rodichev A.U.</i> The research of skews of the beam case and beam device half-axle of the motor grader rear axle.....	39
<i>Petrov N.V., Moskvitin S.A., Zlobin S.N.</i> Calculation of parameters of the throttle synchronizer hydraulic cutting press.....	46
<i>Shishkarev M.P.</i> Definition of operational parameters safety law-spring coupling.....	52
<i>Ivaschenkov Y.M.</i> Research of influence of chrome on durability and plastic properties of the steel 20ГЛ for castings the railway transportation.....	58

### Machine building technology and toolware

<i>Borzenkov M.I., Trubitsin A.F.</i> The development of the production engineering of the billet for the products being obtained by the cold debarkation.....	61
<i>Isayev A.N., Lebedev A.R.</i> Calculations of teeth diameters of many-teeth mandrel for processing of apertures in tools from pipe bars.....	65
<i>Selifonov V.S.</i> Investigation of the relationship of force performance with cutting during machining rubber conveyor belts.....	70

### Instrument making and biotechnological system

<i>Ilushin M.V., Afanasjev A.A., Basov O.O.</i> The psychoacoustic qualifier of segments in low bit-rate coding of wideband speech signal.....	73
<i>Sannikov D.P.</i> Volume expansion work photoelectronik multiplier.....	78
<i>Katkov O.N.</i> Diminution structural complexity dynamical neuronet by recognition speech.....	83
<i>Ivanov Yu.B.</i> Reseach description micropower light-frequency performer.....	89
<i>Terentev S.V., Shishkov I.I.</i> By the problem of images visualization in an information system of computer tomography.....	94

### Tests, control, diagnostics and quality control

<i>Sychev S.N., Podmasteriev K.V., Paholkin E.V., Gavrilina V.A., Pysirev S.G.</i> Application of the method of principal component for revealing of the intermolecular characteristics entering into phenomenon «cohesion» .....	99
<i>Kosmodamianskiy A.S., Vorobyev V.I., Pugachev A.A., Khokhlov A.D.</i> Automatic temperature control system of locomotives tractive electric machines.....	106
<i>Markov V.V.</i> Laboratory mounting for the experimental researches the signs and parameters of friction objects.....	112
<i>Komova V.I.</i> The possibilities of usage of vanadium (V) with bgk and n-bfga chelate as a component with the electrochemical function in a liquid ion-selective electrode with a view of creation of control and diagnostics methods of vanadium (V) ions content in an industrial production wastewater.....	116

УДК 539.375

Р.А. АЛЛАХВЕРДИЕВ

**КОГЕЗИОННАЯ ТРЕЩИНА В ПОЛОСЕ (БАЛКЕ)**

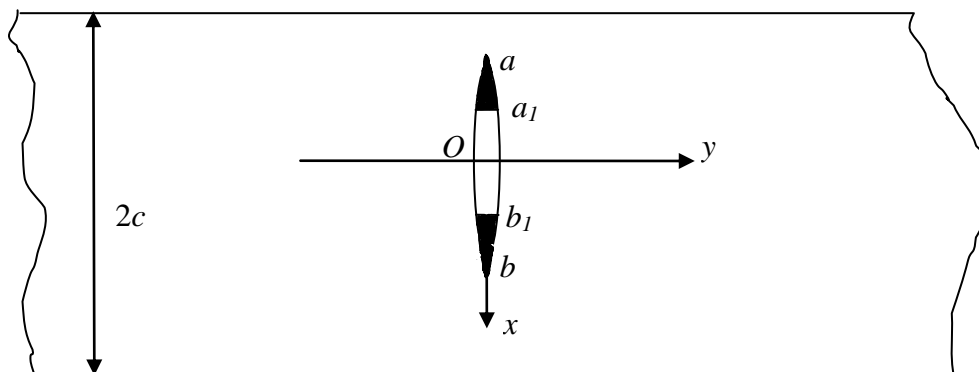
*Рассматривается задача механики разрушения для полосы (балки), ослабленной сквозной прямолинейной трещиной со связями между берегами в концевых зонах, когда полоса изгибается в ее плоскости системой внешних нагрузок.*

**Ключевые слова:** *силы сцепления, трещина со связями между берегами в концевых зонах, изгиб полосы.*

*The problem of fracture mechanics for a band (beam), weakened by a through rectilinear crack with interfacial bonds in the end zone when the band is bent in its plane system of external loads.*

**Key words:** *cohesive forces, crack with interfacial bonds in the end zone, bending band.*

Рассмотрим однородную изотропную полосу (балку). Обозначим через  $2c$  и  $2h$  соответственно ширину и толщину полосы. Выбор декартовых координат и обозначения поясняются на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Расчетная схема задачи**

Декартовы координаты  $x, y$  в срединной плоскости балки являются плоскостью симметрии. Полоса ослаблена одной сквозной прямолинейной трещиной. Используется модель трещины со связями между берегами в концевой зоне. По мере нагружения полосы силовой нагрузкой в концевых областях трещины будут возникать зоны предразрушения, которые моделируем как области ослабленных межчастичных связей материала.

Рассмотрим случай, когда трещина направлена перпендикулярно боковым граням полосы (рисунок 1). Пусть на полосу действуют внешние нагрузки (изгибающие моменты, равномерно распределенное по длине полосы давление или сосредоточенные силы), расположенные в срединной плоскости полосы. Считается, что грани полосы перпендикулярные плоскости  $Oxy$  свободны от внешних напряжений. Взаимодействие берегов зоны предразрушения моделируется путем введения между берегами полосы предразрушения связей, имеющих заданную диаграмму деформирования. Физическая природа таких связей и размеры области предразрушения зависят от вида материала. В общем случае он представляет собой нелинейный закон деформирования. При этом размеры концевых зон предразрушения заранее неизвестны и должны быть определены. Пусть ось  $ox$  системы координат  $Oxy$  совмещена с линией трещины ( $a \leq x \leq b$ ). Для математического описания взаимодействие бе-

регов полосы предразрушения считаем, что между берегами имеются связи (силы сцепления между частицами материала балки), закон деформирования которых задан. При действии силовой нагрузки в балке в связях, соединяющих берега зоны предразрушения, будут возникать нормальные  $q_y(x)$  и касательные усилия  $q_{xy}(x)$ . Величины этих напряжений неизвестны. Граничные условия задачи на берегах трещины будут

$$\begin{aligned} \sigma_y - i\tau_{xy} &= 0 \quad \text{при } y=0, \quad a_1 \leq x \leq b_1 \\ \sigma_y - i\tau_{xy} &= q_y(x) - iq_{xy}(x) \quad \text{при } y=0, \quad a \leq x < a_1 \text{ и } b_1 < x \leq b \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения задачи необходимо дополнить соотношением, связывающим раскрытие трещины в концевых зонах и усилия в связях. Дополнительное соотношение представим в виде [1,2]

$$(v^+ - v^-) - i(u^+ - u^-) = C(x, \sigma) [q_y(x) - iq_{xy}(x)] \quad (2)$$

где функцию  $C(x, \sigma)$  можно рассматривать как эффективную податливость связей, зависящую от их натяжения,  $\sigma = \sqrt{q_y^2 + q_{xy}^2}$  – модуль вектора усилий в связях.

Напряженно-деформированное состояние в окрестности трещины определяем приближенно в том смысле [3], что будем удовлетворять граничным условиям задачи на контуре трещины (условиям (1)); и требовать, чтобы на значительном расстоянии от трещины с концевыми зонами предразрушения напряженное состояние в балке совпадало напряженному состоянию, определяемым функциями [3]

$$\begin{aligned} \Phi_0(z) &= A_0 z^3 + A_1 z^2 + A_2 z + A_3; \\ \Psi_0(z) &= B_0 z^3 + B_1 z^2 + B_2 z + B_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Эти функции (3) в зависимости от значений коэффициентов  $A_j$  и  $B_j$  ( $j=0,1,2,3$ ) определяют напряженное состояние в полосе (балке) без трещины. Следуя Н.И.Мусхелишвили [3], краевую задачу (1) сведем к задаче линейного сопряжения граничных значений функций  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$ . Решение задачи линейного сопряжения получено в виде

$$\begin{aligned} \Phi(z) &= \frac{\sqrt{(z-a)(z-b)}}{2\pi i} \int_a^b \frac{f(x)dt}{\sqrt{(t-a)(t-b)(t-z)}} + \sqrt{(z-a)(z-b)}P_n(z) + \frac{1}{2} [\Phi_0(z) - \Psi_0(z)] \\ \Omega(z) &= \frac{\sqrt{(z-a)(z-b)}}{2\pi i} \int_a^b \frac{f(x)dt}{\sqrt{(t-a)(t-b)(t-z)}} + \sqrt{(z-a)(z-b)}P_n(z) - \frac{1}{2} [\Phi_0(z) - \Psi_0(z)] \end{aligned} \quad (4)$$

где функции  $\Phi_0(z)$  и  $\Psi_0(z)$  определяются равенствами (2), а полином  $P_n(z)$  имеет вид

$$P_n(z) = D_n z^n + D_{n-1} z^{n-1} + \dots + D_0, \quad (5)$$

$$f(x) = 0 \text{ при } a_1 \leq x \leq b_1 \text{ и } f(x) = q_y(x) - iq_{xy}(x) \text{ при } a \leq x < a_1 \text{ и } b_1 < x \leq b$$

Степень полинома (5) и его коэффициенты  $D_0, D_1, \dots, D_n$  определяются из условия поведения функций  $\Phi(z)$  и  $\Omega(z)$  в окрестности точки  $|z| = \infty$ . Следовательно, для определения коэффициентов  $D_0, D_1, \dots, D_n$  и величин  $a, b$  необходимо функцию  $\Phi(z)$ , представленную в (4), разложить в ряд по степеням  $z$  в окрестности точки  $|z| = \infty$  и сопоставить это разложение с выражением (3). Учитывая предыдущие соотношения и произведя необходимые вычисления, для нахождения искомым коэффициентов  $D_0, D_1, \dots, D_n$  и величин  $a, b$ , находим следующую систему уравнений

$$D_2 + \frac{1}{2}(A_0 - B_0) = A_0, \quad D_1 - \frac{1}{2}(A_1 + B_1) + \frac{1}{2}(A_1 - B_1) = A_1, \quad (6)$$



$$D_0 - \frac{1}{2} \left( \frac{b+a}{2} \right) D_1 - \frac{1}{8} (b-a)^2 D_2 + \frac{1}{2} (A_2 - B_2) = A_2,$$

$$-C_1 - \frac{1}{2} \left( \frac{b+a}{2} \right) D_0 - \frac{1}{2} (b-a)^2 D_1 + \frac{1}{2} (A_3 - B_3) = A_3,$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{b+a}{2} \right) D_1 - C_2 - \frac{1}{8} (b-a)^2 D_0 = 0, \quad D_n = 0, \quad n \geq 3$$

Здесь  $C_1 = \frac{1}{2\pi i} \int_a^b \frac{f(t)dt}{\sqrt{(t-a)(t-b)}}$ ,  $C_2 = \frac{1}{2\pi i} \int_a^b \frac{tf(t)dt}{\sqrt{(t-a)(t-b)}}$ .

Последние два уравнения в (6) служат для отыскания параметров  $a$  и  $b$ .

В полученные соотношения входят неизвестные напряжения в зоне предразрушения. Условием, определяющим неизвестные напряжения в связях берегами полосы предразрушения, является дополнительное соотношение (3). Используя полученное решение задачи, определяем раскрытие между противоположными берегами когезионной трещины

$$2G \frac{\partial}{\partial x} \left[ u^+(x,0) - u^-(x,0) + i(v^+(x,0) - v^-(x,0)) \right] = (1+k_0) \left[ \Phi^+(x) - \Phi^-(x) - \frac{F_n(x)}{2} \sqrt{(x-a)(x-b)} \right],$$

где  $F_n(z) = d_3 z^3 + d_2 z^2 + d_1 z + d_0$ ;  $k_0 = (3-\mu)/(1+\mu)$ ,

$\mu$  – коэффициент Пуассона материала полосы;

$G$  – модуль сдвига.

Пользуясь формулами Сохоцкого-Племеля [3], на основе решения (4), находим

$$\Phi^+(x) - \Phi^-(x) = \sqrt{(x-a)(x-b)} \left\{ \frac{1}{\pi i} \int_a^b \frac{f(t)dt}{\sqrt{(t-a)(t-b)(t-x)}} + 2P_n(x) \right\}$$

Для определения усилий в связях  $q(x) = q_y(x) - iq_{xy}(x)$  получено нелинейное сингулярное интегродифференциальное уравнение

$$\frac{1+k_0}{2iG} \sqrt{(x-a)(x-b)} \left\{ \frac{1}{\pi i} \int_a^b \frac{f(t)dt}{\sqrt{(t-a)(t-b)(t-x)}} + 2 \left[ P_n(x) - \frac{1}{4} F_n(x) \right] \right\} = \frac{\partial}{\partial x} C(x, y) \left[ q_y(x) - iq_{xy}(x) \right], \quad a \leq x \leq b \quad (7)$$

Для решения уравнения можно использовать коллокационную схему с аппроксимацией неизвестной функции. При чистом изгибе балки с полосой предразрушения будет

$$F_n(z) = 0.$$

При изгибе консоли с полосой предразрушения под действием равномерно распределенной нагрузки имеем

$$F_n(z) = 0.$$

При изгибе консоли с полосой предразрушения в связях между берегами будут возникать как нормальные напряжения  $q_y(x)$ , так и касательные  $q_{xy}(x)$ . В этом случае

$$d_0 = -\frac{iQ}{16I} (b+a) \left[ (b-a)^2 - 8c^2 \right], \quad d_1 = -\frac{iQ}{8I} \left[ c^2 + (b-a)^2 \right],$$

$$d_2 = -\frac{iQ}{2I} (b+a), \quad d_3 = \frac{iQ}{I}$$

где  $Q$  – поперечная сила, приложенная на ее свободном конце;

$I$  – момент инерции полосы.

В общем случае, отделяя в (7) действительные и мнимые части находим систему нелинейных сингулярных интегродифференциальных уравнений относительно  $q_y(x)$  и

$q_{xy}(x)$ . Интегралы в (6), (7) заменяются конечными суммами, а производные в правой части уравнения (7) заменяются конечно-разностными аппроксимациями. В результате каждое интегродифференциальное уравнение сводится к системе алгебраических уравнений относительно приближенных значений  $q_y(x)$ ,  $q_{xy}(x)$  в узловых точках. Из-за неизвестных размеров концевых зон когезионной трещины даже в частном случае линейных упругих связей полученные системы уравнений являются нелинейными. Для их решения в случае линейных связей использовали метод последовательных приближений [4]. Для случая нелинейного закона деформирования связей также использовался алгоритм, подобный методу упругих решений [5]. Расчет эффективной податливости связей проводился подобно нахождению сдвигающего модуля в методе переменных параметров упругости [6]. Считается, что процесс последовательных приближений заканчивается, как только усилия в концевых зонах трещины, полученные на двух последовательных шагах, мало отличаются друг от друга. Алгебраическая система в каждом приближении решалась численно методом Гаусса с выбором главного элемента. Для определения предельного состояния полосы (балки), при котором начинает расти когезионная трещина, использовали критерий критического раскрытия берегов трещины. Считается, что разрыв связей на краю концевой зоны ( $x_0 = a_1$  или  $x_0 = b_1$ ) происходит при выполнении условия

$$V(x_0) = \sqrt{\left[ \left[ v^+(x_0,0) - v^-(x_0,0) \right]^2 + \left[ u^+(x_0,0) - u^-(x_0,0) \right]^2 \right]} = \delta_c . \quad (8)$$

где  $\delta_c$  – характеристика сопротивления материала развитию трещины.

Совместное решение полученных уравнений дает возможность (при заданных характеристиках связей) найти критическую внешнюю нагрузку, размеры концевых зон для предельно-равновесного состояния вершины трещины. Анализ предельно-равновесного состояния полосы (балки) при наличии трещины со связями в концевых зонах и действии силовой нагрузки сводится к параметрическому исследованию решения полученных алгебраических систем уравнений при различных законах деформирования связей, упругих и геометрических характеристиках полосы (балки).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Гаджиев, В.Д. Предельно-равновесное состояние детали типа втулки контактной пары при наличии трещин со связями между берегами / В.Д. Гаджиев, В.М. Мирсалимов // Оптимальное проектирование механических систем. – 1999. – с.50-63.
2. Рост трещин по границе соединения материалов: сб. статей к 90-летию со дня рождения А.Ю. Ишлинского / под ред. Д.М.Климова. – М.: Физматлит, 2003. – с. 221-238.
3. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
4. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
5. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин. – М.: Гостехиздат., 1948. – 376 с.
6. Биргер, И.А. Общие алгоритмы решения задач теорий упругости, пластичности и ползучести / И.А. Биргер // Успехи механики деформируемых сред. – 1975. – с.51-73.

**Аллахвердиев Рашад Абульфаз оглы**

Институт математики и механики Национальной Академии наук Азербайджана, г. Баку

Аспирант

Тел. (+99455)661-47-77; (+99412) 450-43-31

E-mail: mir-vagif@mail.ru

## АСИМПТОТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ В ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТАХ

*В настоящей работе рассматриваются осесимметричные колебания круглых пластинок переменной вдоль радиуса толщины с центральным жестким включением при внезапном преобразовании заземления внешнего контура в свободное опирание. Разработан алгоритм аналитического интегрирования дифференциальных уравнений в полярных координатах с произвольными переменными коэффициентами, аналогичный применяемому для решения уравнений в декартовых координатах.*

**Ключевые слова:** пластика, переменная толщина, колебания, полярные координаты, асимптотические решения, аналитическое интегрирование.

*Axis symmetrical oscillations of the round plates of the variable quantity along the radius of the thickness with the central rigid inclusion in the conditions of abrupt transformation of the outer contour pinch into the free lean are considered in this paper. The algorithm of the analytical integration of differential equations in the polar coordinates with the arbitrary variable coefficients was developed, and it is analogous to that one applied for the solution of the equations in the de-carded coordinates.*

**Key words:** plate, variable thickness, oscillations, polar coordinates, asymptotic solution, analytical integration.

В монографии [1] предложен аналитический метод интегрирования линейных обыкновенных дифференциальных уравнений различных порядков с переменными коэффициентами, основные соотношения которого и, соответственно, механические задачи, исследованные этим методом, записаны в ортогональных декартовых координатах. Между тем, задачи статики и динамики осесимметричных тел типа круглых и кольцевых пластин, мембран, толстостенных цилиндров и оболочек вращения удобно формулировать и решать в полярных и цилиндрических координатах. В настоящей работе для исследования круглых и кольцевых пластин разработан метод интегрирования дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами в полярных координатах [2], аналогичный применяемому для решения уравнений в декартовых координатах.

Уравнение осесимметричных колебаний круглых пластинок переменной вдоль радиуса толщины с центральным жестким включением радиуса  $a$  в полярных координатах имеет вид

$$\Delta(D\Delta W) + \rho^* \delta \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = p, \quad (1)$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right)$  – оператор Лапласа,

$W = W(r, t)$  – прогиб,

$\rho^*$ ,  $E$ ,  $\mu$  – соответственно плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона материала пластинки,

$\delta = \delta(r)$  – толщина пластинки,

$p = p(r)$  – интенсивность нагрузки, нормальной к поверхности пластинки,

$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$  – цилиндрическая жесткость.

Уравнение (1) должно удовлетворять граничным условиям

$$\begin{aligned}
 W(b,t) = 0, \quad M_r = -D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) \Big|_{b,t} &= 0, \\
 \frac{\partial W}{\partial r} \Big|_{a,t} = 0, \quad Q_r = -D \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) \Big|_{a,t} &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $b$  – внешний радиус пластинки и начальным условиям

$$W(r,0) = W_{cmam}(r), \quad \frac{\partial W}{\partial \tau} \Big|_{r,0} = 0.
 \tag{3}$$

Введением безразмерных параметров и переменных

$$\begin{aligned}
 \Delta = b - a, \quad \rho = \frac{r - a}{\Delta}, \quad \bar{a} = \frac{a}{\Delta}, \quad z = \rho + \bar{a}, \quad \bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_{\max}}, \quad \bar{E} = \frac{E}{P}, \quad \bar{W} = \frac{W}{\delta_{\max}}, \\
 \alpha = \frac{\delta}{b - a}, \quad \tau = \frac{t}{H}, \quad H = \frac{(b - a)^2}{\delta_{\max}} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)\rho^*}{E}},
 \end{aligned}$$

где  $\delta_{\max}$  – наибольшая на участке  $0 \leq \rho \leq 1$  толщина пластинки, уравнение (1) приведено к безразмерному виду

$$\frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left( z \frac{\partial}{\partial z} \right) \left[ \bar{\delta}^3 \frac{\partial}{\partial z} \left( z \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} \right) \right] + \bar{\delta} \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \tau^2} = \frac{12(1 - \mu^2)}{\bar{E}\alpha^4}.
 \tag{4}$$

Для соответствующего однородного уравнения произведено разделение переменных с помощью представления  $\bar{W}(z, \tau) = \bar{W}_0(z) e^{i\omega\tau}$ , где  $\bar{W}_0 = \bar{W}_0(z)$  форма собственных колебаний,  $\omega$  – круговая безразмерная собственная частота колебаний, и получено уравнение

$$\frac{d}{dz} \left( z \frac{d}{dz} \right) \left[ \bar{\delta}^3 \frac{d}{dz} \left( z \frac{d\bar{W}_0}{dz} \right) \right] - \bar{\delta} z \omega^2 \bar{W}_0 = 0,
 \tag{5}$$

которое должно удовлетворять граничным условиям

$$\begin{aligned}
 \bar{W}_0(1 + \bar{a}) = 0, \quad \frac{d^2 \bar{W}_0}{dz^2} \Big|_{1 + \bar{a}} + \frac{1}{1 + \bar{a}} \frac{d\bar{W}_0}{dz} \Big|_{1 + \bar{a}} &= 0, \\
 \frac{d\bar{W}_0}{dz} \Big|_{\bar{a}} = 0, \quad \frac{d^3 \bar{W}_0}{dz^3} \Big|_{\bar{a}} + \frac{1}{\bar{a}} \frac{d^2 \bar{W}_0}{dz^2} \Big|_{\bar{a}} - \frac{1}{\bar{a}^2} \frac{d\bar{W}_0}{dz} \Big|_{\bar{a}} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

При решении уравнения (5) введены переменные

$$y_1 = \bar{W}_0, \quad y_2 = z \frac{d\bar{W}_0}{dz}, \quad y_3 = \frac{\bar{\delta}^3}{z} \frac{d}{dz} \left( z \frac{d\bar{W}_0}{dz} \right), \quad y_4 = z \frac{d}{dz} \left( \frac{\bar{\delta}^3}{z} \frac{d}{dz} \left( z \frac{d\bar{W}_0}{dz} \right) \right)
 \tag{7}$$

и использован метод фазовых интегралов [3]. В матричной форме система уравнений, связывающая введенные переменные (7), имеет вид

$$Y' = TY,
 \tag{8}$$

где  $Y$  – вектор-столбец неизвестных  $y_j (j = 1, 2, 3, 4)$ ;

$T$  – квадратная ( $4 \times 4$ ) матрица, содержащая коэффициенты уравнения (5)

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z}{\bar{\delta}^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{z} \\ \omega^2 z \bar{\delta} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Введением преобразования  $Y = VF$ , где  $V$  – квадратная ( $4 \times 4$ ) невырожденная матрица, столбцы которой образованы компонентами собственных векторов матрицы  $T$ ,  $F$  – вектор-столбец новых неизвестных  $f_j (j = 1, 2, 3, 4)$

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \beta z & -\beta z & i\beta z & -i\beta z \\ \gamma & \gamma & -\gamma & -\gamma \\ \gamma\beta z & -\gamma\beta z & -i\gamma\beta z & i\gamma\beta z \end{pmatrix}, \quad \gamma = \frac{1}{\beta^4} \omega^3, \quad \beta^4 = \frac{1}{\delta^2} \omega^2, \quad F = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix},$$

получена система уравнений относительно функций  $f_j$

$$F' = V^{-1}TVF - V^{-1}VF \tag{9}$$

или в развернутом виде

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -i\beta \end{pmatrix} - \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 2\left(\frac{\gamma'}{\gamma} + \frac{\beta'}{\beta} + \frac{1}{z}\right) & -2\left(\frac{\beta'}{\beta} + \frac{1}{z}\right) & -\left(1 + \frac{\gamma'}{\gamma}\right) & \left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma}\right) \\ -2\left(\frac{\beta'}{\beta} + \frac{1}{z}\right) & 2\left(\frac{\gamma'}{\gamma} + \frac{\beta'}{\beta} + \frac{1}{z}\right) & \left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma}\right) & -\left(1 + \frac{\gamma'}{\gamma}\right) \\ \left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma}\right) & -\left(1 + \frac{\gamma'}{\gamma}\right) & 2\left(\frac{\gamma'}{\gamma} + \frac{\beta'}{\beta} + \frac{1}{z}\right) & -2\left(\frac{\beta'}{\beta} + \frac{1}{z}\right) \\ -\left(1 + \frac{\gamma'}{\gamma}\right) & \left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma}\right) & -2\left(\frac{\beta'}{\beta} + \frac{1}{z}\right) & 2\left(\frac{\gamma'}{\gamma} + \frac{\beta'}{\beta} + \frac{1}{z}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix}$$

Структура системы уравнений (9) существенно отличается от структуры исходной системы уравнений (8). Преобразование подобия  $V^{-1}TV$  диагонализует первую матрицу в правой части уравнения (9) с элементами, равными собственным числам матрицы  $T$ , вторая матрица имеет одинаковые диагональные элементы, а побочные элементы характеризуют связность системы. Элементы обеих матриц содержат функции геометрических и механических параметров пластинки. Следовательно, если функции  $D(r)$  и  $\rho^* \delta(r)$  изменяются плавно и не имеют точек поворота в области изменения аргумента, то, предполагая малость побочных элементов матрицы  $V^{-1}V'$ , систему уравнений (9) можно расщепить на четыре независимых уравнения

$$f_j = \left( \beta z \right)^{\frac{1}{2}} e^{\varepsilon_j \phi} \left( \varepsilon_j \right), \tag{10}$$

где  $\varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = -1, \varepsilon_3 = i, \varepsilon_4 = -i, \gamma = \frac{1}{\beta^4} \omega^3, \beta^4 = \frac{1}{\delta^2} \omega^2, \phi \left( \varepsilon, 0 \right) = \int_0^z \beta(\eta) d\eta$

Функцию прогибов получим в виде

$$\bar{W}_0 = q \left( C_1 e^{\varepsilon_1 \phi} \left( \varepsilon_1, 0 \right) + C_2 e^{\varepsilon_2 \phi} \left( \varepsilon_2, 0 \right) + C_3 e^{\varepsilon_3 \phi} \left( \varepsilon_3, 0 \right) + C_4 e^{\varepsilon_4 \phi} \left( \varepsilon_4, 0 \right) \right), \tag{11}$$

где  $q = \left( \beta z \right)^{\frac{1}{2}}$ .

Таким образом, принимаем в качестве приближенного частного решения исходного уравнения (5) функции (10), а их сумму (11) – в качестве общего решения.

Дифференцируя четырежды функции  $f_j$ , получим четыре дифференциальных уравнения вида

$$\frac{d}{dz} \left( z \frac{d}{dz} \right) \left[ \frac{\delta^3}{z} \frac{d}{dz} \left( z \frac{df_j}{dz} \right) \right] - \left[ z \omega^2 + g_j(z) \right] f_j = 0. \tag{12}$$

Они отличаются от исходного однородного дифференциального уравнения наличием дополнительных функций  $g_j = g_j(z)$ , где  $g_j(z) = K(z) + \varepsilon_j L(z) + \varepsilon_j^2 M(z)$ ,

$$K = \bar{\delta}^3 z \left[ \begin{aligned} & \frac{25}{16} \frac{1}{z^4} - \frac{9}{4} \frac{1}{z^3} \frac{\bar{\delta}'}{\bar{\delta}} + \frac{3}{8} \frac{1}{z^2} \frac{\bar{\delta}''}{\bar{\delta}} + \frac{33}{32} \frac{1}{z^2} \left( \frac{\bar{\delta}'}{\bar{\delta}} \right)^2 - \frac{3}{4} \frac{\bar{\delta}^{(IV)}}{\bar{\delta}} + \\ & + \frac{3}{4} \frac{\bar{\delta}'' \bar{\delta}'}{\bar{\delta}^2} + \frac{45}{32} \frac{\bar{\delta}'' (\bar{\delta}')^2}{\bar{\delta}^3} + \frac{27}{16} \left( \frac{\bar{\delta}''}{\bar{\delta}} \right)^2 - \frac{63}{256} \left( \frac{\bar{\delta}'}{\bar{\delta}} \right)^4 \end{aligned} \right],$$

$$L = \bar{\delta}^3 z \beta \left[ -\frac{1}{z^3} + \frac{2}{z^2} \frac{\bar{\delta}'}{\bar{\delta}} - \frac{3}{2z} \left( \frac{\bar{\delta}'}{\bar{\delta}} \right)^2 + \frac{3}{8} \left( \frac{\bar{\delta}'}{\bar{\delta}} \right)^3 - \frac{3}{4} \frac{\bar{\delta}'' \bar{\delta}'}{\bar{\delta}^2} - \frac{7}{2} \frac{\bar{\delta}''}{\bar{\delta}} \right],$$

$$M = \bar{\delta}^3 z \beta^2 \left[ \frac{1}{2} \frac{1}{z^2} - \frac{7}{2} \frac{\bar{\delta}''}{\bar{\delta}} - \frac{3}{8} \left( \frac{\bar{\delta}'}{\bar{\delta}} \right)^2 \right],$$

однако его структура близка к структуре исходного уравнения и его точные решения  $f_j$  можно принимать в качестве приближенного решения уравнения (12).

Для построения строгого решения исходного уравнения (5) и последующей оценки приближений (10) общее решение уравнения (5) представлено в виде суммы произведений приближений (10) на произвольные функции, подлежащие определению

$$\bar{W}_0 = D_1(z) f_1(z) + D_2(z) f_2(z) + D_3(z) f_3(z) + D_4(z) f_4(z), \tag{13}$$

где  $D_j = D_j(z)$  неизвестные функции.

Учитывая произвол в выборе  $D_j(z)$ , свяжем их пока тремя соотношениями

$$\sum_{j=1}^4 D_j' f_j = 0, \quad \sum_{j=1}^4 D_j' f_j' = 0, \quad \sum_{j=1}^4 D_j' f_j'' = 0. \tag{14}$$

Подстановка (13) в (5) с учетом зависимостей (14) и уравнения (12) дает четвертое уравнение

$$\sum_{j=1}^4 \left[ D_j' \left( z \frac{d}{dz} \left( \frac{\bar{\delta}^3}{z} \frac{d}{dz} \left( z \frac{df_j}{dz} \right) \right) \right) + D_j(z) g_j(z) f_j(z) \right] = 0. \tag{15}$$

Система линейных алгебраических уравнений (14), (15)

$$\left\{ \begin{aligned} & D_1' f_1 + D_2' f_2 + D_3' f_3 + D_4' f_4 = 0, \\ & D_1' f_1' + D_2' f_2' + D_3' f_3' + D_4' f_4' = 0, \\ & D_1' f_1'' + D_2' f_2'' + D_3' f_3'' + D_4' f_4'' = 0, \\ & D_1' ((\bar{\delta}^3 + 3z\bar{\delta}^2\bar{\delta}') f_1'' + z\bar{\delta}^3 f_1''') + D_2' ((\bar{\delta}^3 + 3z\bar{\delta}^2\bar{\delta}') f_2'' + z\bar{\delta}^3 f_2''') + D_3' ((\bar{\delta}^3 + 3z\bar{\delta}^2\bar{\delta}') f_3'' + \\ & + z\bar{\delta}^3 f_3''') + D_4' ((\bar{\delta}^3 + 3z\bar{\delta}^2\bar{\delta}') f_4'' + z\bar{\delta}^3 f_4''') = - \sum_{j=1}^4 D_j(z) g_j(z) f_j(z). \end{aligned} \right.$$

относительно неизвестных  $D_j'(z)$  имеет отличный от нуля определитель, равный  $16i\bar{\delta}^3 z \frac{\beta^4}{\gamma^2}$ .

Следовательно, решение системы имеет вид

$$D_1' = -\frac{1}{f_1(z)} \sum_{j=1}^4 D_j(z) \tilde{g}_j(z) f_j(z), \quad D_2' = \frac{1}{f_2(z)} \sum_{j=1}^4 D_j(z) \tilde{g}_j(z) f_j(z),$$

$$D_3' = -\frac{i}{f_3(z)} \sum_{j=1}^4 D_j(z) \tilde{g}_j(z) f_j(z), \quad D_4' = -\frac{i}{f_4(z)} \sum_{j=1}^4 D_j(z) \tilde{g}_j(z) f_j(z),$$



где  $\tilde{g}_j = \frac{g_j}{4\bar{\delta}^3 z \beta^3}$ .

Если  $C_j$  – произвольные постоянные, равные соответственно значениям  $D_j(z)$  при  $z = \bar{a}$  ( $\rho = 0$ ), то функции  $D_j(z)$  должны удовлетворять системе четырех интегральных уравнений типа Вольтерра, а именно

$$\begin{aligned} D_1 &= C_1 - \int_0^z \frac{1}{f_1(\xi)} \left( \sum_{j=1}^4 D_j(\xi) \tilde{g}_j(\xi) f_j(\xi) \right) d\xi, \\ D_2 &= C_2 + \int_0^z \frac{1}{f_2(\xi)} \left( \sum_{j=1}^4 D_j(\xi) \tilde{g}_j(\xi) f_j(\xi) \right) d\xi, \\ D_3 &= C_3 + i \int_0^z \frac{1}{f_3(\xi)} \left( \sum_{j=1}^4 D_j(\xi) \tilde{g}_j(\xi) f_j(\xi) \right) d\xi, \\ D_4 &= C_4 - i \int_0^z \frac{1}{f_4(\xi)} \left( \sum_{j=1}^4 D_j(\xi) \tilde{g}_j(\xi) f_j(\xi) \right) d\xi. \end{aligned}$$

Умножая обе части уравнений соответственно на  $\tilde{g}_j(z) f_j(z)$  и складывая, получаем интегральное уравнение

$$\varphi(z) - \int_0^z P(z, \xi) \varphi(\xi) d(\xi) = \chi(z), \tag{16}$$

с ядром

$$P(z, \xi) = \begin{vmatrix} \frac{1}{f_2(\xi)} & \frac{1}{f_1(\xi)} \\ \tilde{g}_j(z) f_1(z) & \tilde{g}_2(z) f_2(z) \end{vmatrix} - i \begin{vmatrix} \frac{1}{f_4(\xi)} & \frac{1}{f_3(\xi)} \\ \tilde{g}_3(z) f_3(z) & \tilde{g}_4(z) f_4(z) \end{vmatrix} \tag{17}$$

и правой частью

$$\chi = \sum_{j=1}^4 C_j \tilde{g}_j(z) f_j(z),$$

содержащей одну неизвестную функцию

$$\varphi(z) = \sum_{j=1}^4 D_j(z) \tilde{g}_j(z) f_j(z).$$

Если представить далее функцию

$$\varphi(z) = \sum_{j=1}^4 C_j \varphi_j(z),$$

то из интегрального уравнения (16) устраняются постоянные  $C_j$ , т.к. оно распадается на четыре интегральных уравнения

$$\varphi_j(z) = \tilde{g}_j(z) f_j(z) + \int_0^z P(z, \xi) \varphi_j(\xi) d\xi. \tag{18}$$

Решив уравнение (18), найдем

$$\bar{W}_0 = C_1 \bar{W}_{01}(z) + C_2 \bar{W}_{02}(z) + C_3 \bar{W}_{03}(z) + C_4 \bar{W}_{04}(z), \tag{19}$$

причем функции  $\bar{W}_{0j} = \bar{W}_{0j}(z)$ , независящие от постоянных интегрирования  $C_j$ , определяются формулами

$$\bar{W}_{0j} = f_j(z) + \int_0^z H(z, \xi) \varphi_j(\xi) d\xi, \tag{20}$$

где

$$H(z, \xi) = -\frac{f_1(z)}{f_1(\xi)} + \frac{f_2(z)}{f_2(\xi)} + i \left( \frac{f_3(z)}{f_3(\xi)} - \frac{f_4(z)}{f_4(\xi)} \right). \quad (21)$$

Применяя метод последовательных приближений к решению уравнений (19), предположим

$$\varphi_j(z) = \tilde{g}_j(z) f_j(z) + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_j^{(n)}(z). \quad (22)$$

После подстановки (22) в уравнения (19), получим рекуррентную формулу

$$\psi_j^{(n)}(z) = \int_0^z P(z, \xi) \psi_j^{(n-1)}(\xi) d\xi, \quad j = 1, 2, \dots, \psi_j^0 \equiv \tilde{g}_j f_j,$$

которая приводит к общей формуле

$$\psi_j^{(n)}(z) = \int_0^z P^{(n)}(z, \xi) \tilde{g}_j(\xi) f_j(\xi) d\xi, \quad (23)$$

где  $P^{(1)} = P, P^{(2)}, P^{(3)}, \dots$  – последовательные итерации ядра  $P$ , определенные рекуррентным соотношением

$$P^{(n+1)}(z, \xi) = \int_{\xi}^z P(z, \eta) P^{(n)}(z, \eta) d\eta, \quad (n = 1, 2, \dots).$$

Если определить резольвентное ядро  $R$  с помощью ряда

$$R(z, \xi) = -\sum_{n=0}^{\infty} P^{(n+1)}(z, \xi),$$

то получим

$$\varphi_j(z) = \tilde{g}_j(z) f_j(z) - \int_0^z R(z, \xi) \tilde{g}_j(\xi) f_j(\xi) d\xi. \quad (24)$$

Абсолютная и равномерная сходимость метода обеспечивается ограниченностью функции  $P(z, \xi)$ .

Подставляя (24) в формулу (20), получим в явной форме фундаментальную систему решений заданного уравнения (5)

$$\bar{W}_{0j}(z) = f_j(z) + \int_0^z H(z, \xi) \tilde{g}_j(\xi) d\xi + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^z H(z, \xi) \left( \int_0^{\xi} P^{(n)}(\xi, \eta) \tilde{g}_j(\eta) f_j(\eta) d\eta \right) d\xi, \quad (25)$$

где  $P^{(n)}$  означает  $n$ -ю итерацию ядра  $P$ , определенного формулой (17), а  $H$  задано формулой (21).

В предположении ограниченности функций  $f_j = f_j(z)$ , была доказана [2] ограниченность решения (20) исходного уравнения (5).

Так как каждый корень  $\omega_n$  трансцендентного уравнения дает решение для собственной функции, то полное решение дифференциального уравнения (4) может быть представлено разложением по формам собственных колебаний  $\bar{W}_{0n} = \bar{W}_{0n}(z)$  с коэффициентами в виде функций времени  $Q_n(t)$

$$\bar{W} = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(t) \bar{W}_{0n}(z). \quad (26)$$

Для определения функций  $Q_n = Q_n(t)$  подставим представление (26) в уравнение (4), умножим полученное равенство на  $\bar{W}_{0n}$  слева и справа и проинтегрируем обе части уравнения в пределах от  $\bar{a}$  до  $1 + \bar{a}$

$$\int_{\bar{a}}^{1+\bar{a}} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ Q_n(\tau) \left[ \frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left( z \frac{\partial}{\partial z} \right) \left( \frac{\bar{\delta}^3}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left( z \frac{\partial \bar{W}_{0n}}{\partial z} \right) \right) \right] + \bar{W}_{0n} \bar{\delta} \frac{\partial^2 Q_n}{\partial \tau^2} \right\} \bar{W}_{0n} dz = \int_{\bar{a}}^{1+\bar{a}} \frac{12(1-\mu^2)}{E\alpha^4} \bar{W}_{0n} dz. \quad (27)$$

В результате преобразования уравнения (5), получим

$$\frac{1}{z} \frac{d}{dz} \left( z \frac{d}{dz} \right) \left[ \frac{\bar{\delta}^3}{z} \frac{d}{dz} \left( z \frac{d\bar{W}_{on}}{dz} \right) \right] = \bar{\delta} \omega_n^2 \bar{W}_{on},$$

тогда равенство (27) примет вид

$$\int_{\bar{a}}^{1+\bar{a}} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ Q_n(\tau) \omega_n^2 + \frac{\partial^2 Q_n}{\partial \tau^2} \right\} \bar{\delta} \bar{W}_{on}^2 dz = \int_{\bar{a}}^{1+\bar{a}} \frac{12(1-\mu^2)}{\bar{E}\alpha^4} \bar{W}_{on} dz. \quad (28)$$

Обозначая

$$R_n(\tau) = \frac{12(1-\mu^2)}{\bar{E}\alpha^4} \frac{\int_{\bar{a}}^{1+\bar{a}} \bar{W}_{on} dz}{\int_{\bar{a}}^{1+\bar{a}} \bar{\delta} \bar{W}_{on}^2 dz} \quad (29)$$

и, учитывая ортогональность собственных функций  $\bar{W}_{0n} = \bar{W}_{0n}(z)$ , получим дифференциальное уравнение для  $Q_n = Q_n(\tau)$

$$\frac{d^2 Q_n}{d\tau^2} + \omega_n^2 Q_n(\tau) = R_n(\tau). \quad (30)$$

Решение однородного уравнения, соответствующего уравнению (30)

$$\bar{Q}_n = A_n \cos(\omega_n \tau) + B_n \sin(\omega_n \tau).$$

Частное решение неоднородного уравнения (30), найденное с помощью метода вариации произвольных постоянных

$$\bar{Q}_n^*(\tau) = \frac{1}{\omega_n} \int_0^{\tau} R_n \sin(\omega_n(\tau - \eta)) d\eta = \frac{2R_n}{\omega_n^2} \sin^2\left(\frac{\omega_n \tau}{2}\right).$$

Общее решение неоднородного уравнения (30) принимает вид

$$Q_n \overset{\curvearrowright}{=} A_n \cos(\omega_n \tau) + B_n \sin(\omega_n \tau) + \frac{2R_n}{\omega_n^2} \sin^2\left(\frac{\omega_n \tau}{2}\right).$$

Таким образом, прогибы описываются выражением

$$\bar{W}(z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( A_n \cos(\omega_n \tau) + B_n \sin(\omega_n \tau) + \frac{2R_n}{\omega_n^2} \sin^2\left(\frac{\omega_n \tau}{2}\right) \right) \bar{W}_{0n}(z).$$

На практике вместо рядов могут быть использованы конечные суммы. Для них разработаны оценки остаточных членов, которые при слабой неоднородности функций  $g_j = g_j(z)$  стремятся к нулю и решения  $f_j$  приближаются к точным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордон, В.А. Метод решения задач механики неоднородных тел / В.А. Гордон, М.И. Борзенков, В.С. Шоркин. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – 161 с.
2. Брусова, В.И. Переходные процессы в круглых пластинках и балках при некоторых внезапных за- проектных воздействиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17/ Брусова Вера Ивановна. – Орел, 2009
3. Метьюз, Д. Математические методы физики / Д. Метьюз. – М.: Атомиздат, 1972. – 398 с.

#### Гордон Владимир Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»  
 302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
 Тел.: 41-98-48  
 E-mail: Gordon@ostu.ru

#### Брусова Вера Ивановна

Ливенский филиал ОрелГТУ  
 Кандидат технических наук, заведующая кафедрой математики  
 302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
 Тел.: 41-98-48  
 E-mail: Gordon@ostu.ru

С.П. ИСКЕНДЕРОВА

## ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНЕ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ

*Проведено математическое описание модели зарождения трещины в пластине переменной толщины с круговым отверстием при силовом нагружении. Считается, что по мере повышения интенсивности растягивающей нагрузки происходит зарождение трещины. Задача о равновесии изотропной пластины переменной толщины, ослабленной круговым отверстием, с зародышевыми трещинами сводится к решению сингулярного интегрального уравнения.*

**Ключевые слова:** *пластина переменной толщины, круговое отверстие, зарождение трещины.*

*The mathematical description of model of nucleation of crack in a plate of variable thickness with a circular hole is lead at force loading. It is considered, that in process of increase of intensity of stretching loading there is an origin of a crack. The problem about equilibrium of an isotropic plate of the variable thickness weakened by a circular hole, with germinal cracks is reduced to the solution singular integral equation.*

**Key words:** *plate of variable thickness, circular hole, nucleation of crack.*

Рассмотрим бесконечную изотропную однородную пластину переменной толщины, ослабленную круговым отверстием радиуса  $R$ . Контур отверстия свободен от внешних нагрузок. На бесконечности действует однородное растягивающее напряжение  $\sigma_y^\infty = \sigma_0$ . По мере нагружения пластины силовой нагрузкой будут возникать зоны предразрушения, которые моделируем как области ослабленных межчастичных связей материала. Будем пластину моделировать реальным хрупким телом. В процессе деформации в некоторых точках пластины могут появляться зоны, в которых закон Гука не выполняется, т.е. в этих областях напряжения превосходят предел упругости. Поскольку указанные зоны (прослойки) малы по сравнению с остальной упругой частью пластины, то их можно мысленно удалить, заменив разрезами, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала. При таком подходе [1] к решению задачи о зарождении трещины, прежде всего, необходимо выяснить зависимость между усилиями и перемещениями в той части деформируемого материала, где имеют место силы межчастичного взаимодействия (притяжения между берегами).

В исследуемом случае возникновение зародышевой трещины представляет собой процесс перехода области предразрушения в область разорванных связей между поверхностями тела. При этом размер полосы предразрушения заранее неизвестен и должен быть определен в процессе решения задачи. Экспериментальные исследования [2, 3] возникновения областей, в которых материал деформируется за пределом упругости, показывают, что в начальной стадии такие зоны представляют собой узкий вытянутый слой, и с ростом нагрузки внезапно появляются вторичная система зон пластических деформаций.

Пусть начало координат взято в центре кругового отверстия. Декартовы координаты  $x, y$  в срединной плоскости пластины являются плоскостью симметрии. Пластина переменной толщины находится в обобщенном плосконапряженном состоянии. Причем, толщина пластины  $2h(x, y)$  удовлетворяет условиям

$$0 < h_1 \leq h(x, y) \leq h_2,$$

где  $h_2$  и  $h_1$  соответственно, наибольшее и наименьшее значение толщины пластины.

Пусть  $h_0 = \frac{h_1 + h_2}{2}$  – средняя толщина пластины, а  $\varepsilon = \frac{h_2 - h_1}{h_1 + h_2}$  – малый параметр. Тогда функции толщины пластины можно представить в виде

$$h(x, y) = h_0 \left[ 1 + \varepsilon \bar{h}(x, y) \right], \quad (1)$$

где  $\bar{h}(x, y)$  – некоторая известная безразмерная непрерывная функция  $\langle 1 \leq \bar{h}(x, y) \leq 1 \rangle$ .

Считаем, что из контура отверстия исходят симметричные прямолинейные полосы предразрушения в виде отрезков вдоль оси абсцисс. Полосы предразрушения ориентированы в направлении максимальных растягивающих напряжений, полученных из решения упругой задачи. Полагаем, что в полосе предразрушения имеет место [1] пластическое течение при постоянном напряжении. Граничные условия задачи имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_r - i\tau_{r\theta} &= 0 && \text{на обводе отверстия} \\ \sigma_y - i\tau_{xy} &= \sigma_s && \text{при } y = 0, \quad R \leq |x| \leq \ell \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести материала пластины на растяжение.

Рассматриваемая задача заключается в определении напряженно-деформированного состояния вне кругового отверстия, а также в нахождении величины предельной внешней нагрузки  $\sigma_0$ , по достижении которой происходит появление трещины. Общие уравнения статического деформирования пластины переменной толщины представим в виде: уравнения равновесия

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

Закон Гука

$$N_x = \frac{2Eh}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad N_y = \frac{2Eh}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \nu \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad N_{xy} = \frac{Eh}{1+\nu} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (4)$$

Здесь  $N_x, N_y, N_{xy}$  – нормальные и сдвигающие усилия, приходящиеся на единицу длины, соответственно;  $u, v$  – компоненты вектора перемещений;  $E$  – модуль упругости Юнга материала пластины;  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала пластины.

Решение системы уравнений статического деформирования пластины ищем в виде разложений по малому параметру:

$$\begin{aligned} N_x &= N_x^{(0)} + \varepsilon N_x^{(1)} + \dots; \quad N_y = N_y^{(0)} + \varepsilon N_y^{(1)} + \dots; \quad N_{xy} = N_{xy}^{(0)} + \varepsilon N_{xy}^{(1)} + \dots; \\ u &= u_0 + \varepsilon u_1 + \dots; \quad v = v_0 + \varepsilon v_1 + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

Формулы (1), (5) подставляются в уравнения статического деформирования пластины и приравниваются коэффициенты при одинаковых степенях малого параметра  $\varepsilon$ . В полученных, таким образом, уравнениях уравнения нулевого приближения совпадают с уравнениями классической плоской задачи теории упругости, а уравнения первого приближения представляют собой уравнение плоской задачи теории упругости с объемной силой [4]

$$X_1 = N_x^{(0)} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + N_{xy}^{(0)} \frac{\partial \bar{h}}{\partial y}; \quad Y_1 = N_y^{(0)} \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} + N_{xy}^{(0)} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x}. \quad (6)$$

Аналогично определяются составляющие  $X_2, Y_2$  объемной силы для второго и последующих приближений.

Согласно методу возмущений, граничные условия задачи принимают, соответственно, вид:

для нулевого приближения

$$\begin{aligned} N_r^{(0)} &= 0; \quad N_{r\theta}^{(0)} = 0 && \text{на } |z| = R \\ N_y^{(0)} &= N_s; \quad N_{xy}^{(0)} = 0 && \text{при } y = 0, \quad R < |x| \leq \ell \end{aligned} \quad (7)$$

для первого приближения

$$N_r^* = 0; \quad N_{r\theta}^* = 0 \quad \text{на } |z| = R \quad (8)$$

$$N_y^* - iN_{xy}^* = -\bar{h} \langle 0, N_s \rangle; \quad \text{при } y = 0, \quad R < |x| \leq \ell \quad (9)$$

Здесь при выводе уравнений первого приближения были приняты следующие обозначения

$$\begin{aligned} N_x^* &= N_x^{(1)} - N_{x_0}^{(1)}; & N_{x_0}^{(1)} &= \bar{h}(x, y)N_x^{(0)}; & N_y^* &= N_y^{(1)} - N_{y_0}^{(1)}; \\ N_{y_0}^{(1)} &= \bar{h}(x, y)N_y^{(0)}; & N_{xy}^* &= N_{xy}^{(1)} - N_{xy_0}^{(1)}; & N_{xy_0}^{(1)} &= \bar{h}(x, y)N_{xy}^{(0)}. \\ N_r^* &= N_r^{(1)} - N_{r_0}^{(1)}; & N_{r_0}^{(1)} &= \bar{h}(x, y)N_r^{(0)}; & N_\theta^* &= N_\theta^{(1)} - N_{\theta_0}^{(1)}; \\ N_{\theta_0}^{(1)} &= \bar{h}(x, y)N_\theta^{(0)}; & N_{r\theta}^* &= N_{r\theta}^{(1)} - N_{r\theta_0}^{(1)}; & N_{r\theta_0}^{(1)} &= \bar{h}(x, y)N_{r\theta}^{(0)}. \end{aligned}$$

На основании формул Колосова-Мухелишвили [5] и краевых условий на контуре кругового отверстия и берегах полосы предразрушения задача в нулевом приближении сводится к определению двух аналитических функций  $\Phi_0(z)$  и  $\Psi_0(z)$  из граничных условий

$$\Phi_0(z) + \overline{\Phi_0(\bar{z})} - [\Phi_0'(z) + \Psi_0'(z)]e^{2i\theta} = 0; \tag{10}$$

$$\Phi_0(z) + \overline{\Phi_0(\bar{z})} + i[\Phi_0'(z) + \Psi_0'(z)] = \sigma_s \quad \text{при } R < |x| \leq \ell \tag{11}$$

где  $\tau = Re^{i\theta}$ ,  $t$  – аффикс точек берегов полос предразрушения.

Решение краевой задачи (10)-(11) ищем в виде

$$\Phi_0(z) = \Phi_1^{(0)}(z) + \Phi_2^{(0)}(z); \quad \Psi_0(z) = \Psi_1^{(0)}(z) + \Psi_2^{(0)}(z); \tag{12}$$

$$\Phi_1^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \int_L \frac{g_0(t)dt}{t-z}; \quad \Psi_1^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \int_L \left[ \frac{g_0(t)}{t-z} - \frac{t \cdot g_0(t)}{(t-z)^2} \right] dt$$

Здесь  $L$  – совокупность полос предразрушения,  $g_0(t)$  – искомая функция.

$$g_0(x) = \frac{2\mu}{1+\kappa_0} \cdot \frac{d}{dx} \left[ \Phi_0(z) - \nu \overline{\Phi_0(\bar{z})} \right] \quad \text{на участке } R \leq |x| \leq \ell;$$

$$\kappa_0 = \frac{1-\nu}{1+\nu}$$

Неизвестная функция  $g_0(t)$  и комплексные потенциалы  $\Phi_2^{(0)}(z)$  и  $\Psi_2^{(0)}(z)$  должны быть определены из краевых условий (10)-(11). Для определения функций  $\Phi_2^{(0)}(z)$  и  $\Psi_2^{(0)}(z)$  представим граничное условие (10) в следующем виде

$$\Phi_2^{(0)}(z) + \overline{\Phi_2^{(0)}(\bar{z})} - [\Phi_2'(z) + \Psi_2'(z)]e^{2i\theta} = -\Phi_1^{(0)}(z) - \overline{\Phi_1^{(0)}(\bar{z})} + e^{2i\theta} [\Phi_1^{(0)}(z) + \Psi_1^{(0)}(z)] \tag{13}$$

Для решения граничной задачи (13) используем метод Н.И. Мухелишвили [5]. В результате находим

$$\Phi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \int_L \left[ \frac{1-t^2}{t(-tz)} + \frac{z-t}{(-tz)^2} \right] g_0(t) dt + \frac{\sigma_0}{2z^2} \tag{14}$$

$$\Psi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi z} \int_L \left[ \frac{2}{tz} - \frac{t}{z(-tz)} + \frac{t^2 z - z - t}{z(-tz)^2} - \frac{2t(-t)}{(-tz)^3} \right] g_0(t) dt + \frac{\sigma_0}{2z^2} + \frac{\Phi_2^{(0)}(z)}{z^2} - \frac{\Phi_2^{\prime(0)}(z)}{z}$$

В формулах (14) принято  $R = 1$ , т.е. все линейные размеры отнесены к радиусу кругового отверстия. Требуя, чтобы функции (12) удовлетворяли краевому условию (7) на полосе предразрушения, получим сингулярное интегральное уравнение относительно  $g_0(z)$ :

$$\frac{1}{\pi} \int_L \frac{g_0(t)dt}{t-x} + \frac{1}{\pi} \int_L K(x, z) g_0(t) dt = -F_0(x)$$

Здесь

$$K(x, z) = \frac{x-t}{xt(-tz)^2} + \frac{1}{x^2 t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{2t(-t)^2 - 1}{x(-tz)^3} + \frac{2x^3 - x - 2t + 2t^2 x - x^3 t^2}{x^2 (-tz)^2} \right];$$



$$F_0(x) = \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{2x^2} + \frac{\sigma_0}{2x^4} - \sigma_s.$$

Учитывая, что  $g_0(x) = -g_0(-x)$  и применяя замену переменных, сингулярное интегральное уравнение с помощью процедуры алгебраизации [3] сводится к системе алгебраических уравнений для  $M$  неизвестных  $g_m^0 \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R} \quad (m = 1, 2, \dots, M)$ :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^M A_{mk} g_k^0 = G \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R} \quad (m = 1, 2, \dots, M-1) \\ \sum_{k=1}^M \left( \frac{1}{2} \right)^{k+M} g_k^0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2} = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где  $A_{mk} = \frac{1}{M} \left[ \frac{1}{\sin \theta_m} \operatorname{ctg} \frac{\theta_m + \left( \frac{1}{2} \right)^{|m-k|} \theta_k}{2} + K_0 \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R} \cdot \tau_k \right], \quad \theta_m = \frac{2m-1}{2M} \pi; \quad \eta_m = \cos \theta_m;$

$\tau_k = \eta_k.$

Для решения полученной системы не хватает одного уравнения, определяющего размер полосы предразрушения. Условием, служащим для определения размера полосы предразрушения, является условие конечности напряжений в вершине полосы предразрушения. Это условие можно записать в виде

$$\sum_{k=1}^M \left( \frac{1}{2} \right)^k g_0^k \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2} = 0 \quad (16)$$

Перейдем к решению задачи (8)-(9) первого приближения. При наличии объемных сил решение представим в виде суммы

$$N_x^* = N_{x_*}^{(1)} + N_{x_1}^{(1)}; \quad N_y^* = N_{y_*}^{(1)} + N_{y_1}^{(1)}; \quad N_{xy}^* = N_{xy_*}^{(1)} + N_{xy_1}^{(1)}, \quad (17)$$

где  $N_{x_*}^{(1)}, N_{y_*}^{(1)}, N_{xy_*}^{(1)}$  – частное решение уравнений плоской теории упругости при наличии объемной силы (6);

$N_{x_1}^{(1)}, N_{y_1}^{(1)}, N_{xy_1}^{(1)}$  – общее решение уравнений плоской теории упругости при отсутствии объемных сил.

Используя метод А.Г. Угодчикова [6], для усилий в первом приближении получим следующие общие представления

$$\begin{aligned} \frac{N_x^* + N_y^*}{2h_0} &= \frac{N_r^* + N_\theta^*}{2h_0} = 4 \operatorname{Re} \left[ \Phi_1(z) - \frac{1}{2(1+\kappa_0)} \cdot \frac{\partial F_1}{\partial z} \right] \quad (18) \\ \frac{N_y^* - N_x^* + 2iN_{xy}^*}{2h_0} &= \frac{\left( \Psi_\theta^* - N_r^* + 2iN_{r\theta}^* \right) e^{-2i\theta}}{2h_0} = 2 \left[ \bar{z} \Phi_1'(z) + \Psi_1(z) + \frac{1}{2(1+\kappa_0)} \frac{\partial}{\partial z} \left( \in_0 \bar{F}_1 - \bar{Q}_1 \right) \right], \end{aligned}$$

В эти представления входят две аналитические функции  $\Phi_1(z)$  и  $\Psi_1(z)$  комплексной переменной  $z = x + iy$  и две функции  $F_1 \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}, \bar{z}$  и  $Q_1 \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}, \bar{z}$ , представляющие собой любые частные решения уравнений

$$\frac{\partial^2 F_1}{\partial z \partial \bar{z}} = F; \quad \frac{\partial^2 Q_1}{\partial z^2} = \bar{F} \quad (19)$$

$$F = X_1 + iY_1 = \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \left( \Psi_x^{(0)} + iN_{xy}^{(0)} \right) + i \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} \left( \Psi_y^{(0)} - iN_{xy}^{(0)} \right) \quad (20)$$

Используя общие соотношения (18), находим

$$N_r^* - iN_{r\theta}^* = \Phi_1(z) + \overline{\Phi_1(z)} - e^{2i\theta} \left[ \Phi_1'(z) + \Psi_1(z) \right] - \frac{1}{1+\kappa_0} \operatorname{Re} \frac{\partial F_1}{\partial z} - \frac{1}{2 \left( \frac{1}{2} + \kappa_0 \right)} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \in_0 \bar{F}_1 - \bar{Q}_1 \right) \right] e^{2i\theta}$$

$$N_y^* + iN_{xy}^* = \Phi_1(z) + \overline{\Phi_1(z)} + \bar{z}\Phi_1'(z) + \Psi_1(z) - \frac{1}{1+\kappa_0} \operatorname{Re} \frac{\partial F_1}{\partial z} + \frac{1}{2(1+\kappa_0)} \left( \kappa_0 \frac{\partial \overline{F_1}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{Q_1}}{\partial z} \right).$$

Для определения комплексных потенциалов  $\Phi_1(z)$  и  $\Psi_1(z)$  первого приближения имеем следующую граничную задачу

$$\Phi_1(\tau) + \overline{\Phi_1(\tau)} - e^{2i\theta} [\Phi_1'(\tau) + \Psi_1(\tau)] = f(\theta), \tag{21}$$

$$\Phi_1(\zeta) + \overline{\Phi_1(\zeta)} + x\Phi_1'(\zeta) + \Psi_1(\zeta) = f_*(\zeta), \quad R < |x| \leq \ell \tag{22}$$

где  $\tau = Re^{i\theta}$ ;  $f(\theta) = \frac{1}{1+\kappa_0} \operatorname{Re} \frac{\partial F_1}{\partial z} + \frac{1}{2(1+\kappa_0)} \left( \kappa_0 \frac{\partial \overline{F_1}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{Q_1}}{\partial z} \right) e^{2i\theta}$  при  $z = Re^{i\theta}$

$$f_*(x) = f_1(x) - \bar{h}(x,0)N_s;$$

$$f_1(x) = \frac{1}{1+\kappa_0} \operatorname{Re} \frac{\partial F_1}{\partial z} - \frac{1}{2(1+\kappa_0)} \left( \kappa_0 \frac{\partial \overline{F_1}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{Q_1}}{\partial z} \right) \quad \text{при } y = 0$$

Функции  $F_1(z, \bar{z})$  и  $Q_1(z, \bar{z})$  можно формально записать в виде

$$F_1(z, \bar{z}) = \int^z \int^{\bar{z}} F(z, \bar{z}) d\bar{z}; \quad Q_1(z, \bar{z}) = \int^z \int^{\bar{z}} \overline{F(z, \bar{z})} dz \tag{23}$$

Комплексные потенциалы  $\Phi_1(z)$  и  $\Psi_1(z)$  первого приближения ищем в виде

$$\Phi_1(\zeta) = \Phi_{10}(\zeta) + \Phi_{11}(\zeta); \quad \Psi_1(\zeta) = \Psi_{10}(\zeta) + \Psi_{11}(\zeta) \tag{24}$$

$$\Phi_{10}(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_L \frac{g_1(t) dt}{t - z}; \quad \Psi_{10}(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_L \left[ \frac{g_1(t)}{t - z} - \frac{t \cdot g_1(t)}{(-z)^2} \right] dt.$$

Неизвестная функция  $g(x)$  и комплексные потенциалы  $\Phi_{11}(\zeta)$  и  $\Psi_{11}(\zeta)$  должны быть определены из краевых условий (21), (22). Для нахождения функций  $\Phi_{11}(\zeta)$  и  $\Psi_{11}(\zeta)$  представим граничное условие (21) в виде

$$\Phi_{11}(\tau) + \overline{\Phi_{11}(\tau)} - [\Phi_{11}'(\tau) + \Psi_{11}(\tau)] e^{2i\theta} = f(\theta) - \Phi_{10}(\tau) - \overline{\Phi_{10}(\tau)} + e^{2i\theta} [\Phi_{10}'(\tau) + \Psi_{10}(\tau)] \tag{25}$$

Для решения краевой задачи (25) воспользуемся решением Н.И. Мусхелишвили [5]:

$$\Phi_{11}(\zeta) = \frac{1}{2\pi iz} \int_\gamma \frac{f_1 + if_2}{\tau - z} d\tau + \frac{a_1}{z}; \tag{26}$$

$$\Psi_{11}(\zeta) = -\frac{1}{2\pi iz} \int_\gamma \frac{f_1 - if_2}{\tau(-z)} d\tau + \frac{\Phi_{11}(z)}{z^2} - \frac{\Phi_{11}'(z)}{z} + \frac{a_1'}{z};$$

Здесь  $f_1 - if_2 = \Phi_{10}(\zeta) + \overline{\Phi_{10}(\zeta)} - e^{2i\theta} [\Phi_{10}'(\zeta) + \Psi_{10}(\zeta)] - f(\theta)$ ,  $a_1 = a_1' = 0$ , так как равен нулю главный вектор усилий, приложенных к контуру кругового отверстия  $\gamma$ .

Подставив в (26) выражение  $f_1 - if_2$ , после вычисления интегралов с помощью теории вычетов найдем

$$\begin{aligned} \Phi_{11}(\zeta) &= \frac{1}{2\pi} \int_R^\ell \left[ \frac{1-t^2}{t(-tz)} + \frac{z-t}{(-tz)^2} \right] g_1(t) dt + \frac{\sigma_0}{2z^2} + \frac{1}{2\pi iz} \int_\gamma \frac{f(\theta)}{\tau - z} d\tau; \tag{27} \\ \Psi_{11}(\zeta) &= \frac{1}{2\pi z} \int_R^\ell \left[ \frac{2}{tz} - \frac{t}{z(-tz)} + \frac{t^2 z - z - t}{z(-zt)^2} - \frac{2t(-t)}{(-tz)^2} \right] g_1(t) dt + \frac{\sigma_0}{2z^2} + \\ &+ \frac{1}{2\pi iz} \int_\gamma \frac{f(\theta)}{\tau(-z)} d\tau + \frac{\Phi_{11}(z)}{z^2} - \frac{\Phi_{11}'(z)}{z}. \end{aligned}$$

В формулах (27) принято  $R = 1$ , т.е. все линейные размеры отнесены к радиусу кругового отверстия. Требуя, чтобы функции (24) удовлетворяли краевому условию (22), получим сингулярное интегральное уравнение относительно  $g_1(x)$ :

$$\frac{1}{\pi} \int_R^\ell \frac{g_1(t) dt}{t-x} + \frac{1}{\pi} \int_R^\ell K(t,x) g_1(t) dt = G(x); \quad (28)$$

Здесь 
$$K(t,x) = \frac{x-t}{xt(1-tx)^2} + \frac{1}{x^2 t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{2t(x-t)(x^2-1)}{x(1-tx)^3} + \frac{2x^3-x-2t+2t^2x-x^3t^2}{x^2(1-tx)} \right];$$

$$G(x) = f_*(x) - \sigma_0 - \frac{\sigma_0}{2x^2} - \frac{3\sigma_0}{2x^4} + f_0(x);$$

$$f_0(x) = -\Phi_{11}^*(x) - \overline{\Phi_{11}^*(x)} - x \overline{\Phi_{11}^*(x)} - \overline{\Psi_{11}^*(x)}$$

$$\Phi_{11}^*(x) = \frac{1}{2\pi i z} \int_\gamma \frac{f(\tau) d\tau}{\tau-z}; \quad \Psi_{11}^*(x) = \frac{1}{2\pi i z} \int_\gamma \frac{f(\tau) d\tau}{\tau-z}$$

Применяя замену переменных, сингулярное интегральное уравнение приведем к виду более удобному для нахождения его приближенного решения. Преобразованное уравнение имеет вид

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{g_1^0(\tau) d\tau}{\tau-\eta} + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 K_0(\tau,\eta) g_1^0(\tau) d\tau = G(\eta). \quad (29)$$

Здесь  $g_1^0(\tau) = g(t)$ ;  $K_0(\tau,\eta) = \frac{\ell-R}{2} K(x)$ .

Квадратурные формулы

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{g_1^0(\tau) d\tau}{\tau-\eta} = \frac{1}{M \sin \theta} \sum_{k=1}^M \varphi_k^0 \sum_{m=0}^{M-1} \cos m\theta_k \cdot \sin m\theta;$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 g_1^0(\tau) K_0(\tau,\eta) d\tau = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^M \varphi_k^0 K_0(\tau_k)$$

позволяют свести интегральное уравнение (29) к конечной системе линейных алгебраических уравнений относительно приближенных значений  $\varphi_k^0$  искомой функции в узловых точках.

После некоторых преобразований сингулярное интегральное уравнение сводится к следующей алгебраической системе

$$\sum_{k=1}^M A_{mk} \varphi_k^0 = G(\eta_m), \quad m=1, 2, \dots, M-1, \quad A_{mk} = \frac{1}{M} \left[ \frac{1}{\sin \theta_m} \operatorname{ctg} \frac{\theta_m + (-1)^{|m-k|} \theta_k}{2} + K_0(\eta_m, \tau_k) \right] \quad (30)$$

В рассматриваемой задаче трещина одним концом выходит на поверхность свободного отверстия. Напряжения на этом конце трещины ограничены. Поэтому к полученной системе уравнений (30) необходимо добавить следующее алгебраическое уравнение обеспечивающее конечность напряжений в точке  $x=R$ ,

$$\sum_{k=1}^M (-1)^{k+M} \varphi_k^0 \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_k}{2} = 0, \quad (31)$$

Для решения полученной системы не хватает одного уравнения, определяющего размер полосы предразрушения в первом приближении. Это условие можно записать в виде

$$\sum_{k=1}^M (-1)^k \varphi_k^0(\tau_m) \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2} = 0 \quad (32)$$

При известном законе изменения толщины пластины уравнение решается численно.

Для определения значения внешней растягивающей нагрузки, при которой происходит зарождение трещины, нужно иметь критерий появления трещины. В качестве такого дополнительного критерия принимаем условие критического раскрытия берегов полосы предразрушения

$$v^+(0) - v^-(0) = \delta_c, \quad (33)$$

где  $\delta_c$  – характеристика материала пластины сопротивлению трещинообразования;

$\left( v^+ - v^- \right)$  – нормальная составляющая раскрытия берегов полосы предразрушения.

Используя полученное решение, вычислим смещение  $v \left( \pm R, 0 \right)$  на полосе предразрушения

$$v \left( \pm R, 0 \right) = -\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell}^x g(x) dx; \quad g(x) = g_0(x) + \varepsilon g_1(x)$$

Раскрытие берегов полосы предразрушения при  $x = R$  будет

$$v \left( R, 0 \right) = -\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell}^{-R} g(x) dx \quad (34)$$

Следовательно, условием, определяющим предельную растягивающую нагрузку, при которой происходит появление трещины в точке  $x = \pm R$ , будет

$$-\frac{1 + \kappa_0}{2\mu} \int_{-\ell}^{-R} g(x) dx = \delta_c \quad (35)$$

Совместное решение полученных алгебраических систем и критерия (35) дает возможность найти критическую величину растягивающей внешней нагрузки и размер полосы предразрушения для состояния предельного равновесия, при котором происходит образование трещины в пластине переменной толщины с круговым отверстием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирсалимов, В.М. Зарождение дефекта типа трещины во втулке контактной пары / В.М. Мирсалимов // Математическое моделирование. – 2005. – т. 17, №2. – С. 35-45.
2. Панасюк, В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1991. – 416 с.
3. Мирсалимов, В.М. Неоднородные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
4. Мирсалимов, В.М. Разрушение пластин переменной толщины / В.М. Мирсалимов // ФХММ. – 1996. т. 32, №3. – С. 46 – 54.
5. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. М.: Наука, 1966. – 707 с.
6. Угодчиков, А.Г. К решению плоской задачи теории упругости при произвольных объемных силах / А.Г. Угодчиков // Прикладная механика. – 1967. т. 3, №7. – С. 123 – 130.

#### Искендерова Саяра Паша гызы

Гянджинский государственный университет, г. Гянджа

Старший преподаватель кафедры «прикладная математика и механика»,

Тел. (99455) 689 05 01

E-mail: iske@mail.ru

УДК 625.08

Е.С. АВДЕЕВА, В.Н. КУЗНЕЦОВА

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕДРЕНИЯ ЧАСТИЦ ГРУНТА В МАТЕРИАЛ РАБОЧЕГО ОРГАНА

*В статье рассмотрено влияние изнашивания рабочего органа землеройной машины на эффективность процесса разработки грунта, а также математическое описание внедрения абразивных частиц грунта в материал рабочего органа.*

**Ключевые слова:** износ, рабочий орган, абразивное изнашивание, грунт.

*In article influence of wear process of working member of the earth-moving machine on efficiency of process of working out of a soil, and also the mathematical description of introduction of abrasive particles of a soil in a material of working member is considered.*

**Key words:** wear, working member, soil, abrasive wear.

В процессе работы землеройных машин резание грунта осуществляется ножами и зубьями, форма и размер которых изменяются в результате изнашивания. Такого рода изменения параметров рабочих органов влияют на условия его силового взаимодействия с грунтом. Практические исследования показали, что допустимый износ зубьев увеличивает сопротивление резанию ковшом на 60 - 100% [1]. В свою очередь, практика производства земляных работ показывает, что ковш одноковшового экскаватора с острой режущей кромкой заполняется быстрее и легче, чем с затупленной или изношенной, не вызывая перегрузок и перенапряжений экскаватора. Вследствие изнашивания рабочего органа снижается производительность машины и возрастает энергоёмкость разработки грунта. Изнашивание рабочих органов происходит в некоторых случаях весьма интенсивно.

С учетом выше изложенного, требуется изучение процесса изнашивания рабочих органов землеройных машин при взаимодействии с грунтами и влияния изнашивания на силы и сопротивление грунтов резанию.

На основе многочисленных исследований изнашивания установлено, что вид изнашивания рабочих органов землеройных машин при взаимодействии с грунтом и его количественные характеристики определяются:

- факторами, обусловленными механическими воздействиями на поверхности трения;
- факторами внешней среды;
- факторами, связанными со свойствами поверхностных слоёв контактирующих деталей.

Первая группа факторов определяет характер напряжённого состояния в металле поверхностных слоёв и тепловые явления в зоне трения. Вторая группа факторов – среда (жидкая, газообразная и твёрдая) - определяет адсорбционные, химические и диффузионные процессы на поверхности трения и в поверхностных слоях, а твёрдая среда может вызвать абразивный вид изнашивания. Факторы третьей группы также существенно влияют на процессы трения и изнашивания, изменяя их качественные и количественные показатели (виды и скорости изнашивания).

При оценке влияния нагрузки следует иметь в виду два основных положения:

– нагрузка может существенно влиять на переход одного, более благоприятного вида изнашивания в другой, менее благоприятный, и, наоборот, вследствие чего её количественное влияние на изнашивание может носить скачкообразный характер;

– при одном и том же виде изнашивания количественное влияние нагрузки может существенно различаться в зависимости от условий трения и изнашивания (среды, свойств материала поверхностных слоёв трущихся тел и др.).

При малых значениях удельной нагрузки её изменение в широких пределах (3 - 10 раз) не оказывает заметного влияния на интенсивность изнашивания. Но при достижении критических значений, соответствующих переходу от одного вида изнашивания в другой, интенсивность возрастает или скачкообразно, или достаточно резко.

При взаимодействии рабочего органа с грунтом рассматривается контакт рабочего органа с твёрдой средой. Согласно выражения (1), интенсивность абразивного изнашивания повышается с увеличением крупности абразивного зерна до определённого критического значения  $\alpha_{кр}$ , после которого интенсивность изнашивания замедляется:

Коэффициент округленности  $\alpha$  представляет собой меру степени сглаженности выступов на контуре зерна [2]:

$$\alpha = \frac{n_i a + n_i \acute{a} + n_i \hat{a} + n_i \bar{a} + n_i \ddot{a} + n_i \acute{\acute{a}}}{\sum_1^m n_i}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – число зёрен соответствующего класса округленности;

$a, \bar{a}, \acute{a}, \hat{a}, \ddot{a}, \acute{\acute{a}}$  – средние значения  $\alpha_i$  соответствующие классу округленности и принимаемые по таблице Пауэрса

Но данное условие справедливо тогда, когда твёрдость абразивных частиц превышает твёрдость поверхности трения рабочего органа, т.е. когда эти частицы действительно являются абразивными. Изнашивание металла практически начинается при абразивных частицах размером 5мкм и с увеличением размеров до 100 мкм скорость изнашивания повышается. При дальнейшем увеличении размеров абразивных частиц скорость остаётся постоянной [3].

Макрорельеф в зоне изнашивания при трении скольжения имеет явно выраженные следы рисок, как результата микрорезания или пластического оттеснения металла. Глубина рисок, их форма, протяжённость, частота размещения, наличие вмятин и выкрашивания - все эти характеристики при различных видах абразивного изнашивания зависят от соотношения свойств абразивной частицы и металла.

Протекание абразивного изнашивания находится в прямой связи с твёрдостью поверхностей.

Абразивное изнашивание металлических поверхностей происходит в случае, если твёрдость абразива выше твёрдости металла, по которому этот абразив в виде твёрдых частиц совершает трение скольжения при определённых скорости относительного перемещения и нагрузке на единичную частицу. Способность частицы внедряться в поверхность изнашивания на первом этапе взаимодействия обуславливает поражение её путём образования лунок; на втором – при движении частицы вдоль поверхности трения скольжения – путём микрорезания, пластического деформирования, выкрашивания [4].

Твёрдость определяет возможность развития второго этапа - микрорезания при движении частицы по поверхности.

Относительная износостойкость  $\varepsilon$  материала рабочего органа находится в линейной связи с его твёрдостью  $H_m$  [5]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + b(H_i - H_0), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – относительная износостойкость данной стали в отожжённом состоянии,

$H_0$  – твёрдость данной стали в отожжённом состоянии,

$b$  – коэффициент, зависящий от состава стали.

Вид взаимодействия определяется физико-механическими свойствами взаимодействующих материалов. Существенное влияние на него оказывают такие свойства материалов, как строение кристаллической решётки и прочность межмолекулярных связей в них.

И.В. Крагельским предложена обобщённая зависимость удельного износа от относительного внедрения –  $h/R$  (где  $h$  – глубина внедрения абразивной частицы в материал,  $R$  – величина радиуса закругления выступов абразивных частиц грунта) [3].

Она охватывает три области: упругого оттеснения, пластического оттеснения и микрорезания. При переходе из одной области в другую удельный износ может изменяться в пределах восьми порядков.

Для расчета величины данного критерия при взаимодействии его с песчаным абразивом в грунте, используется следующая расчетная схема (рисунок 1) [6].



Грунт с песчаными включениями представлен в виде системы штампов. Каждый штамп имеет прямоугольную форму. На поверхности штампа, взаимодействующей с материалом коронки, имеется множество сферических выступов, описывающих абразивные зёрна. Величины радиусов сферических выступов равны радиусам выступов частиц песка в грунте.

Штамп внедряется в материал коронки под действием части нормальной составляющей силы рыхления.

Для расчётной схемы был предусмотрен ряд допущений:

- все сферические выступы расположены на одном уровне;
- нагрузка на выступы пропорциональна суммарной площади сечения абразивных зёрен;
- выступы на штампе распределены случайно равномерно;
- материал коронки представляет собой упругое тело с определённым модулем упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$ .

Опираясь на исследования Зеленина А.И. [7], можно принять, что нагрузка на переднюю грань коронки распределяется по пропорциональному закону. Исходя из этого, можно определить усилия на каждый штамп.

Исследования И.Г. Горячевой [8] показывают, что перемещение под отдельным выступом штампа будет определяться из следующего уравнения:

$$\eta_i = aQ_i^{2/3} + bQ_i + c \sum_{j=1}^{i-1} Q_j \arcsin \frac{R}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} + c \sum_{j=i+1}^n Q_j \arcsin \frac{R}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус выступов частиц песка, мм;

$x, y$  – координаты расположения частиц песка в штампе, мм;

$Q$  – усилие внедрения частицы в материал коронки зуба, Па;

$E, \nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона;

$a, b, c$  – коэффициенты, зависящие от радиуса выступов частиц песка и физико-механических свойств материала коронки зуба;

$$a = \left[ \frac{9(1-\nu^2)^{3/2}}{16E^2R} \right], \quad (4)$$

$$b = \frac{\pi(1-\nu^2)}{8RE(1-4\nu)}, \quad (5)$$

$$c = \frac{1-\nu^2}{\pi RE}. \quad (6)$$

В выше приведённом уравнении (3) имеется составляющая от действия силы на данный выступ и составляющая от влияния перемещения других выступов штампа.

Приравнявая  $\eta_1$  и  $\eta_i$ , имеем

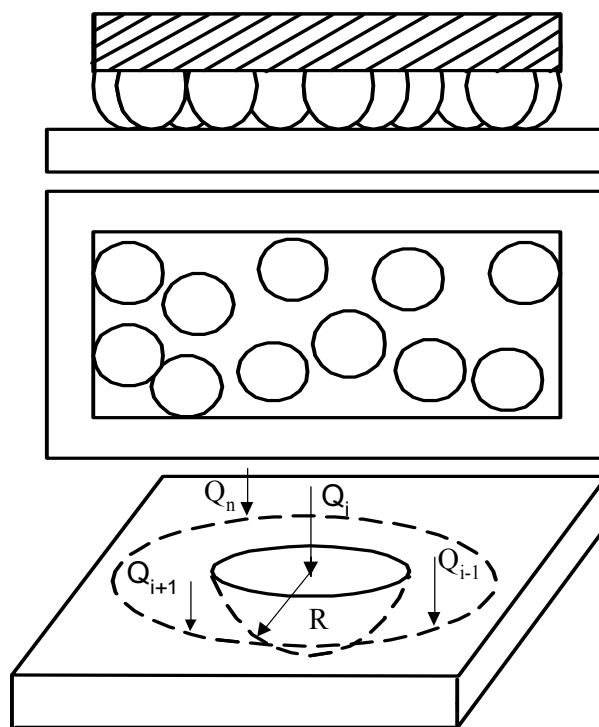


Рисунок 1 – Расчётная схема внедрения штампа с абразивными частицами грунта в материал коронки зуба рыхлителя

$$\sum_{j=1}^n C_{i,j} Q_j = a \left( Q_1^{2/3} - Q_i^{2/3} \right), \quad (7)$$

где  $i=2,3,\dots,n$ ,

$$C_{i,j} = c \begin{cases} \arcsin \frac{R}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2}} - \\ - \arcsin \frac{R}{\sqrt{(x_1 - x_j)^2 - (y_1 - y_j)^2}} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{при} & i \geq 2 \\ & i \neq j, \\ & j \geq 2 \end{matrix} \quad (8)$$

$$C_{i,1} = c \cdot \arcsin \frac{R}{\sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2}} - b \quad \text{при} \quad i \geq 2, \quad (9)$$

$$C_{i,i} = b - c \cdot \arcsin \frac{R}{\sqrt{(x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_i)^2}} \quad \text{при} \quad i \geq 2, \quad (10)$$

$$C_{1,j} = 1.$$

Уравнение (7) дополняем уравнением (11), являющимся условием суммы сил под отдельными зёрнами  $\Sigma Q$  суммарному усилию на штамп  $Q$ :

$$\sum_{j=1}^n Q_j = Q \quad (11)$$

В результате имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n C_{ij} Q_j = a \cdot \left( Q_1^{2/3} - Q_i^{2/3} \right), \\ \sum_{i=1}^n Q_i = Q. \end{cases} \quad (12)$$

Активная разработка мёрзлых и прочных грунтов вынуждает конструкторов искать пути повышения износостойкости рабочих органов, осуществляющих эту разработку.

Методики укрепления предлагаются самые различные: наварка, использование термической обработки, методов наклёпа, износостойких накладок. Наиболее перспективным, на наш взгляд, является использование метода накладок и наварка.

Для повышения эффективности разработки грунтов и увеличения износостойкости могут быть использованы следующие пути:

- собственно повышение износостойкости материала зуба или наконечника зуба землеройной машины;
- изменение формы рабочего органа с целью повышения износостойкости и снижения действующих сил рыхления;
- использование составных конструкций рабочих органов землеройных машин.

При повышении износостойкости конструкций зубьев и наконечников зубьев землеройных машин большинство авторов предлагает укреплять определённую часть рабочего органа износостойкими материалами.

Обычно, для этого используются износостойкие зубья, устанавливаемые на режущую кромку ковшей, отвалов, или укрепление самой кромки.

Непосредственная эффективность разработки мёрзлого грунта землеройными машинами существующих типов практически невозможна, поэтому для успешной разработки таких грунтов требуется создание новых специальных конструкций машин

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ветров, А.Ю. Резание грунтов землеройными машинами / А.Ю. Ветров. - М.: Машиностроение, 1971.
2. Рекомендации по комплексному изучению и оценке строительных свойств песчаных грунтов./ПНИИИС Госстроя СССР, МИСИ им. Куйбышева. – Стройиздат, 1984. – 212с
3. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов.– М.: Наука, 1977. – 525 с.
4. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 224с.
5. Хрущов, М.М. Абразивное изнашивание / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. М.: Наука, 1970. – 252с.
6. Кузнецова, В.Н. Обоснование параметров рабочих органов землеройных машин с повышенной износостойкостью при разработке мерзлых грунтов: дисс. ... канд. техн. наук. / В.Н. Кузнецова. – Омск, 2001. – 184 с.
7. Зеленин, А.Н. Машины для землеройных работ / А.Н. Зеленин, В.И. Баловнев, И.П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 422с.
8. Горячева, И.Г. Контактные задачи в трибологии / И.Г. Горячева, М.Н. Добычин. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.

**Кузнецова Виктория Николаевна**

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск  
Доктор технических наук, профессор, декан факультета «Магистерской и послевузовской подготовки»  
Тел: (3812)-65-07-66

**Авдеева Екатерина Сергеевна**

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск  
Аспирантка кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве»  
Тел: 8-908-310-88-49  
E-mail: katyshka55rus@yandex.ru

УДК 62-587.199

С.А. КУЗНЕЦОВ, А.В. ВЛАДИМИРОВ, В.А. ЛЫСЯНСКИЙ, П.В. ХАРЛАМОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВОГО ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ ПЛАНЕТАРНОГО НАГРУЖАТЕЛЯ С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ

*Представлено исследование планетарного нагружателя с замкнутым контуром направленные на разработку методики определения силового передаточного отношения. Достоверность разработанной методики подтверждается результатами экспериментального определения силового передаточного отношения нагружателя.*

**Ключевые слова:** планетарный нагружатель; силовое передаточное отношение; силовой замкнутый контур.

*Research planetary brake mechanism with the closed contour directed on working out of a technique of definition of the power transfer relation is presented. Reliability of the developed technique proves to be true results of experimental definition of the power transfer relation brake mechanism.*

**Key words:** the planetary brake mechanism; the power transfer relation; the power closed contour.

Из устройств с замкнутым контуром с подтвержденной целесообразностью и работоспособностью наиболее известен стенд для испытания зубчатых колес, содержащий две пары одинаковых зубчатых колес на двух параллельных валах (Испытательный замкнутый стенд [1]). В отличие от незамкнутых (открытых) схем стендов замкнутый не требует нагрузочного устройства и системы охлаждения, поскольку сам является нагрузочным устройством, или нагружателем [2]. Неудобство его использования связано с необходимостью тарировки и контроля затяжки специальной муфты, создающей момент в системе и усилия в зубчатых зацеплениях.

Исследование структуры такого стенда показало, что в замкнутом контуре содержится избыточная связь, образованная дополнительной парой зубчатых колес, которая и позволяет создавать в кинематической цепи напряжение, которое не зависит ни от положения механизма, ни от частоты его вращения. На этом основании структуры с такими свойствами отнесены к *индифферентным*, в отличие от адаптивных, имеющих, наоборот, лишнюю подвижность и соответствующие свойства, противоположные вышеуказанным. Для адаптивных и индифферентных механизмов характерно отсутствие обратной зависимости угловой скорости вращения и момента на выходных звеньях. Например, у автомобильного дифференциала, относящегося к адаптивным механизмам, момент на выходных полуосях не зависит от угловой скорости.

Свойство индифферентности может быть достигнуто и в механизмах нормальной структуры, если условия его достижения определить как размерные, то есть в этом случае можно говорить об индифферентности кинематики, а не структуры. Например, стенд для испытания зубчатых колес может быть выполнен по схеме редуктора Давида, но с симметричными рядами колес, то есть с одинаковыми центральными колесами [3]. В этом случае постоянный момент на валах механизма обеспечивается приложением нагрузочного момента к рычагу 5, соединенному с центральным колесом 1 (рисунок 1).

Поскольку передаточное отношение при передаче движения от центрального колеса 1 к водилу  $i_{1Н} = 1 - \frac{z_2 z_3}{z_1 z_2} = 1 - 1 = 0$  (при  $z_1 = z_3$ ;  $z_2 = z_2 \cdot$ ), а передаточное отношение при

передаче движения от водила к центральному колесу  $i_{Н1} = \frac{1}{i_{1Н}} = \infty$ , центральное колесо 1

такого *псевдоредуктора* неподвижно в любом случае, несмотря на шарнирное соединение со стойкой, а водило вместе с парой одинаковых сателлитов свободно вращается относительно центральных колес. Таким образом, передача движения невозможна ни от центрального колеса к водилу, ни наоборот, что является надежным признаком индифферентного механизма.

В то же время приложение усилия к рычагу 5 вызывает заметное изменение момента на свободновращающемся водиле, что позволяет предположить, что в данном случае силовые соотношения не определяются кинематическим передаточным отношением. Таким образом, возникает задача определения силового передаточного отношения, не равного кинематическому.

Один из немногочисленных примеров кинетостатического анализа планетарного механизма изложен в книге С.Н. Кожевникова [4], да и то в разделе, посвященном определению КПД. Условие равновесия сателлита (рисунок 2) он представляет трехчленным:

$$\bar{P}_{12} + \bar{P}_{32} + \bar{P}_{42} = 0,$$

при этом сумма моментов сил, действующих на сателлит относительно оси вращения его, приравнивается нулю:

$$P_{12}r_2 + P_{32}r_2' = 0.$$

Выразив усилия, действующие на звенья эпициклической передачи,

$$P_{12} = -P_{32} \frac{r_2'}{r_2},$$

$$P_{42} = -P_{32} \left( 1 - \frac{r_2'}{r_2} \right).$$

$$P_{12} = \frac{M_1}{r_1},$$

автор приходит к выражению для момента, прикладываемого к колесу  $z_3$ :

$$M_3 = P_{32}r_3 = -\frac{r_3r_2}{r_1r_2'} M_1 = M_1 i_{13}$$

т.е. моменты  $M_1$  и  $M_3$  относятся так же, как и в простой передаче.

Такой способ не способен выявить отличие силового передаточного отношения нагрузителя (псевдоредуктора) от кинематического, видимо, потому, что не учитывает аномальность его кинематики. Индифферентность кинематики указывает, в общем случае, на ее переопределенность, то есть на избыточный размер, который может быть компенсирован дополнительным силовым параметром [5]. В случае с планетарным нагрузителем (рисунок 1) это может быть сила  $F_{р.н.}$  от момента  $M_{р.н.}$ , приложенного к нагрузочному рычагу.

Тогда уравнение равновесия для системы принимает вид:

$$\bar{F}_{42} + \bar{F}_{21} + \bar{F}_{32'} + \bar{F}_{р.н.} = 0.$$

С учетом направления действия сил:

$$F_{42} + F_{21} + F_{32'} - F_{р.н.} = 0,$$

$$\text{где } F_{42} = \frac{M_H}{r_1 + r_2}, F_{21} = \frac{M_H}{r_2}, F_{32'} = \frac{M_H}{r_2'}, F_{р.н.} = \frac{M_{р.н.}}{r_1}.$$

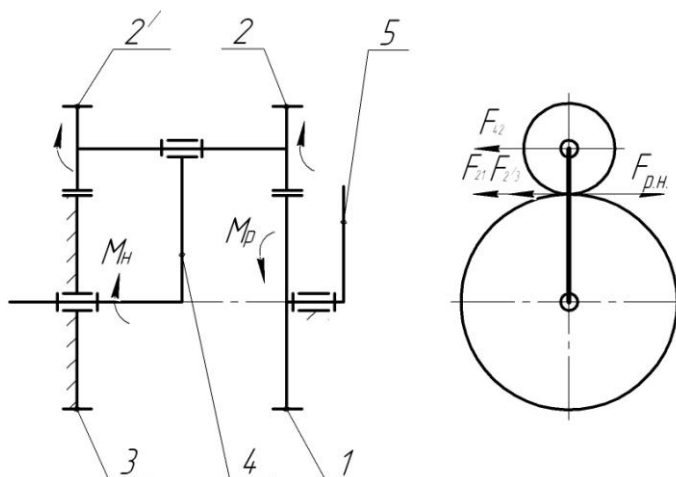


Рисунок 1 – Планетарный нагрузитель  
1 – подвижное центральное колесо;  
2, 2' – сателлиты; 3 – неподвижное центральное колесо; 4 – водило; 5 – рычаг управления

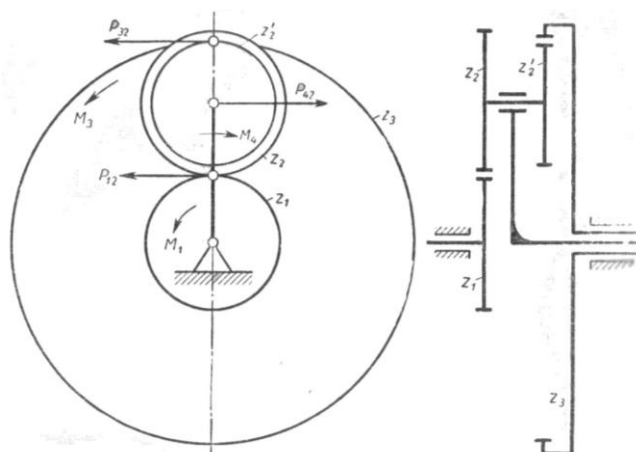


Рисунок 2 – Усилия в эпициклической передаче

Запишем уравнение равновесия через моменты, действующие на механизм, с учетом попарного равенства колес  $r_1 = r_3$  и  $r_2 = r_2'$  или  $z_1 = z_3$  и  $z_2 = z_2'$ :

$$\frac{M_H}{z_1 + z_2} + 2 \frac{M_H}{z_2} = \frac{M_{p.n.}}{z_1},$$

откуда момент, прикладываемый к рычагу:

$$M_H \left( \frac{z_1}{z_1 + z_2} + \frac{2z_1}{z_2} \right) = M_{p.n.}$$

Итак, силовое передаточное число планетарного нагружателя определяется выражением:

$$u = \frac{1}{\left( \frac{z_1}{z_1 + z_2} + \frac{2z_1}{z_2} \right)} = \frac{M_H}{M_{p.n.}}$$

Для опытного образца планетарного нагружателя с числами зубьев колес  $z_1 = z_3 = 22$ ,  $z_2 = z_2' = 18$  силовое передаточное число составит:

$$\frac{1}{\left( \frac{z_1}{z_1 + z_2} + \frac{2z_1}{z_2} \right)} = \frac{1}{\left( \frac{22}{22+18} + \frac{2 \cdot 22}{18} \right)} = 0,33.$$

С целью подтверждения разработанной методики определения силового передаточного отношения планетарного нагружателя, которое представляет собой соотношение входного момента  $M_{вх}$  от двигателя и момента  $M_{p.n.}$  приложенного к рычагу нагружателя, была разработана установка, позволяющая экспериментально определить момент на водиле при заданном нагрузочном моменте.

Установка (рисунок 3) содержит балансирный двигатель типа ЗАСМ – 400У3 1, редуктор 2 с хвостовиком 3 в виде полого вала, внутри которого размещен выходной вал 4, посредством разъемной муфты 5 соединенный с испытуемым нагружателем 6.

Относительная погрешность в расхождении расчетного и экспериментального силового передаточного отношения составила 3,03 %.

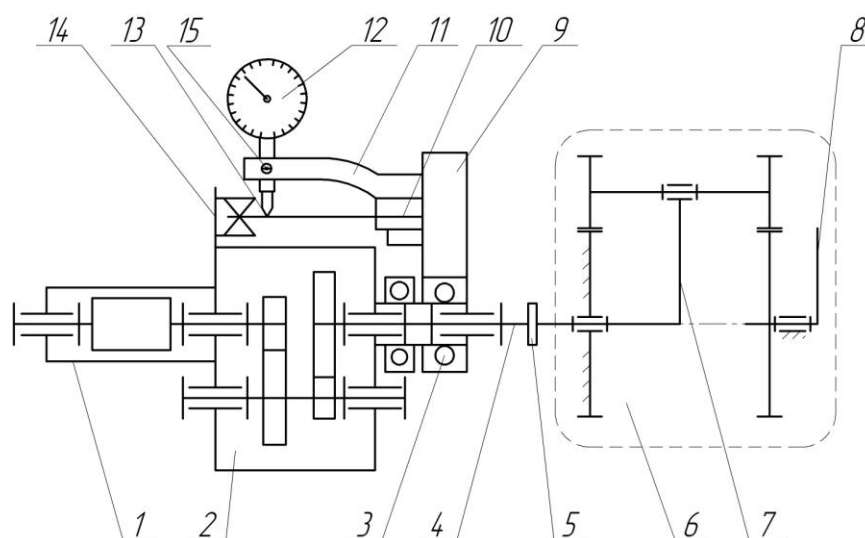


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки

- 1 – балансирный двигатель; 2 – редуктор; 3 – хвостовик; 4 – выходной вал;  
 5 – муфта; 6 – нагружатель; 7 – водило; 8 – рычаг управления нагружателем;  
 9 – подшипник; 10 – станина; 11 – кронштейн; 12 – индикатор часового типа;  
 13 – пластинчатая пружина 14 – рычаг; 15 – винт

Таким образом, для планетарного нагружателя, представляющего собой симметричный двухрядный планетарный редуктор Давида, силовое передаточное отношение отличается



ся от кинематического, равного бесконечности, а при его определении необходимо учитывать дополнительный силовой параметр – усилие на нагрузочном рычаге. Полученное устройство можно использовать не только в качестве стенда для испытания зубчатых колес с возможностью оперативного изменения и контроля нагрузочного момента в процессе работы, но и в качестве генератора момента (тормоза) во всех случаях, когда необходимо задавать момент сопротивления нефрикционным способом.

Данное исследование проводилось в рамках темы по заданию Федерального агентства по образованию РФ «Разработка теоретических основ проектирования устройств вариации скорости и мониторинга критических состояний фрикционных систем транспортных средств», ЮРГУЭС-2.10Ф 2010 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнев, А.Ф. Словарь справочник по механизмам [Текст] / А.Ф. Крайнев – М.: Машиностроение, 1987. – 560 с.
2. Решиков, В.Ф. Трение и износ тяжело нагруженных передач [Текст] / В.Ф. Решиков – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
3. Пат. №2214585 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G01M13/02. Стенд для испытания зубчатых колес [Текст] / Кузнецов С.А., Косов А.В.; заявитель и правообладатель Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса. – № 2002103652/11; заявл. 08.02.02; опубл. 20.10.03, Бюл. №29. – 4 с.: ил.
4. Кожевников, С.Н. Теория механизмов и машин [Текст] / С.Н. Кожевников – М.: Машиностроение, 1976 – 784 с.
5. Кузнецов, С.А., Прямолинейно огибающие механизмы [Текст]: Анализ и синтез: монография / С.А. Кузнецов, В.А. Владимиров. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007 – 139 с.

### **Кузнецов Сергей Анатольевич**

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»  
346500 г. Шахты Ростовской обл., ул. Шевченко, 147  
тел.: 8-928-132-72-21

### **Владимиров Алексей Викторович**

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»  
346500 г. Шахты Ростовской обл., ул. Шевченко, 147  
Тел.: 8-918-854-60-93  
E-mail: vladimirov2005@mail.ru

### **Лысянский Вячеслав Анатольевич**

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса  
Аспирант кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»  
346500 г. Шахты Ростовской обл., ул. Шевченко, 147  
Тел.: 8-908-507-38-05  
E-mail: slav231@mail.ru

### **Харламов Павел Викторович**

Ростовский государственный университет путей сообщения  
Ассистент кафедры «Транспортные машины и триботехника»  
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2  
Тел.: 8-928-774-57-85  
E-mail: kcharlamov@yandex.ru

Ш.Г. ГАСАНОВ

**КОГЕЗИОННАЯ ТРЕЩИНА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА УПРУГИХ СРЕД**

*Рассматривается плоская задача о трещине, возникающей на границе раздела двух однородных изотропных сред с различными упругими постоянными. Считается, что зона процесса разрушения представляет собой слой конечной длины, содержащий материал с частично нарушенными межчастичными связями (концевая область), рассматриваемый как часть трещины. Анализ предельного равновесия когезионной трещины выполняется на основе двухпараметрического критерия разрушения.*

**Ключевые слова:** кусочно-однородная среда, когезионная трещина на границе раздела, силы сцепления, концевая зона со связями между берегами

*The plane problem of cracks occurring at the interface of two homogeneous isotropic media with different elastic constants was considered. It is believed that the zone of fracture is a layer of finite length, containing material with a partially disrupted interfacial bonds (end zone), considered as part of the crack. Analysis of limit equilibrium cohesive crack running is performed through a two-parameter fracture criterion.*

**Key words:** piecewise-homogeneous medium, cohesive crack at the interface, adhesion forces, end zone with interfacial bonds.

Рассматривается задача о распределении напряжений деформаций вблизи края трещины со связями между берегами, возникающей на границе раздела двух однородных изотропных сред с различными упругими постоянными. Полагаем наличие областей, в которых берега трещины взаимодействуют. Считается, что эти области примыкают к вершине трещины. Взаимодействие берегов трещины в концевой области моделируется введением между берегами трещины связей (сил сцепления), имеющих заданную диаграмму деформирования. Физическая природа таких связей и размеры концевых зон, в которых осуществляется взаимодействие берегов трещины, зависят от вида материала. При действии внешних нагрузок на двухслойное тело в связях, соединяющих берега трещины, в общем случае будут возникать нормальные  $q_y(x)$  и касательные  $q_{xy}(x)$  усилия. Это позволяет моделировать поведение материала в промежуточном адгезионном слое в концевых зонах трещины. Величины напряжений  $q_y(x)$  и  $q_{xy}(x)$  неизвестны и должны быть определены при решении задачи механики разрушения. Асимптотическое решение такой задачи возможно, оно основано на представлении о тонкой структуре конца трещины.

Рассмотрим окрестность конца трещины, которая мала по сравнению с характерным линейным размером  $L$  двухслойного тела, но больше сравнительно с характерным размером  $d$  концевой области трещины. На основе представлений о тонкой структуре конца трещины и «принципа микроскопа» [1] приходим к следующей сингулярной задаче для двухслойного упругого тела.

Трещина на плоскости  $xOy$  представится полубесконечным разрезом вдоль  $y=0$ ,  $-\infty < x < 0$ . При этом в части разреза длиной  $d$  (концевая зона), примыкающей к ее вершине, берега трещины будут взаимодействовать. Вне этого участка берега трещины будут свободны от нагрузок. Концевая область, примыкающая к вершине трещины, мала по сравнению с остальной частью двухслойного тела. Поэтому ее можно мысленно удалить, заменив разрезом поверхности, которого взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала. Следовательно, к берегам разреза в концевой области будут приложены нормальные и касательные напряжения, численно равные соответственно  $q_y(x)$  и  $q_{xy}(x)$ .

На бесконечности реализуется напряженное поле характерное для тонкой структуры конца трещины. Это поле считается заданным и имеет следующий вид [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[ 3\cos\frac{\theta}{2} - 2\beta\sin\theta \cdot \cos\frac{3\theta}{2} - \sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} \right] - e^{\beta(\theta-\pi)} \cos\frac{\theta}{2} \right\} - \\ &- \frac{K_{II}^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{\beta(\theta-\pi)} \sin\frac{\theta}{2} + e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[ -3\sin\frac{\theta}{2} + \sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} - 2\beta\sin\theta \cdot \sin\frac{3\theta}{2} \right] \right\}; \quad (1) \\ \sigma_y &= \frac{K_I^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[ \cos\frac{\theta}{2} + 2\beta\sin\theta \cdot \cos\frac{3\theta}{2} + \sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} \right] + e^{\beta(\theta-\pi)} \cos\frac{\theta}{2} \right\} - \\ &- \frac{K_{II}^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ -e^{\beta(\theta-\pi)} \sin\frac{\theta}{2} + e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[ \sin\frac{\theta}{2} - \sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} + 2\beta\sin\theta \cdot \sin\frac{3\theta}{2} \right] \right\} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[ \sin\frac{\theta}{2} + \sin\theta\cos\frac{3\theta}{2} - 2\beta\sin\theta \cdot \sin\frac{3\theta}{2} \right] - e^{\beta(\theta-\pi)} \sin\frac{\theta}{2} \right\} - \\ &- \frac{K_{II}^\infty}{2ch\pi\beta\sqrt{2\pi r}} \left\{ -e^{\beta(\theta-\pi)} \cos\frac{\theta}{2} + e^{-\beta(\theta-\pi)} \left[ -\cos\frac{\theta}{2} + \sin\theta\sin\frac{3\theta}{2} + 2\beta\sin\theta \cdot \cos\frac{3\theta}{2} \right] \right\}. \end{aligned}$$

В поставленной задаче параметрами нагружения являются коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I^\infty$ ,  $K_{II}^\infty$ , представляющие собой некоторые функции формы тела и граничных условий. Они определяются из решения задачи «в целом».

На основании вышесказанного приходим к следующей задаче для кусочно-однородного тела с полубесконечным разрезом с концевой зоной:

$$\begin{aligned} \sigma_y - i\tau_{xy} &= 0 \quad \text{при } y=0, \quad -\infty < x < -d \\ \sigma_y - i\tau_{xy} &= q_y(x) - iq_{xy}(x) \quad \text{при } y=0, \quad -d \leq x \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $i$  – мнимая единица.

Основные соотношения поставленной задачи должны быть дополнены уравнением, связывающем перемещения раскрытия трещины и усилия в связях. Это уравнение без потери общности можно представить [2, 3] в виде

$$(v^+ - v^-) + i(u^+ - u^-) = C(x, \sigma) \downarrow_y(x) + iq_{xy}(x) \quad (3)$$

где функцию  $C(x, \sigma)$  можно рассматривать как эффективную податливость связей, зависящую от натяжения связей;  $\sigma = \sqrt{q_y^2 + q_{xy}^2}$  – модуль вектора усилий в связях. При постоянном значении  $C(x, \sigma)$  имеем в (3) линейный закон деформирования связей.

С помощью формул Колосова-Мусхелишвили [4] имеем

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(k)} + \sigma_y^{(k)} &= 2 \left[ \Phi_k(z) + \overline{\Phi_k(z)} \right] \quad (z = x + iy), \\ \sigma_x^{(k)} + i\tau_{xy}^{(k)} &= \Phi_k(z) + \overline{\Phi_k(z)} + z\Phi_k'(z) + \overline{\Psi_k(z)}, \\ 2G_k(u^{(k)} + iv^{(k)}) &= k_k \varphi_k(z) + \overline{z\Phi_k(z)} + \overline{\psi_k(z)} \quad (k=1, 2) \end{aligned} \quad (4)$$

где  $k_1 = 3 - 4\mu_1$ ;  $k_2 = 3 - 4\mu_2$ ;  $\Phi_1(z)$  и  $\Psi_1(z)$  – аналитические функции при  $y > 0$ ;  $\Phi_2(z)$  и  $\Psi_2(z)$  – аналитические функции при  $y < 0$ .

Следуя [5], введем функции  $\Phi(z)$  и  $\Omega(z)$ , аналитические во всей плоскости  $z$ , кроме, может быть, оси  $x$

$$\begin{aligned} \Phi(z) &= \begin{cases} \frac{G_1(1+k_2)}{G_1+k_1G_2} \Phi_2(z) + \frac{G_2-G_1}{G_1+k_1G_2} \left[ \Phi_1(z) + z\overline{\Phi_1'(z)} + \overline{\Psi_1(z)} \right] & (\text{Im } z < 0) \\ \Phi_1(z) & (\text{Im } z > 0) \end{cases} \\ \Omega(z) &= \begin{cases} \frac{G_1(1+k_1)}{G_2+k_2G_1} \left[ \Phi_2(z) + z\overline{\Phi_2'(z)} + \overline{\Psi_2(z)} \right] + \frac{G_1k_2-G_2k_1}{G_2+k_2G_1} \Phi_1(z) & (\text{Im } z > 0) \\ \Phi_1(z) + z\overline{\Phi_1'(z)} + \overline{\Psi_1(z)} & (\text{Im } z < 0) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

Из этих формул получаем необходимые в дальнейшем основные соотношения, выражающие компоненты тензора напряжений и производные по  $x$  от компонент вектора перемещений через комплексные потенциалы  $\Phi(z)$  и  $\Omega(z)$ .

В верхней полуплоскости ( $\text{Im } z > 0$ )

$$\begin{aligned} \sigma_x + \sigma_y &= 4 \operatorname{Re} \Phi(z), \\ \sigma_x - i\tau_{xy} &= \Phi(z) + \Omega(z) + (z - \bar{z})\overline{\Phi'(z)}, \\ 2G_1\left(\frac{\partial u}{\partial x} + i\frac{\partial v}{\partial x}\right) &= k_1\Phi(z) - \Omega(z) - (z - \bar{z})\overline{\Phi'(z)}, \end{aligned} \quad (6)$$

в нижней полуплоскости ( $\text{Im } z < 0$ )

$$\begin{aligned} \sigma_x + \sigma_y &= 4 \frac{C_2}{G_1(1+k_2)} \operatorname{Re} \left[ \Phi(z) + \frac{G_1 - G_2}{C_2} \Omega(z) \right], \\ \sigma_x - i\tau_{xy} &= \frac{C_2}{G_1(1+k_2)} \Phi(z) + \frac{G_1 - G_2}{G_1(1+k_2)} \Omega(z) + \frac{C_1}{G_1(1+k_2)} \Omega(z) + \\ &+ \frac{G_1 k_2 - G_2 k_1}{G_1(1+k_2)} \Phi(z) + (z - \bar{z}) \left[ \frac{C_2}{G_1(1+k_2)} \overline{\Phi'(z)} + \frac{G_1 - G_2}{G_1(1+k_2)} \overline{\Omega'(z)} \right], \\ 2G_2\left(\frac{\partial u}{\partial x} + i\frac{\partial v}{\partial x}\right) &= k_2 \frac{C_2}{G_1(1+k_2)} \Phi(z) + k_2 \frac{G_1 - G_2}{G_1(1+k_2)} \Omega(z) - \frac{C_1}{G_1(1+k_2)} \Omega(z) - \\ &- \frac{G_1 k_2 - G_2 k_1}{G_1(1+k_2)} \Phi(z) + (z - \bar{z}) \left[ \frac{C_2}{G_1(1+k_2)} \overline{\Phi'(z)} + \frac{G_1 - G_2}{G_1(1+k_2)} \overline{\Omega'(z)} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $C_1 = G_2 + k_2 G_1$ ;  $C_2 = G_1 + k_1 G_2$ .

С учетом соотношений (6) и (7), граничные условия (2) запишем в виде

$$\Phi^+ + \Omega^- = f^+ \quad (8)$$

$$C_2 \Phi^- + (G_1 - G_2) \Omega^- + (G_1 k_2 - G_2 k_1) \Phi^+ + C_1 \Omega^+ = G_1(1+k_2) f^-(x),$$

где  $f^\pm(x) = 0$  при  $-\infty < x < -d$ ;  $f^\pm(x) = q_y(x) - iq_{xy}(x)$  при  $-d \leq x \leq 0$ ; знаки плюс и минус соответствуют верхнему и нижнему берегам трещины с концевой зоной.

После некоторых элементарных преобразований получаем две, решаемые порознь, краевые задачи линейного сопряжения для одной функции

$$\begin{aligned} F_1^+ - F_1^- &= f^+ - f^- \quad (-\infty < x < 0) \\ F_2^+ + gF_2^- &= f_0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{где } F_1(z) = \frac{1}{G_1(1+k_2)} [C_2 \Phi(z) - C_1 \Omega(z)],$$

$$F_2(z) = \Phi(z) + \Omega(z),$$

$$g = \frac{C_2}{C_1},$$

$$f_0 = \frac{B}{C_1} f^+,$$

$$B = G_2(1+k_1) + G_1(1+k_2).$$

Общее решение неоднородной задачи (9) запишется в виде

$$F_1(z) = C \quad (10)$$

$$F_2(z) = \frac{1}{2\pi i z^{1/2-i\beta}} \int_{-d}^0 \frac{x^{1/2-i\beta} f_0 dx}{x-z} + \frac{K_1^\infty - iK_2^\infty}{2\sqrt{2\pi} z^{1/2-i\beta}},$$

где  $\beta = \frac{1}{2\pi} \ln g$ .

Из условия на бесконечности следует, что  $C = 0$ . Формулы для функций  $\Phi \in \tilde{\Gamma}$  и  $\Omega \in \tilde{\Gamma}$  примут следующий вид

$$\Phi(z) = \frac{C_1}{B} F_2(z); \quad \Omega(z) = \frac{C_2}{B} F_2(z) \quad (11)$$

Для окончательного определения потенциалов  $\Phi \in \tilde{\Gamma}$  и  $\Omega \in \tilde{\Gamma}$  необходимо найти усилия  $q_y(x)$  и  $q_{xy}(x)$  в связях между берегами трещины в концевой зоне. Эти неизвестные усилия в связях, возникающие на берегах трещины в концевой зоне, определяются с помощью уравнения (3). В рассматриваемой задаче это дополнительное условие удобнее записать для производной раскрытия смещения берегов трещины

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ u^{(1)} - u^{(2)} + i(v^{(1)} - v^{(2)}) \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \sigma_{xy}(x) + iq_y(x) \right]$$

где  $x$  – аффиксы точек концевой зоны трещины  $-d \leq x \leq 0$ .

Для вывода интегродифференциального уравнения относительно неизвестной функции  $q_y - iq_{xy}$  рассмотрим полученные формулы. На основании этих формул, осуществляя предельный переход на контур трещины при  $y \rightarrow \pm\infty$  получим следующие соотношения

$$2G_1 \frac{\partial}{\partial x} (u^{(1)} + iv^{(1)}) = k_1 \Phi^+ - \Omega^- \quad (12)$$

$$2G_2 \frac{\partial}{\partial x} (u^{(2)} + iv^{(2)}) = \frac{1}{G_1(1+k_2)} \left[ C_2 \Phi^- + k_2(G_1 - G_2) \Omega^- - C_2 \Omega^+ - (G_1 k_2 - G_2 k_1) \Phi^+ \right]$$

Применяя к правой части (10) формулу Сохоцкого-Племеля [4], находим

$$F_2^+(x) = \frac{1}{2} f_0 + \frac{1}{2\pi i X^+(x)} \int_{-d}^0 \frac{X^+(t) f_0 dt}{t-x} + \frac{D}{X^+(x)} \quad (13)$$

$$F_2^-(x) = \frac{f_0}{2g} - \frac{1}{g} \frac{1}{2\pi i X^+(x)} \int_{-d}^0 \frac{X^+(t) f_0 dt}{t-x} - \frac{D}{g X^+(x)},$$

$$\Phi^\pm(z) = \frac{C_1}{B} F_2^\pm(z), \quad \Omega^\pm(z) = \frac{C_2}{B} F_2^\pm(z),$$

$$D = \frac{K_I^\infty - iK_{II}^\infty}{2\sqrt{2\pi}}, \quad X^+(x) = x^{1/2-i\beta}.$$

Используя формулы (13), окончательно найдем

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ u^{(1)} - u^{(2)} + i(v^{(1)} - v^{(2)}) \right] = D_1 f_0 + D_2 \left( I + \frac{D}{X^+(x)} \right) \quad (14)$$

$$\text{где } D_1 = \frac{1}{2G_1 B} \left( k_1 C_1 - \frac{1}{g} C_2 - \frac{B_1 - B_2}{G_2(1+k_2)} \right), \quad D_2 = \frac{1}{2G_1 B} \left( \frac{B_1 + B_2}{G_2(1+k_2)} + k_1 C_1 + \frac{C_2}{g} \right),$$

$$I = \frac{1}{2\pi i X^+(x)} \int_{-d}^0 \frac{X^+(t) f_0 dt}{t-x}.$$

Интеграл  $I$ , содержащий функцию  $X^+(t)$ , вычисляется приемом, предложенным Н.И.Мухелишвили [4, §110].

Удовлетворяя дополнительному условию (3), получим комплексное интегродифференциальное уравнение относительно неизвестных усилий в связях между берегами трещины в концевой зоне

$$D_1 \frac{B}{C_1} (q_y(x) - iq_{xy}(x)) + D_2 \frac{B}{C_1} \frac{1}{2i\pi X^+(x)} \int_{-d}^0 \frac{X^+(t)(q_y - iq_{xy})dt}{t-x} + \frac{D_2 D}{X^+(x)} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ C(x, \sigma) (q_{xy}(x) + iq_y(x)) \right] \quad (15)$$

Полученное уравнение (15) представляют собой интегродифференциальное уравнение с ядром типа Коши и может быть решено только численно. Для решения (15) можно использовать коллокационную схему с аппроксимацией неизвестных функций. В случае, когда закон деформирования связей нелинейный, для нахождения усилий в связях  $q_y(x)$  и  $q_{xy}(x)$  используется итерационная схема, подобная методу упругих решений [6].

Чтобы избежать решения интегродифференциальных уравнений представим комплексное уравнение (15) в следующем виде

$$\int_{-d}^x Q_1(x) dx = C(x, \sigma) q_y(x) \quad (16)$$

$$\int_{-d}^x Q_2(x) dx = C(x, \sigma) q_{xy}(x)$$

Здесь  $Q_1(x)$  и  $Q_2(x)$  – действительная и мнимая части выражения, находящегося в левой части уравнения (15).

Разобьем отрезок  $(-d, 0)$  на  $M$  узловых точек  $x_m (m=1, 2, \dots, M)$  и потребуем выполнения условий (16) в узловых точках. В результате вместо каждого из уравнений (16) получим алгебраические системы из  $M$  уравнений для определения приближенных значений  $q_y(x_m)$  и  $q_{xy}(x_m)$

$$A Q_1(x_1) = C(x_1, \sigma(x_1)) q_y(x_1), \quad (17)$$

$$A(Q_1(x_1) + Q_1(x_2)) = C(x_2, \sigma(x_2)) q_y(x_2),$$

.....

$$A \sum_{m=1}^M Q_1(x_m) = C(x_M, \sigma(x_M)) q_y(x_M);$$

$$A Q_2(x_1) = C(x_1, \sigma(x_1)) q_{xy}(x_1), \quad (18)$$

$$A(Q_2(x_1) + Q_2(x_2)) = C(x_2, \sigma(x_2)) q_{xy}(x_2),$$

.....

$$A \sum_{m=1}^M Q_2(x_m) = C(x_M, \sigma(x_M)) q_{xy}(x_M);$$

где  $A = \frac{\pi d}{M}$ .

При получении алгебраических систем интегралы были заменены конечными суммами с помощью квадратурных формул типа Гаусса с выбором главного элемента.

Суммарные коэффициенты интенсивности напряжений от действия внешней нагрузки и внутренних напряжений сцепления в концевой зоне трещины будут иметь вид

$$K_I + iK_{II} = K_I^\infty + iK_{II}^\infty - \frac{ch\pi\beta}{2^{1/2-i\beta}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} l^{1/2+i\beta} \int_{-d/l}^0 (\xi)^{-1/2+i\beta} (q_y(\xi) + iq_{xy}(\xi)) d\xi \quad (19)$$

Для определения предельно-равновесного состояния двухслойного тела с трещиной с концевой зоной необходимы два условия разрушения (двухпараметрический критерий разрушения): 1) условие продвижения вершины трещины с концевой зоной; 2) условие разрыва связей на краю концевой зоны. В качестве первого условия разрушения используем силовой критерий продвижения вершины трещины

$$K_0 = K_c \quad (20)$$

где  $K_0 = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$  – модуль коэффициентов интенсивности напряжений от действия внешних нагрузок и напряжений в связях;  $K_c$  – трещиностойкость, соответствующая механизму деформирования связей в малой области вблизи вершины трещины.

В качестве второго условия разрушения используем условие критического раскрытия трещины.

Полагаем, что разрыв связей на краю концевой области происходит при выполнении условия

$$\left| v^+(-d,0) - v^-(-d,0) + i(u^+(-d,0) - u^-(-d,0)) \right| = \delta_c \quad (21)$$

где  $\delta_c$  – предельная вытяжка связи.

Используя полученное решение, предельное условие (21) можно также записать в виде

$$C(-d, \sigma(-d))\sigma(-d) = \delta_c \quad (22)$$

Совместное решение полученных алгебраических систем и условий (20), (22) дает возможность (при заданных характеристиках связей материала, трещиностойкости) определить критическую величину внешней нагрузки, при которой происходит рост трещины.

### **ВЫВОДЫ**

Модель когезионной трещины на границе раздела упругих материалов позволяет исследовать основные закономерности распределения усилий в связях при различных законах их деформирования; оценивать критическую внешнюю нагрузку и трещиностойкость композиционного материала или адгезионного соединения.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
2. Гаджиев, В.Д. Предельно-равновесное состояние детали типа втулки контактной пары при наличии трещин со связями между берегами / В.Д. Гаджиев, В.М. Мирсалимов // Оптимальное проектирование механических систем. Баку : Элм, 1999, с.50-63.
3. Гольдштейн, Р.В. Рост трещин по границе соединения материалов / Р.В. Гольдштейн, М.Н. Перельмутер // Проблемы механики: сб. статей к 90-летию со дня рождения А.Ю.Ишлинского / Под ред. Д.М.Климова. – М.: Физматлит, 2003. – с. 221-238.
4. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
5. Черепанов, Г.П. Механика разрушения композиционных материалов / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1983. – 296 с.
6. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин. – М.: Гостехиздат., 1948. –376 с.

#### **Гасанов Шахин Гумбат оглы**

Бакинский филиал Московского государственного открытого университета, г. Баку

кандидат технических наук, доцент

Тел. (+99412) 598-18-21

E-mail: irakon63@hotmail.com

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 539.374:621.774.63

Т.В. ФЁДОРОВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБКИ ТРУБЫ С ДОРНОМ НАМАТЫВАНИЕМ В DEFORM-3D

*В статье приведены результаты моделирования процесса гибки трубы наматыванием в среде DEFORM. Произведена оценка влияния положения дорна на овализацию поперечного сечения трубы после гибки.*

**Ключевые слова:** *гибка трубы наматыванием; влияние дорна; конечно-элементное моделирование гибки трубы.*

*In article results for modeling of the pipe bending process by winging in the environment of DEFORM are presented. The estimation of the influence of the mandrel position on the pipe cross section ovalization after bending is made.*

**Key words:** *pipe bending by winging; influence of the mandrel; finite element modeling pipe bending.*

Современные требования к производству таковы, что принцип «доработки в процессе обкатки» не устраивает ни отечественного производителя, ни тем более зарубежного. В связи с этим вопросы всестороннего исследования получаемой продукции, в данном случае изогнутых сегментов трубопроводов, являются первостепенными. Разрешить эти, да и многие другие вопросы, например износа и долговечности, поможет имитационное моделирование.

Развитие численных методов решения задач механики деформированного твердого тела [1] и стремительное развитие вычислительной техники привело к появлению прикладных программ моделирования процессов обработки металлов давлением.

Одной из таких программ является Deform<sup>1</sup>. В процессе тестирования программы Deform-3D V.6.1. (с 30.04.2006 по 30.06.2006) на кафедре «Автоматизированные процессы бесстружковой обработки материалов» Орловского государственного технического университета был проведен ряд расчетов, в том числе проверка различных схем гибки труб.<sup>2</sup>

В частности проводилось исследование влияния дорна, а также его положения на изменение геометрии профилей продольного и поперечного сечения трубы после гибки наматыванием на копир [2-5].

К изогнутым трубам, служащим элементами трубопроводов ответственного назначения, предъявляют повышенные требования в отношении постоянства площади проходного сечения (т.е. высоты и ширины). Использование дорнов позволяет выдерживать указанные требования, но повышает производственные затраты. Однако присутствует и отрицательная сторона этого явления – дополнительное утонение стенки трубы, что может привести к разрыву стенки или преждевременному износу таких изогнутых участков в процессе эксплуатации.

Дорн в данной схеме позволяет создать предварительную деформацию стенки трубы, приводящую к увеличению высоты сечения (рисунок 1), которая, затем компенсируется при гибке уменьшением высоты сечения.

Построенная в программе математическая модель процесса гибки трубы наматыванием позволила в результате численного эксперимента определить зависимость высоты поперечного сечения трубы и изменение толщины стенки после гибки на угол 90° от положения дорна. Зависимость представлена на рисунке 1, а также в таблице.

<sup>1</sup> Разработчик Scientific Forming Technologies Corporation, подробности на сайте [www.deform.com](http://www.deform.com).

<sup>2</sup> Предоставленный в тестовую эксплуатацию ООО «Инжиниринговая компания Артех», [www.artech-eng.ru](http://www.artech-eng.ru)



Таблица 1 – Размеры поперечного сечения согнутой трубы в зависимости от смещения дорна в процессе гибки  $\Delta x$

$\Delta x$ , мм	$t_{min}$ , мм	$t_{max}$ , мм	$d_{min}$ , мм	$d_{max}/2$ , мм	Овализация, $(d_{max}-d_{min})/d_0$
-2,75	2,709	3,270	31,091	15,980	0.02716
0,00	2,694	3,269	31,244	15,970	0.02175
3,00	2,669	3,249	31,389	15,962	0.01672
6,00	2,640	3,249	31,547	15,943	0.01059
9,00	2,625	3,254	31,741	15,897	0.00166
12,00	2,621	3,262	31,976	15,828	-0.01000

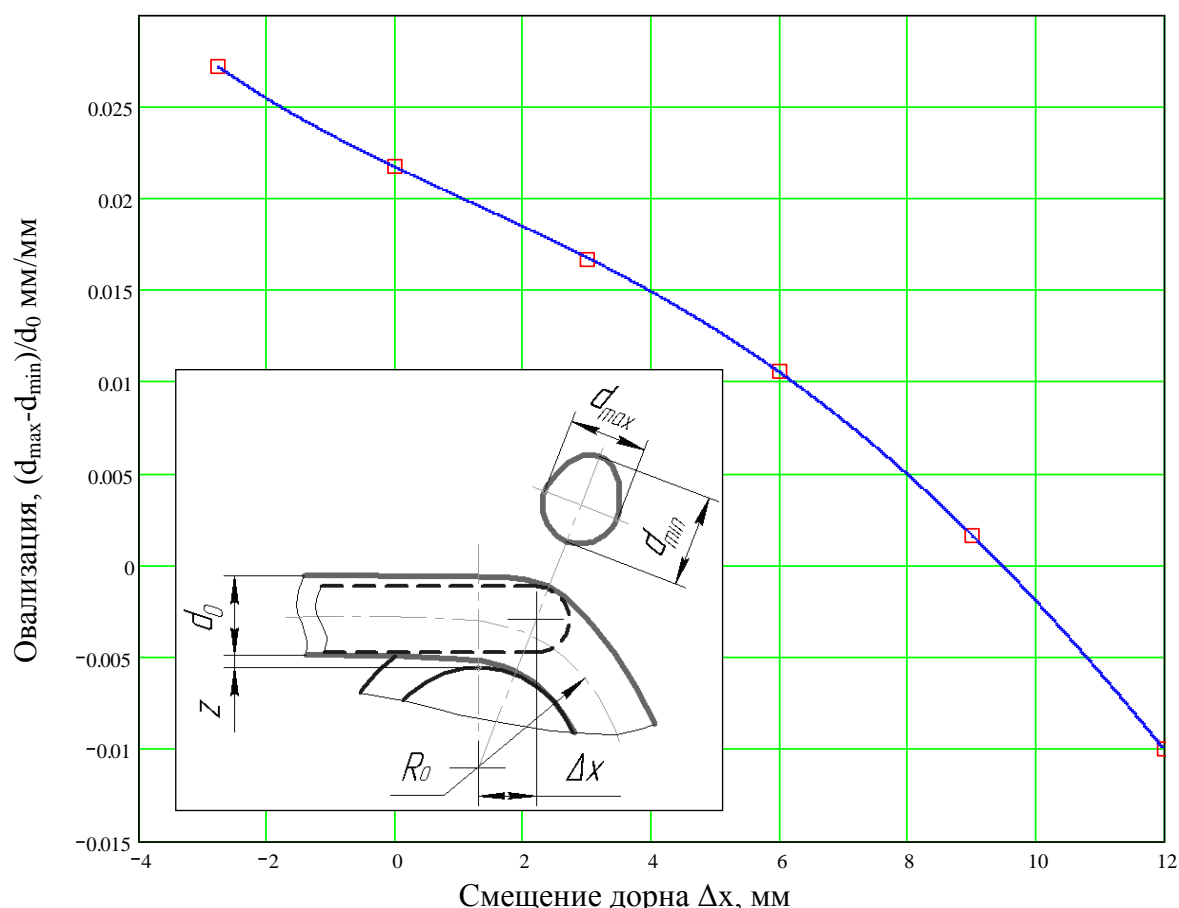


Рисунок 1 – Зависимость овализации поперечного сечения трубы от смещения дорна в процессе гибки  $\Delta x$

На рисунке 1 маркерами обозначены значения полученные при расчете, а сплошной линией показана интерполяция этих значений полиномом 5-го порядка.

На рисунке и в таблице обозначены размеры поперечного сечения трубы, после гибки:  $d_{min}$  – высота сечения;  $d_{max}$  – ширина сечения;  $t_{min}$  и  $t_{max}$  – соответственно наименьшее и наибольшее значение толщины стенки,  $\Delta x$  – смещение дорна,  $R_0$  – радиус гибки.

После интерполяции получаем следующую зависимость, по которой смещение дорна должно составлять примерно 9.48 мм.

**ВЫВОД**

Таким образом использование дорна с положительным смещением приводит по данным расчета к увеличению относительного удлинения материального волокна в верхней части сечения трубы  $|\epsilon_\theta|$  на 8%, по абсолютной величине (0.1395 - 0.1531 мм/мм); деформация утонения стенки  $|\epsilon_R|$  - на 25%, по абсолютной величине (-0.1215-(-0.0970)мм/мм); окружная деформация  $|\epsilon_Z|$  - на 67%, по абсолютной величине (-0.0179-(-0.0549)мм/мм), что в свою очередь приводит к уменьшению толщины стенки и позволяет скомпенсировать овализацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гун, Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением [Текст]. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с., ил.
2. Вдовин, С.И. Гибка труб и стержней со сложной формой поперечного сечения [Текст]/ Ковка и штамповка: справочник в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / под ред. А.Д. Матвеева. – М.: Машиностроение, 1987. – С. 104 – 111.
3. Вдовин С.И. Теория и расчеты гибки труб. М.: Машиностроение, Орел: ОрелГТУ. 2009. – 95 с.
4. Вдовин С.И., Михайлов В.Н., Татарченков Н.В. Овальзация сечения труб при гибке // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2009, № 3. – С. 21 – 23
5. Вдовин С.И., Михайлов В.Н., Татарченков Н.В. Изгиб трубы по круглому копиру Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. //Изв. ОрелГТУ. 2009. №5/277 (576). Сентябрь-октябрь. С. 54 – 58.

**Фёдоров Тимофей Васильевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры "Автопласт"

Адрес: г. Орел, Наугорское шоссе, 29

телефоны: (4862) 41-98-35

E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

## КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК621.282.1:621.793.7-034.35'

В.Н. ХРОМОВ, В.Н. КОРЕНЕВ, А.Ю. РОДИЧЕВ

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕКОСОВ КОРПУСА БАЛАНСИРА И ПОЛУОСИ БАЛАНСИРНОГО УСТРОЙСТВА ЗАДНЕГО МОСТА АВТОГРЕЙДЕРА**

*Проведено аналитическое исследование перекосов корпуса балансира и полуоси, вызванных зазорами в посадках и допусками на изготовление биметаллических подшипников скольжения балансирного устройства, а также за счет эксплуатационного износа подшипников скольжения в процессе работы автогрейдеров.*

**Ключевые слова:** перекосы корпуса балансира и полуоси, биметаллические подшипники скольжения, балансирное устройство автогрейдеров.

*Analytical research of skews of the beam case and half-axle caused by fit clearances and tolerances on manufacturing of bimetallic plain bearings of beam devices and also by work wear of plain bearings while operating a motor grader.*

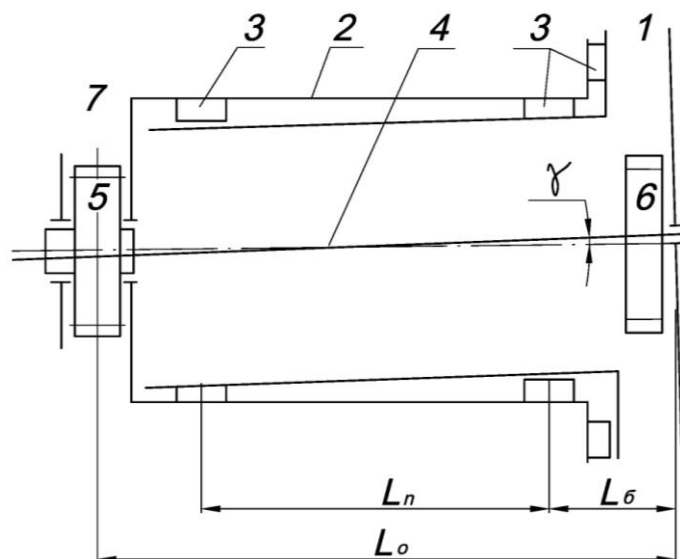
**Key words:** skews of the beam case and half-axle, bimetallic plain bearings, beam device of motor grader.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В настоящее время производство оснащено современной своеобразной сложной техникой, безотказность работы которой, зависит от срока службы наиболее нагруженных деталей [1].

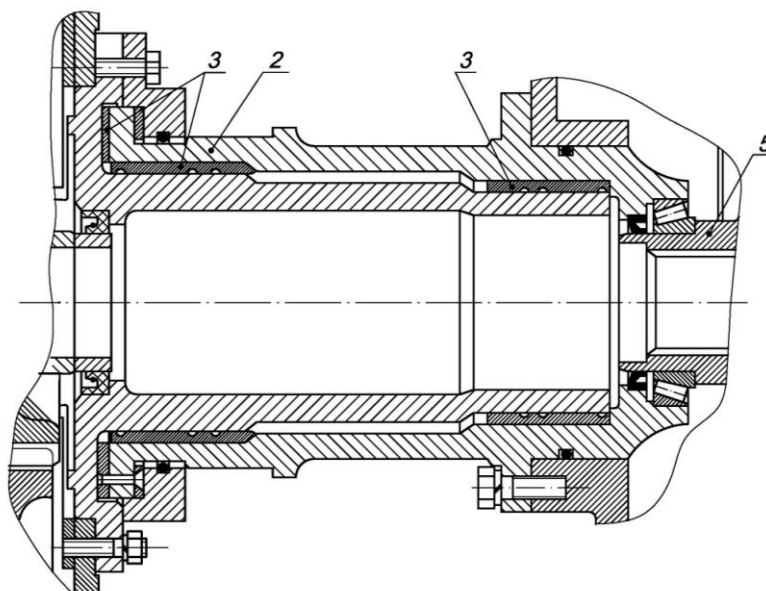
Ошибки изготовления и упругие деформации ведут к заранее имеющемуся дефекту того или иного узла. При работе в результате попадание в узлы машин влаги, пыли и грязи происходит значительные изменения параметров начальной величины деталей машин. Все это можно рассмотреть на примере балансирного устройства автогрейdera.

Балансирный узел состоит из балансира 1 и центрального редуктора 7 соединенных стаканом полуоси 2, в котором запрессованы два подшипника 3 биметаллических подшипника скольжения [2], о которых далее и пойдет речь (рисунок 1 и 2).



**Рисунок 1 – Схема перекоса балансира и полуоси**

1 – баланси́р, 2 – стака́н, 3 – биметаллические подшипники скольжения,  
4 – полуось, 5 – колесо зубчатое, 6 – шестерня, 7 – центральный редуктор,  
 $\gamma$  – угол перекоса балансира,  $L_n$  – расстояние между подшипниками,  
 $L_б$  – консольный участок полуоси,  $L_о$  – расстояние от шестерни центрального редуктора до конца балансира



*Рисунок 2 – Поворотный узел балансира автогрейдера  
2 - центральный редуктор, 3 – биметаллические подшипники скольжения,  
5 – колесо зубчатое*

Зазоры в подшипниках скольжения этого соединения, ошибки изготовления и упругие деформации деталей ведут к перекосу балансира, которые в процессе эксплуатации все более возрастают.

Перекос балансира ведет к повороту полуоси 4, ухудшается работа шлицевого соединения ее с зубчатым колесом 5, перекашивается относительно балансира и его остальных зубчатых колес сидящее на полуоси колесо 6.

Зазор в биметаллических подшипниках скольжения, возникающий в процессе эксплуатации автогрейдера, является основным фактором, влияющим на перекос балансира.

Определить предельные величины зазоров в подшипниках скольжения, при которых перекос корпуса балансира и полуоси требует замены соединяемых деталей или их восстановления.

### **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Для производства замеров перекосов балансира и полуоси, вызываемых ошибками, зазорами и упругими деформациями, были спроектированы и изготовлены две оправки: одна – с базированием на шлицевой втулке, а другая жестко соединялась с ведомым зубчатым колесом заднего моста. В первом случае при замере перекосов балансира и полуоси втулка и зубчатое колесо оставались неподвижными, а во втором – вся система приводилась во вращение поворотом карданного вала автогрейдера.

Последний вариант оказался наиболее удобным, а при замерах получаются более точные результаты, так как люфт оправки полностью исключен.

Величина перекоса балансира определялась как разница показаний индикаторных головок в крайних (верхней и нижней) точках торца отверстия. С помощью другой индикаторной головки, расположенной в вертикальной плоскости, измерялся эксцентриситет среднего отверстия в корпусе балансира.

Теоретический расчет угла перекоса балансира может быть определен по формуле:

$$\gamma \equiv \frac{\sum \Delta i}{2l_n} \quad (1)$$

Подставляя в формулу максимальные зазоры, соответствующие посадкам сопряженных поверхностей (таблица 1)

Таблица 1 – Посадки и предельные отклонения по подвижным посадкам

№ посадки	Диаметр (мм)	Посадка по СТ СЭВ 145-75	Предельное отклонение (мкм)
1	210	$\frac{H11}{h11}$	0+290 0-290
2	190	$\frac{H9}{f8}$	0+90 -75-195
3	240	$\frac{H11}{h11}$	0+290 0-290
4	220	$\frac{H9}{f8}$	0+90 -75-195

В результате расчета получим максимальное значение возможного перекоса.

$$\gamma_{\delta \max} \equiv \frac{0,290 \cdot 4 + (95 + 90) \cdot 2}{2 \cdot 305} \equiv 0,00283,$$

или

$$\gamma_{\delta \max} \equiv 0,162^\circ.$$

Максимальный перекоз полуоси равен

$$\gamma_{\circ} \equiv \gamma_{\delta} \frac{0,5l_n + l_{\delta}}{l_{\circ}} = \frac{0,5 \cdot 305 + 210}{716} \cdot 0,00283 = 0,00144$$

или

$$\gamma_{\circ} = 0,083^\circ$$

Максимальный угол перекоса зубчатого колеса в балансире

$$\gamma_{з.к.} = \gamma_{\delta} - \gamma_{\circ} = 0,079^\circ$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При решении задач теоретико-вероятным методом, т.е. с учетом рассеяния размеров, исключают как маловероятные сочетания предельных значений составляющих размеров размерной цепи.

Размерная цепь – совокупность взаимно связанных линейных или угловых размеров, образующих замкнутый контур. Замыкающий размер – это размер размерной цепи, получающийся последним в результате сборки узла. В сборочной размерной цепи замыкающим размером может быть величина смещения одной детали относительно другой. Отклонения размеров составляющих звеньев являются случайными величинами, т.е. такими, которые принимают то или иное числовое значение в соответствии с определенным законом распределения. Сочетание отклонений составляющих размеров в размерной цепи – явление случайного характера. Будем считать, что рассеяние размеров подчиняется закону Гаусса (нормального распределения).

Закон Гаусса выражается уравнением:

$$y = f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где  $x$  – значение случайной величины;

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение характеристики рассеивания случайных величин;

$y$  – плотность вероятности.

Полная площадь, ограничиваемая кривой Гаусса равна 1, что соответствует достоверности:

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1,0, \quad (3)$$

$$\text{где } t = \frac{x}{\sigma} \quad (4)$$

Для практических целей важно то свойство кривой нормального распределения, что уже в пределах  $x = \pm 3\sigma$ , т.е. при  $-3 < t < 3$  находится 0,9973 всей площади. Стало быть, вероятность того, что отклонения размеров будут выходить за пределы  $6\sigma$ , очень мала (0,27%), практически такой случай может быть очень редко. Поэтому примем величину допуска равной  $6\sigma$ .

В общем случае зависимости  $A_{\Delta} = f(A_1, A_2, \dots, A_n)$  - связь между допуском замыкающего размера и допусками составляющих размеров выражается формулой:

$$\delta_{\Delta} = \frac{1}{3} t \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_i^2 K_i^2 \delta_i^2} \quad (5)$$

В нашем расчете будем использовать случай, когда  $t=3$  (процент риска равен 0,27%),  $K=1$ . Так как мы будем рассматривать размерные цепи с параллельными размерами, то  $\xi_i = 1$ . Для нашего расчета формула принимает наиболее простой вид:

$$\delta_{\Delta} = \sqrt{\sum \delta_i^2}$$

Рассмотрим следующую сборочную размерную цепь (рисунок 3).

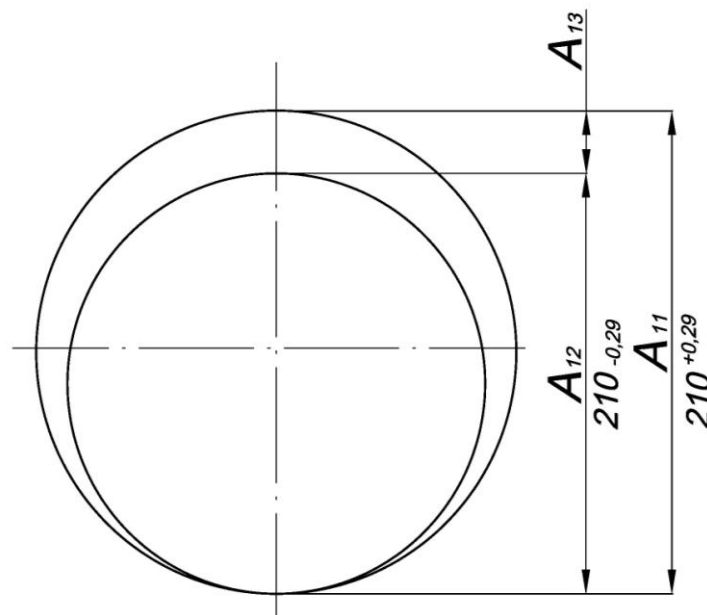


Рисунок 3 – Сборочная размерная цепь с номинальным размером 210

$A_{11} = 210^{+0,29}$ ,  $A_{12} = 210^{-0,29}$ ,  $A_{13}$  – замыкающий размер.

Допуск замыкающего размера определим по формуле

$$\delta_{\Delta 1} = \sqrt{0,29^2 + \overset{\ominus}{\underset{\ominus}{0,29}}^2} = 0,4101219 \text{ мм} \quad (6)$$

Имеем следующее нормальное распределение  $\sigma_1 = 0,0683536$  мм (рисунок 4).

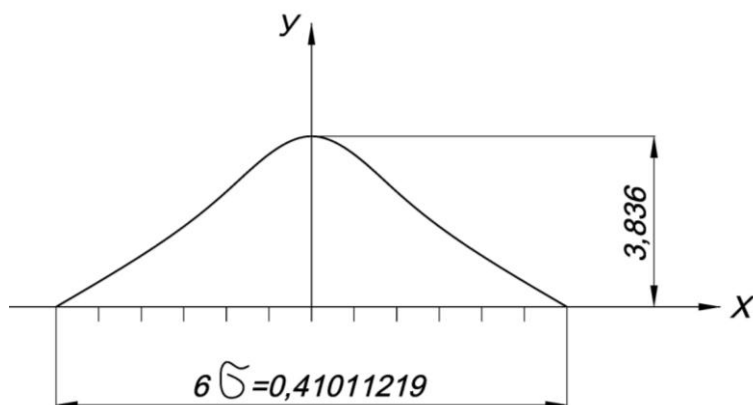


Рисунок 4 – Кривая нормального распределения

Аналогично предыдущему рассмотрим еще одну сборочную цепь (рисунок 5).

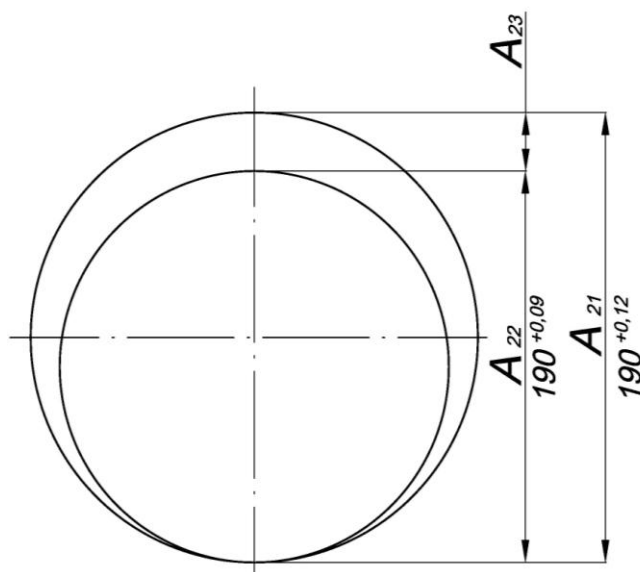


Рисунок 5 – Сборочная размерная цепь номинальным размером 190

$A_{21} = 190^{+0,12}$ ,  $A_{22} = 190^{+0,09}$ ,  $A_3$  - замыкающий размер.

Величина допуска замыкающего размера

$$\delta_{\Delta_2} = \sqrt{0,12^2 + 0,09^2} = 0,15$$

Будем иметь следующее распределение  $\sigma_2 = 0,025$  мм (рисунок 6).

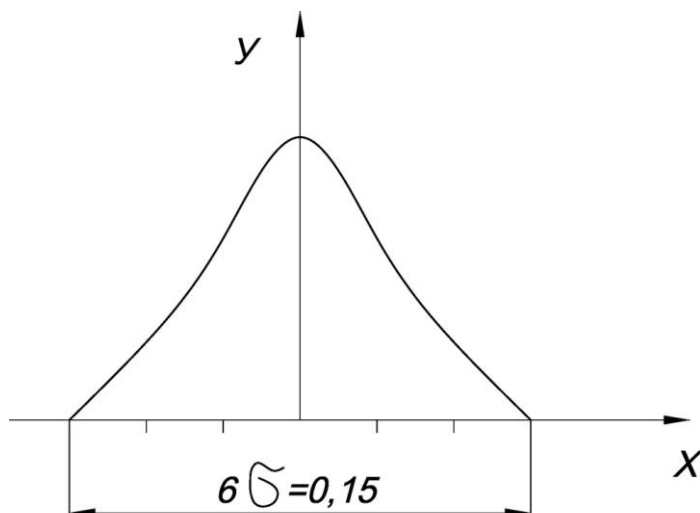


Рисунок 6 – Кривая нормального распределения

Вообще говоря, величина допуска замыкающего размера – зазор в посадке, который является причиной перекоса корпуса балансира и полуоси.

Составляющие размеры наших сборочных размерных цепей являются параллельно расположенными, распределение погрешностей которых характеризуется распределением Гаусса (нормальным), следовательно, для суммирования средних квадратических отклонений можно пользоваться формулой

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (7)$$

зазоры в посадках по формуле:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{12} = \sqrt{0,025^2 + 0,0683^2} = 0,0728 \text{ мм}$$

$$\delta_{12} = \sqrt{0,4101219^2 + 0,150^2} = 0,437 \text{ мм}$$

Допуски по посадкам 3 и 4 совпадают с допусками посадок 1 и 2, поэтому

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{1-4} = \sqrt{2}\delta_{12} = 0,616 \text{ мм.}$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{1-4} = \sqrt{2}\sigma_{12} = 0,103 \text{ мм.}$$

Величина  $\delta_{\Sigma}$  и  $\sigma_{\Sigma}$  - поле допуска на результирующий зазор с вероятностью 0,997 и среднеквадратичное поле допуска.

Соответствующие углы перекоса балансира равны

$$\begin{aligned} \gamma_{0,997} &= \frac{\delta_{cp} \pm \frac{1}{2}\delta_{\Sigma}}{2l_n} = \frac{0,5 \cdot 0,29 \cdot 4 + 0,36 \cdot 2 + 0,616}{2 \cdot 305} \\ &= 0,00154 \pm 0,00051 = 0,0862 \pm 0,027^{\circ} \\ \gamma_{cp.kv.} &= \frac{\delta_{cp} \pm \sigma_{\Sigma}}{2l_n} = \frac{0,5 \cdot 0,29 \cdot 4 + 0,36 \cdot 2 \pm 0,103}{2 \cdot 305} \\ &= 0,00154 \pm 0,00017 = 0,087 \pm 0,010^{\circ} \end{aligned}$$

Таким образом, максимальный перекося балансира с вероятностью 0,997 равен  $0,117^{\circ}$ , а среднеквадратичный –  $0,097^{\circ}$ .

Соответствующие перекосы полуоси и центрального зубчатого колеса балансира равны

$$\begin{aligned} \alpha_{0,997} &= \gamma_{0,997} \frac{0,5l_n + l_{\delta}}{l_o} = 0,117 \frac{0,5 \cdot 305 + 210}{716} = 0,0597^{\circ}, \\ \alpha_{з.к. 0,997} &= \gamma_{0,997} - \alpha_{0,997} = 0,057^{\circ}, \\ \alpha_{cp.kv.} &= \gamma_{cp.kv.} \frac{0,5l_n + l_{\delta}}{l_o} = 0,097 \frac{0,5 \cdot 305 + 210}{716} = 0,0495^{\circ} \\ \alpha_{з.к. cp.kv.} &= \gamma_{cp.kv.} - \alpha_{cp.kv.} = 0,047^{\circ}. \end{aligned}$$

## ВЫВОДЫ

1. Из сопоставления результатов замеров перекосов балансира и полуоси следует, что величина их на эксплуатируемых автогрейдерах с ресурсом от нескольких сот до нескольких тысяч моточасов в 1,5-2 раза превышают соответствующие величины для новых машин.

2. Для борьбы с вредными последствиями перекосов следует производить своевременную замену изношенных подшипников скольжения в процессе эксплуатации автогрейдеров.



3. Технологический обратный перекося балансир Перекося за счет эксплуатационного износа подшипников изменяются от начальной величины  $\gamma_n$  в большую сторону, как это показано на рисунке 7 (прямая 1). Введя технологический перекося  $\gamma_m$  противоположного направления, значительно улучшим структуру его изменения в эксплуатации: в начальный период за счет износа подшипников перекося будут уменьшаться, перейдут через ноль и затем уже начнут расти вновь (прямая 2). Для этого чулок 2 необходимо в соединении с центральным редуктором сместить вертикально вверх на величину  $\gamma_{cp} \frac{l_n}{2}$  и перекося вниз на угол  $2\gamma_{cp}$ .

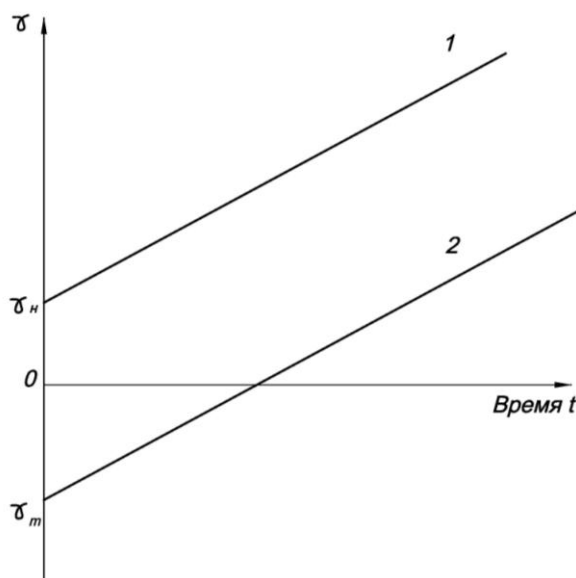


Рисунок 7 – Изменение перекося  $\gamma$  при отсутствии (1) и наличии (2) технологического перекося

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родичев, А.Ю. Анализ износного состояния деталей автомобиля КамАЗ и их восстановление газопламенным напылением. [Текст]/Хромов В. Н., Мартынов А. Ф., Родичев А. Ю., Барабаш В. В., Верцов В. В., Корнев В. Н.//Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». –2004. - №1-2. – 120 с., с.115-120.
2. Родичев, А.Ю. Теоретическое обоснование толщины покрытия биметаллического подшипника скольжения. [Текст]/Хромов В. Н., Родичев А. Ю.// Известия Орел ГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». - 2009. - №2/274(560). - С. 57-61.

#### **Хромов Василий Николаевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Доктор технических наук, зав. кафедрой «Надежность и ремонт машин», профессор  
Тел. +7(4862)43-19-79  
E-mail: [chrom@orel.ru](mailto:chrom@orel.ru)

#### **Корнев Владислав Николаевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел.: +7(910)304-74-79  
E-mail: [korenev-vlad@list.ru](mailto:korenev-vlad@list.ru)

#### **Родичев Алексей Юрьевич**

ФГОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел  
Мастер производственного обучения кафедры «Надежность и ремонт машин»  
Тел. +7(4862)43-19-79  
E-mail: [alfox777@orel-dormash.ru](mailto:alfox777@orel-dormash.ru)

Н.В. ПЕТРОВ, С.А. МОСКВИТИН, С.Н. ЗЛОБИН

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДРОССЕЛЬНОГО СИНХРОНИЗАТОРА  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВЫРУБНЫХ ПРЕССОВ**

*Приводятся рекомендации по расчету параметров дроссельного синхронизатора гидравлических вырубных траверсных прессов, обеспечивающих ограничение перекаса траверсы заданными пределами, пригодного для модернизации существующих и разработки новых, качественно работающих, гидравлических прессов легкой промышленности.*

**Ключевые слова:** вырубка, пресс, траверса, математическая модель.

*Recommendations for calculation of parameters of the throttle synchronizer hydraulic cutting traverse presses, providing restriction of a skew traverse by the given limits, suitable for modernization existing and development new, qualitatively working, hydraulic presses light industry are resulted.*

**Key words:** cutting, press, traverse, mathematical model.

На предприятиях легкой промышленности для вырубки изделий из неметаллических материалов широко используются быстроходные (60÷70 ход/мин) гидравлические траверсные вырубные прессы, имеющие два и более рабочих цилиндра ПТВ-25, ПВГ-18, ПТО–25, ПТО–40, ПТО–63.

Раскрой на таких прессах производится одиночными или комбинированными резаками (ножевыми штампами). Нормальным условием работы оборудования является возможность расположения резака в любом месте по всей ширине рабочего прохода стола. Поэтому основной проблемой при эксплуатации таких прессов является перекас подвижной траверсы при внецентренном приложении рабочей нагрузки, приводящий к снижению качества изделий, стойкости инструмента, производительности труда, срока службы оборудования и т.д.

Проблема обеспечения синхронного движения рабочих цилиндров, т.е. бесперекасного движения подвижной траверсы возникает и при эксплуатации других видов гидравлического оборудования кузнечно-штамповочного производства, например листогибочных и штамповочных прессов.

В Орловском государственном техническом университете разработана принципиальная схема управления прессом с дроссельным синхронизатором (рисунок 1).

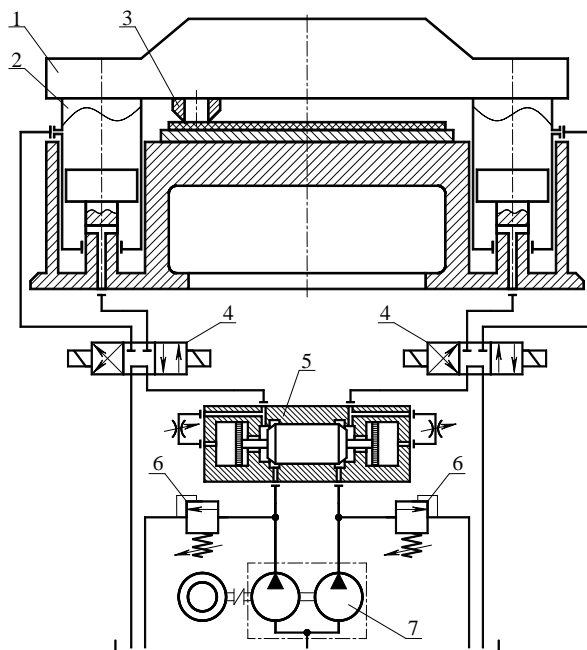
Рабочий процесс происходит следующим образом. При центральном расположении нагрузки 3 на столе пресса, двухпоточным насосом 7 подаются равные объемы рабочей жидкости в левую и правую гидромагистраль, обеспечивая бесперекасное движение траверсы 1.

При внецентренном расположении нагрузки 3 на столе экспериментального пресса, например, слева (рисунок 1), левым гидроцилиндром 2 развивается большее усилие, что вызывает сжатие рабочей жидкости и следовательно увеличение давления по сравнению с правым гидроцилиндром. В этом случае золотник дроссельного синхронизатора 5 смещается вправо, увеличивая подачу рабочей жидкости в более нагруженный цилиндр и уменьшая в менее нагруженный. Таким образом, ликвидируется отставание более нагруженного цилиндра и опережение менее нагруженного, происходит выравнивание траверсы.

Математическая модель экспериментального пресса содержит дифференциальные уравнения, описывающие перемещение подвижной траверсы, движение управляющего золотника, процессы в гидросистеме с учетом сжимаемости рабочей жидкости, всего 13 дифференциальных уравнений первого порядка [1].

Полученная модель, учитывающая жесткостные и инерционные характеристики гидромеханической системы пресса, позволяет определить параметры автоматической системы син-

хронизации, обеспечивающие наиболее качественную работу экспериментального пресса.



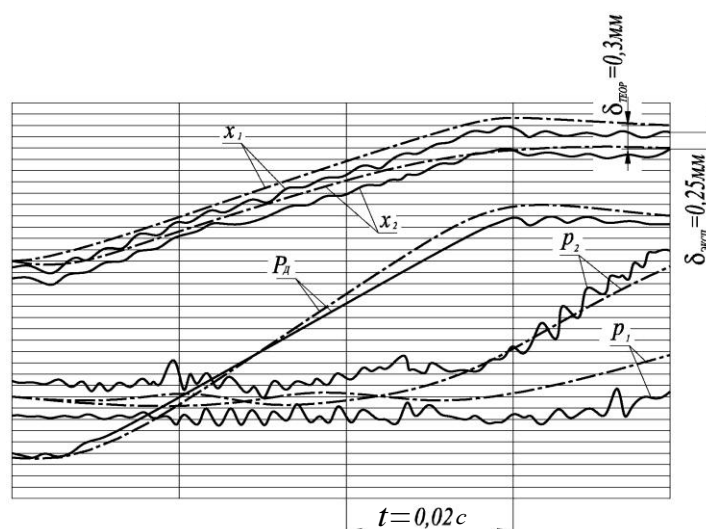
**Рисунок 1 – Схема пресса с дроссельным синхронизатором**  
1 – подвижная траверса; 2 – гидроцилиндр; 3 – инструмент (резак);  
4 – распределители управления; 5 – дроссельный синхронизатор;  
6 – предохранительные клапаны; 7 – двухпоточный насос

На специально изготовленной экспериментальной установке, имитирующей с учетом основных принципов теории подобия работу гидравлических траверсных прессов типа ПВГ–18, ПОТГ–20, ПОТГ–40 и других, предназначенных для вырубки изделий из неметаллических материалов (рисунок 2), проведена проверка влияния технологических условий (величины эксцентриситета приложения нагрузки, величины усилия вырубки) и параметров автоматической системы синхронизации на величину перекоса [2].



**Рисунок 2 - Общий вид экспериментальной установки**

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных (рисунок 3) показал, что при максимальном эксцентриситете нагрузки, зарегистрированный перекос траверсы отличается от расчетного на 0,05мм, это подтверждает адекватность математической модели рабочего процесса гидравлического вырубного траверсного пресса с системой синхронизации, снабженной дроссельным синхронизатором.



**Рисунок 3 - Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных при максимальном эксцентриситете рабочей нагрузки ( $e = 240$  мм)**

— экспериментальные данные; - - - - результаты расчета  
 $x_1, x_2$  – перемещение левого и правого цилиндра соответственно;  
 $p_1, p_2$  – давление жидкости в рабочих полостях левого и правого цилиндра;  
 $P_d$  – рабочая нагрузка;  $\delta$  – перекося траверсы

На основе методов имитационного моделирования и регрессионного анализа, применена методика определения основных конструктивных параметров прессы, при которых целевая функция – перекося траверсы достигает минимума.

Разработана линейная четырехфакторная регрессионная модель

$$Y = 0,52075 - 0,1605x_1 - 0,028x_2 + 0,04825x_3 - 0,02325x_4 - 0,00475x_1x_2 + 0,1745x_1x_3 + 0,128x_1x_4, \quad (1)$$

где  $x_1$  – диаметр золотника синхронизатора (мм)  $10 \leq d_3 \leq 25$ ;

$x_2$  – диаметр поршня гидравлического демпфера (мм)  $5 \leq d_{II} \leq 35$ ;

$x_3$  – диаметр дроссельного отверстия демпфера (мм)  $0,5 \leq d_{ДР} \leq 1,5$ ;

$x_4$  – начальная ширина пропускной щели золотника (мм)  $0,5 \leq h_0 \leq 2,0$ .

В качестве основного показателя качества функционирования системы  $Y$  выбран перекося траверсы прессы  $\delta$ , который не должен превышать 0,48 мм, с учетом коэффициента по добия для данного вида прессов.

Построена номограмма (рисунок 4), позволяющая определять соотношения параметров дроссельного синхронизатора, обеспечивающих ограничение перекося траверсы заданными пределами.

Используя номограмму (рисунок 4), можно определить перекося траверсы прессы в зависимости от диаметра золотника синхронизатора  $d_3$ , диаметра поршня гидравлического демпфера  $d_{II}$ , площади поперечного сечения дроссельного отверстия  $f_{ДР}$  и начальной ширины пропускной щели синхронизатора  $h_0$ .

На рисунке 4 заштрихованная область графика позволяет производить выбор таких соотношений основных параметров дроссельного синхронизатора, при которых перекося траверсы не превысит допустимого значения. Согласно графику значениями основных параметров синхронизатора, обеспечивающими максимальное снижение перекося траверсы во время рабочего хода, будут:

- диаметр золотника синхронизатора  $d_3 = 18$  мм;
- диаметр поршня гидравлического демпфера  $d_{II} = 21$  мм;
- площадь поперечного сечения дроссельного отверстия  $f_{ДР} = 0,11 \text{ мм}^2$ ;
- начальная ширина пропускной щели синхронизатора  $h_0 = 1,3$  мм.

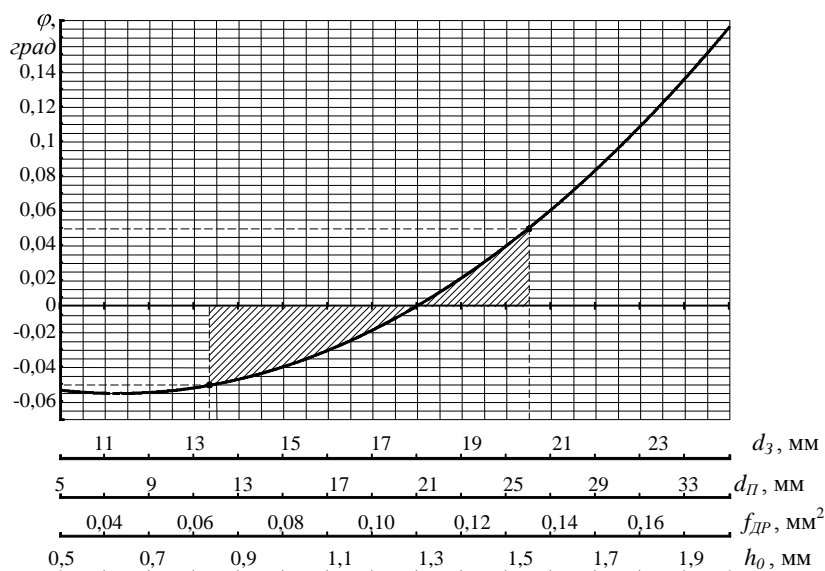


Рисунок 4 - Номограмма выбора соотношений основных параметров дроссельного синхронизатора, ограничивающих перекоп траверсы заданными пределами

При проектировании прессы с тем же номинальным давлением на усилие

$$P_H = F_P p \tag{2}$$

учитывается суммарная площадь поршней рабочих цилиндров  $F_P$ . После определения, в соответствии с коэффициентами подобия, линейных и скоростных параметров и уточнения их согласно существующим стандартам, определяется подача насоса  $Q_H$ .

При использовании двухпоточного насоса  $Q_H$  – подача одной секции, по известной зависимости для золотника с углом фаски  $\alpha=30^\circ$  скорость течения жидкости через щель

$$v = \frac{4Q_H}{\pi d_3 h_0}, \tag{3}$$

задаваясь предварительной величиной начальной ширины пропускной щели в пределах  $h_0 = (0,9 \div 2,6)$  мм и допустимой скоростью течения рабочей жидкости через щель золотника  $[v] \approx 30^M/c$  [3], можно определить требуемое значение диаметра золотника

$$d_3 = \frac{4Q_H}{\pi h_0 [v]}. \tag{4}$$

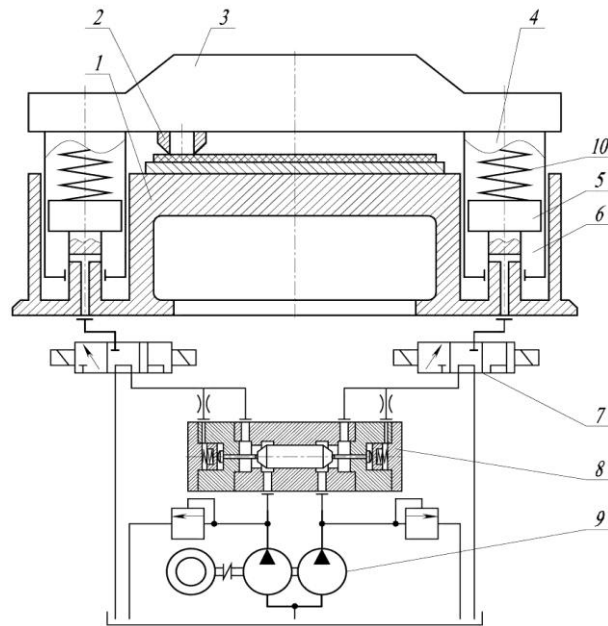
Округляя значение  $d_3$  до ближайшего стандартного, по графику рисунка 4 определяем соответствующее значение диаметра поршня демпфера  $d_{П}$ , площади дроссельного отверстия  $f_{ДР}$ , начальной ширины пропускной щели  $h_0$ .

Для модернизации реального прессы ПВГ–18–2 пластинчатый насос БГ–12–24 ТУ2.053-1364-78 производительностью  $70 \text{ л/мин}$ , заменяется на двухпоточный насос аналогичной суммарной производительности, с целью сохранения исходного быстродействия.

Устройство модернизированного прессы показано на рисунке 5. Пресс состоит из стола 1, на котором размещается резак 2, траверсы 3, смонтированной на двух подвижных гидроцилиндрах 4 с неподвижными поршнями 5. Рабочие полости гидроцилиндров 6 соединены трубопроводами через трехпозиционные золотниковые распределители 7 и автоматический дроссельный регулятор 8 с двухпоточным насосом 9. В поршневых полостях цилиндров размещаются пружины возвратного хода 10.

Расчетное значение начальной ширины пропускной щели золотника  $h_0 = 2,0$  мм, требуемое значение диаметра золотника

$$d_3 = \frac{4Q_H}{\pi h_0 [v]} = \frac{4 \times 1,15 \times 10^{-3}}{\pi \times 2 \times 10^{-3}} \approx 24 \text{ мм}. \tag{5}$$



**Рисунок 5 - Принципиальная гидросхема пресса ПВГ-18 с дроссельным синхронизатором**  
 1 – стол пресса; 2 – инструмент (резак); 3 – траверса пресса;  
 4 – рабочие гидроцилиндры; 5 – поршни гидроцилиндров; 6 – рабочие полости цилиндров;  
 7 – трехпозиционные золотниковые распределители; 8 – дроссельный синхронизатор;  
 9 – двухпоточный насос; 10 – возвратные пружины

Округляя это значение до ближайшего стандартного получим  $d_3 = 20$  мм, по графику рисунка 4 определяем соответствующие значения:

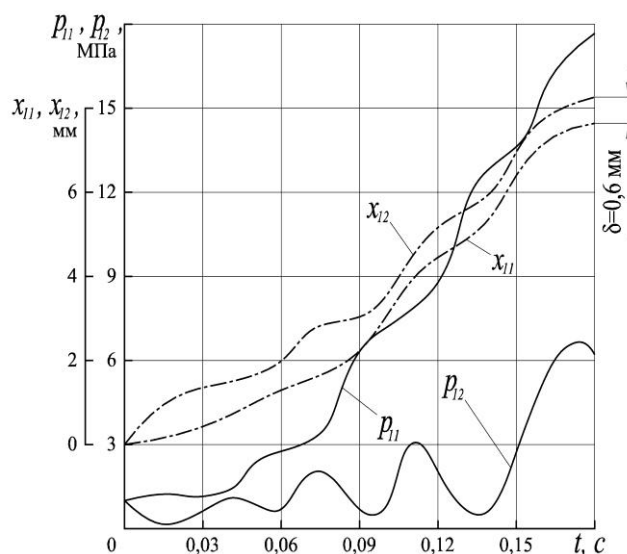
диаметра поршня гидравлического демпфера  $d_{II} = 25$  мм;

площади поперечного сечения дроссельного отверстия  $f_{ДР} = 0,13 \text{ мм}^2$ ;

начальной ширины пропускной щели синхронизатора  $h_0 = 1,5$  мм.

При таких значениях параметров синхронизатора, наиболее вероятная величина перекоса траверсы должна составить  $\delta = 0,4$  мм.

Для окончательной проверки выбранных параметров производится расчет на ЭВМ математической модели пресса ПВГ-18-2-0 с соответствующими исходными данными и известном значении диаметра золотника  $d_3 = 20$  мм.



**Рисунок 6 - Графики процессов в гидромеханической системе пресса ПВГ-18-2-0 с дроссельным синхронизатором во время рабочего хода при внецентренном нагружении**  
 $x_{11}, x_{12}$  – перемещение левого и правого цилиндра соответственно;  
 $p_{11}, p_{12}$  – давление жидкости в левом и правом гидроцилиндрах;  
 $\delta$  – перекос траверсы

На рисунке 6 представлены графики процессов в гидромеханической системе пресса ПВГ–18–2–0 с дроссельным синхронизатором, при расчете математической модели с исходными параметрами и внецентренном нагружении, с номинальным усилием  $P_D=180$  кН, эксцентриситетом  $e=550$  мм.

Как видно из графиков, перекося траверсы  $\delta$  в конце рабочего хода не превысит 0,6 мм, что существенно меньше допустимого значения для подобных прессов  $[\delta_{max}] = 0,8$  мм [4]. При этом регрессионное уравнение дает завышенное значение  $\delta$ , что позволяет использовать его в качестве верхней оценки перекося при проектировании систем синхронизации.

Разработанная конструкция дроссельного синхронизатора может быть использована для модернизации существующих и разработки новых гидравлических вырубных траверсных прессов для неметаллических материалов, позволит за счет повышения точности синхронизации движения цилиндров повысить качество вырубных изделий, стойкость инструмента и вырубных плит при более простой конструкции гидросистемы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвитин, С.А. Моделирование динамики экспериментального гидравлического пресса с автоматическим дроссельным синхронизатором / С.А. Москвитин, Н.В. Петров // Межвузовский сборник научных трудов “Исследования в области теории, технологии и оборудования обработки металлов давлением”. – Орел–Тула, 1998. – С. 153 – 161.
2. Петров, Н.В. Экспериментальное исследование гидропрессовой установки с дроссельным синхронизатором / Н.В. Петров, С.А. Москвитин // Кузнечно–штамповочное производство. – 2000. – № 11. – С 31 – 35.
3. Абрамов, Е.И. Элементы гидропривода: справочник / Е.И. Абрамов, К.А. Колесниченко, В.Т. Маслов. – Техніка, 1969. – 320 с.
4. Воронин, Н.Ф. Перекося траверсы вырубных прессов легкой промышленности / Н.Ф. Воронин, Н.А. Сивченко, Н.И. Баканов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1981.– № 5. – С. 130–133.

#### **Петров Николай Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автопласт»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: (4862) 41-98-35

#### **Москвитин Сергей Александрович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: (4862) 41-98-35  
E-mail: [viruss@mail.ru](mailto:viruss@mail.ru)

#### **Злобин Сергей Николаевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 43-20-96  
E-mail: [zsn2@rambler.ru](mailto:zsn2@rambler.ru)

М.П. ШИШКАРЕВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ПРУЖИННО-КУЛАЧКОВЫХ МУФТ

*Рассмотрена предложенная методика определения основных рабочих характеристик предохранительных пружинно-кулачковых муфт, основанная на применении балансово-энергетического способа. Показано, что нагрузочная способность муфт, рассчитанная по новой методике, ниже, а точность срабатывания выше, чем характеристики, вычисленные по существующей методике.*

**Ключевые слова:** пружинно-кулачковая муфта, точность срабатывания, номинальный вращающий момент, нагрузочная способность.

*The offered technique of definition of the basic operating characteristics safety spring-cam the clutches, based on application of a balance-power way is considered. It is displayed, that the load ability of clutches calculated by a new technique, more low, and exactitude of operation above, than the performances evaluated by the existing technique.*

**Key words:** spring-cam a clutch, exactitude of operation, the nominal gyrating moment, load ability.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предохранительные пружинно-кулачковые муфты (ПКМ) находят ограниченное применение как средства защиты приводов машин и механизмов от возникающих в процессе эксплуатации перегрузок. Вследствие возникновения при перегрузке и последующем срабатывании ударов применение ПКМ ограничено невысокими рабочими частотами вращения – до  $400 \dots 500 \text{ мин}^{-1}$  [1–3].

При расчете нагрузочной способности ПКМ в технической и справочной литературе рекомендуется выражение вида [1–3]

$$T_H = \frac{F_P}{2 \tan(\alpha + \varphi) \frac{D}{d} f_1}, \quad (1)$$

где  $T_H$  – расчетный вращающий момент ПКМ;

$F_P$  – сила натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин), устанавливаемая при настройке муфты;

$D$  – диаметр наружной поверхности кулачков полумуфт;

$d$  – диаметр посадочной поверхности подвижной полумуфты;

$\alpha$  – угол скоса боковой (рабочей) поверхности кулачка;

$\varphi$  – угол трения между рабочими поверхностями кулачков;

$f_1$  – коэффициент трения между подвижной полумуфтой и направляющей шпонкой.

Величина расчетного вращающего момента  $T_H$  определяется в соответствии с номинальным моментом машины, в составе которой работает ПКМ [1]. При передаче номинального вращающего момента осевое перемещение подвижной полумуфты отсутствует, т. е. срабатывание муфты не происходит.

При возникновении внутренней или внешней (по отношению к муфте) перегрузки срабатывание ПКМ сопровождается осевым перемещением подвижной полумуфты и осевой деформацией замыкающей пружины (группы замыкающих пружин), что приводит к увеличению силы ее натяжения [1–3]. Величина вращающего момента, соответствующая выходу кулачков полумуфт из зацепления друг с другом, представляет предельный момент ПКМ.

Задачей исследования является установление влияния величины коэффициента трения между кулачками полумуфт на точность срабатывания муфты.



К эксплуатационным показателям ПКМ, рассматриваемым ниже, относятся нагрузочная способность (расчетный и предельный вращающий момент муфты) и точность срабатывания, характеризуемая коэффициентом точности [2].

Поскольку величина коэффициента точности предохранительной муфты, в том числе ПКМ, определяется на основе предельного вращающего момента [1–3], установим зависимость величины предельного вращающего момента ПКМ от ее параметров.

Рассмотрим с этой целью рисунок 1, на котором показаны в зацеплении друг с другом кулачки полумуфт 1 и 2 и схема сил, действующих между кулачками при передаче номинального вращающего момента.

Приведа все силы, действующие между кулачками полумуфт, к точке, находящейся посередине линии контакта кулачков, запишем выражение для определения окружной (тангенциальной) силы  $F_t$ :

$$F_t = \frac{2T_H}{D} \quad (2)$$

Обозначения параметров, входящих в формулу (2), приведены выше.

Результирующая сила нормального давления, возникающая между кулачками, равна, с учетом формулы (2)

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \alpha} = \frac{2T_H}{D \cos \alpha} \quad (3)$$

Действие силы нормального давления  $F_n$  вызывает появление на рабочих поверхностях кулачков силы трения  $F_{тр}$ , величина которой

$$F_{тр} = F_n \cdot f = \frac{2T_H \cdot f}{D \cos \alpha} \quad (4)$$

где  $f$  – коэффициент трения между рабочими поверхностями кулачков полумуфт.

При выводе формулы (4) использовано выражение (3), а также известное из работы [4] соотношение

$$f = \operatorname{tg} \varphi.$$

Проекция силы трения на ось, параллельную оси вращения муфты, равна (рисунок 1), с учетом формулы (4)

$$F_{тр.1} = F_{тр} \cos \alpha = \frac{2T_H \cdot f \cos \alpha}{D} \quad (5)$$

Проекция силы нормального давления  $F_n$  на указанную ось дает осевую силу  $F_o$ , отжимающую в процессе работы ПКМ подвижную полумуфту, которая равна

$$F_o = F_n \sin \alpha = \frac{2T_H \sin \alpha}{D \cos \alpha} \quad (6)$$

Результирующая сила, действующая со стороны полумуфты 1 на полумуфту 2, подвижную в осевом направлении, равна, с учетом соотношений (5) и (6)

$$F = F_{тр.1} + F_o = \frac{2T_H \cdot f \cos \alpha}{D} + \frac{2T_H \sin \alpha}{D \cos \alpha} \quad (7)$$

При передаче номинального вращающего момента сила  $F$ , действующая на подвижную полумуфту 2, уравнивается силой натяжения  $F_{п}$  замыкающей пружины (группы замыкающих пружин) и силой трения  $F_{тр.1}$  между полумуфтой и направляющей шпонкой, так что можно записать

$$F = F_{п} + F_{тр.1} \quad (8)$$

Сила трения между подвижной полумуфтой и направляющей шпонкой зависит от величины вращающего момента, передаваемого муфтой, и вычисляется по формуле

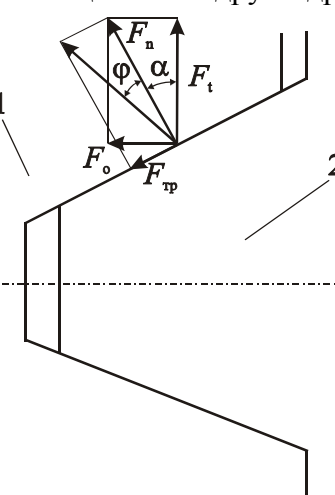


Рисунок 1 – Схема действия сил в зацеплении кулачков ПКМ

$$F_{тр} = \frac{2T_H}{D} f_1 \quad (9)$$

Подставив в равенство (8) правые части соотношений (7) и (9) и решив полученное уравнение относительно неизвестного  $T_H$ , найдем

$$T_H = \frac{F_{II} D}{2 \left( \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi - \frac{D}{d} f_1 \right)} \quad (10)$$

Анализ формул (1) и (10) показывает, что в формуле (1) содержится функция тангенса разности углов  $\alpha$  и  $\varphi$ , а в формуле (10) – функция разности тангенсов указанных углов.

Для оценки влияния полученных результатов на величину момента  $T_H$  обратимся к рисунку 2, на котором кривые 1 и 2 отражают графики зависимостей (1) и (10). Графики построены по следующим исходным данным:  $F_{II}=800$  Н,  $D=0,15$  м,  $\varphi=8^\circ$ ,  $d=0,08$  м,  $f_1=0,15$ .

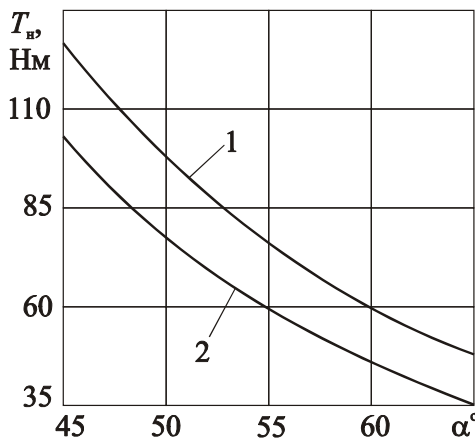


Рисунок 2 – Зависимость вращающего момента ПКМ от угла скоса кулачков

Графики показывают:

- при всех значениях угла  $\alpha$  (в пределах графика) величина вращающего момента  $T_H$ , вычисленная по формуле (10), меньше, чем величина  $T_H$ , вычисленная по формуле (1);

- с увеличением угла  $\alpha$  разность между величинами вращающих моментов  $T_H$ , вычисленными по формулам (1) и (10) соответственно, уменьшается;

- как и для величины  $T_H$ , вычисленной по формуле (1), величина  $T_H$ , вычисленная по формуле (10), уменьшается по мере увеличения угла  $\alpha$ .

Коэффициент точности предохранительной муфты, в том числе и ПКМ, определяется на основе предельных значений вращающего момента, которые она может передавать в условиях эксплуатации в зависимости от изменения какого-либо параметра муфты [1–3]. В ПКМ, как и в предохранительных фрикционных муфтах, таким параметром является коэффициент трения между рабочими поверхностями кулачков полумуфт.

Величина коэффициента трения изменяется в процессе эксплуатации ПКМ случайным образом, подчиняясь закону распределения Гаусса [5, 6]. Соответственно этому происходит изменение величины предельного вращающего момента муфты.

Величина предельного (максимального) вращающего момента ПКМ соответствует выходу из зацепления друг с другом кулачков полумуфт при срабатывании муфты. Поскольку в процессе расцепления кулачков полумуфт в большинстве конструкций ПКМ происходит увеличение силы натяжения замыкающей пружины (группы замыкающих пружин), величина предельного вращающего момента превышает его расчетную величину.

Установление величины предельного вращающего момента предохранительной муфты любого типа крайне важно с точки зрения получения оценки действующих в приводе машины максимальных перегрузок, вносимых муфтой, и обеспечения корректности при проведении расчетов деталей и узлов на прочность [7].

Формула для вычисления коэффициента точности муфты имеет вид:

$$K_T = \frac{T_{H.max} + \frac{zh}{1 - \frac{\operatorname{tg} \varphi_{max}}{D \cos^2 \alpha} - \frac{f_1}{d}}}{T_{H.min} + \frac{zh}{1 - \frac{\operatorname{tg} \varphi_{min}}{D \cos^2 \alpha} - \frac{f_1}{d}}} \quad (11)$$

В формуле (11)  $T_{H.max}$ ,  $T_{H.min}$  – соответственно максимальная и минимальная вели-

чина расчетного вращающего момента ПКМ,  $z$  – осевая жесткость замыкающей пружины (суммарная осевая жесткость группы замыкающих пружин),  $h$  – высота профиля кулачка,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_{\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения угла трения, которые он может принимать в реальных условиях эксплуатации ПКМ [8].

Минимальная величина расчетного вращающего момента определяется для минимального значения коэффициента трения между кулачками.

Поскольку формула (11) получена в работе [4] на основе балансово-энергетического метода, она справедлива и для рассматриваемого случая.

Графики зависимости  $K_T(\alpha)$  показаны на рис. 3. Кривая 1 отражает упомянутую зависимость для  $K_T$ , вычисленного по формуле (11), величины вращающих моментов  $T_{н.\max}$  и  $T_{н.\min}$  в которой определялись по формуле (1). При построении кривой 2 также использовалась формула (11), однако величины  $T_{н.\max}$  и  $T_{н.\min}$  в ней определялись по формуле (10).

При построении графиков приняты те же исходные данные, что и при построении кривых на рис. 2. Дополнительные параметры, включенные в формулу (11), имели следующие значения:  $z=40$  Н/мм,  $h=12$  мм,  $\varphi_{\max}=14^\circ$ ,  $\varphi_{\min}=6^\circ$ , что соответствовало величинам коэффициента трения  $f_{\max} \approx 0,25$ ,  $f_{\min}=0,1$ .

Указанные величины коэффициента трения соответствуют реальным значениям для пар трения «закаленная сталь–закаленная сталь» в условиях влияния ряда факторов случайного характера [8].

Графики, приведенные на рисунке 3, показывают:

- при всех величинах угла  $\alpha$  точность срабатывания ПКМ, вычисленная по формуле (11), с учетом соотношения (10), выше, чем точность срабатывания, вычисленная по указанной формуле, с учетом выражения (1);

- кривая 2 имеет (в пределах графика) точку минимума, соответствующую величине угла  $\alpha \approx 62^\circ$ ;

- меньшие значения коэффициент точности муфты имеет при величинах  $\alpha < 62^\circ$ ; при увеличении угла  $\alpha$  наблюдается существенный рост величины коэффициента точности и, соответственно, снижение точности срабатывания ПКМ;

- минимумы функции (11), вычисленной с учетом формул (1) и (10), не совпадают по аргументу  $\alpha$ : область минимума кривой 2 смещена в сторону больших значений угла  $\alpha$  по отношению к области минимума кривой 1.

Исследуем влияние величины отношения  $D/d$  на точность срабатывания ПКМ, с учетом полученной новой зависимости между параметрами  $T_n$  и  $D/d$ . Для прежней зависимости (см. формулу (1)) указанное влияние было установлено ранее.

Как и выше, воспользуемся при исследовании графическим способом. Зададимся при построении графика зависимости  $K_T = F(D/d)$  следующими величинами отношения  $D/d$ : 0,14/0,07; 0,18/0,072; 0,21/0,07; 0,25/0,071; 0,3/0,075. Принятые отношения соответствуют величинам 2; 2,5; 3; 3,5; 4, которые используются в практике расчета и конструирования ПКМ [1]. Величины остальных параметров приняты при построении графиков теми же, что и выше.

Кривые 1 и 2, изображенные на рисунке 4 (соответственно коэффициенты точности ПКМ, вычисленные по формуле (11) с учетом формул (1) и (10), построены при оптимальных величинах угла  $\alpha$ . Согласно рисунку 3, это значения  $\alpha \approx 55^\circ$  и  $\alpha \approx 62^\circ$ .

Графики показывают:

- при всех величинах отношения  $D/d$  (в пределах рисунка) коэффициент точности

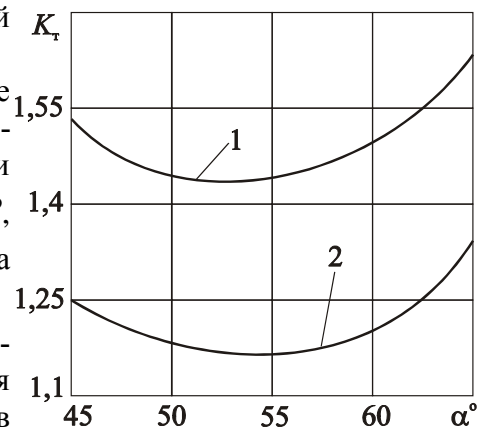


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента точности ПКМ от угла скоса кулачков

ПКМ, вычисленный с учетом формулы (1), больше коэффициента точности, вычисленного с использованием формулы (10);

– при увеличении отношения  $D/d$  точность срабатывания ПКМ уменьшается.

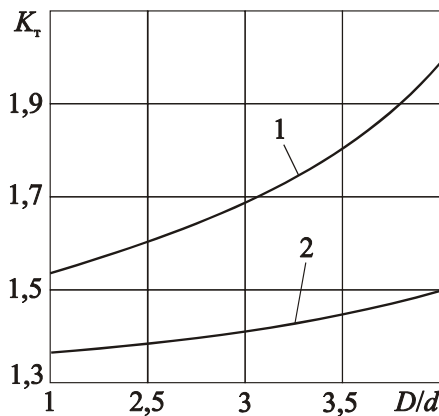


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента точности ПКМ от величины отношения

Сопоставление величин коэффициента точности по графикам, изображенным на рисунке 3 и на рисунке 4, показывает, что ПКМ, с точки зрения точности срабатывания, весьма чувствительна к изменениям величины отношения  $D/d$ . Увеличение отношения  $D/d$  от значения 1,875, что соответствует величине коэффициента точности  $K_T=1,12$ , до  $D/d=2$  приводит к росту величины коэффициента точности до  $K_T=1,36$ . Далее увеличение отношения  $D/d$  не приводит к столь значительному росту величины коэффициента точности.

Кроме того, из рисунка 4 следует, что кривые 1 и 2 имеют точки минимума, примерно соответствующие значениям отношения  $D/d$ , полученным из рисунка 3. Следовательно, при определенных конкретных значениях параметров ПКМ (кроме параметров  $D$  и  $d$ ) существует величина отношения  $D/d$ , при которой муфта обладает наибольшей точностью срабатывания.

Указанный вывод позволяет создать параметрический ряд конструкций ПКМ, с помощью которого можно проектировать муфты, обладающие наибольшей точностью срабатывания при различной нагрузочной способности. Для этого следует, варьируя, по мере необходимости, величины параметров  $D$  и  $d$ , сохранять неизменной величину их отношения, вычисленную исходя из условия минимума величины коэффициента точности ПКМ.

В связи с тем, что в настоящей работе получена новая зависимость по определению нагрузочной способности ПКМ, необходимо исследовать влияние величины угла  $\alpha$  на точность срабатывания муфты в условиях варьирования величины отношения  $D/d$ . Для прежней упомянутой зависимости такое исследование было проведено в работе [4].

Используем принятые выше значения отношения  $D/d$  и величины угла  $\alpha$ , а также остальные параметры ПКМ для построения серии графиков зависимости  $K_T(D/d)$ . На рисунке 5 показаны графики этой зависимости (кривые 1–5, построенные соответственно при значениях угла  $\alpha$ , равных  $45^\circ; 50^\circ; 55^\circ; 60^\circ; 65^\circ$ ).

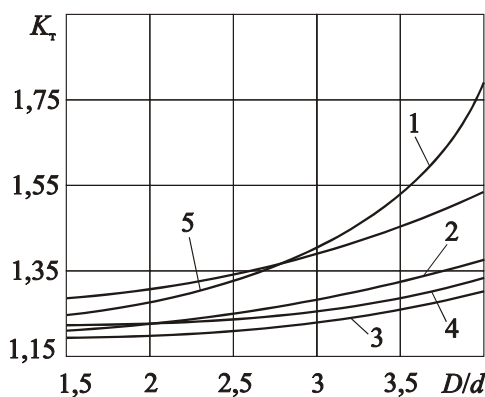


Рисунок 5 – Зависимости  $K_T$  при различных углах скоса кулачков ПКМ

Графики показывают:

- с увеличением отношения  $D/d$  коэффициент точности ПКМ возрастает: это характерно для всех значений угла  $\alpha$ , указанных выше;
- с увеличением угла  $\alpha$  (примерно до значения  $\alpha \approx 55^\circ$ ) происходит сначала уменьшение величины коэффициента точности, затем – ее рост: это характерно для всех величин отношения  $D/d$ , указанных выше;
- при найденном выше оптимальном значении угла  $\alpha$  коэффициент точности ПКМ минимален для всех величин отношения  $D/d$  (кривая 3).

Следовательно, найденные значения угла  $\alpha$  ( $\approx 62^\circ$ ) и отношения  $D/d$  ( $\approx 1,8$ ) являются необходимыми и достаточными для обеспечения минимальной величины коэффициента точности ПКМ, что следует учитывать при их расчете и конструировании.

Результаты исследования могут быть использованы при уточненном расчете и проектировании ПКМ, обладающих высокой точностью ограничения передаваемой нагрузки.

## **ВЫВОДЫ**

1. Уточненная формула для определения величины расчетного вращающего момента предохранительной пружинно-кулачковой муфты, полученная на основе анализа всех действующих сил, приложенных к подвижной полумуфте, содержит, в отличие от существующей аналогичной формулы, функцию разности тангенсов угла скоса боковой (рабочей) поверхности кулачка полумуфты и угла трения между рабочими поверхностями кулачков полумуфт.

2. Установлено, что, с учетом полученной уточненной формулы, величина расчетного вращающего момента муфты меньше, чем величина, вычисленная по существующей формуле, при всех значениях угла скоса боковой поверхности кулачков полумуфт.

3. Точность срабатывания предохранительной пружинно-кулачковой муфты, с учетом полученной новой зависимости, выше, чем точность срабатывания, вычисленная на основе существующей зависимости.

4. Существует единственное оптимальное значение угла скоса боковой поверхности кулачков полумуфт, при котором ПКМ обладает наибольшей точностью срабатывания. Указанное оптимальное значение зависит от конкретных параметров муфты.

5. Существует единственное оптимальное значение отношения величины внешнего диаметра кулачков полумуфт и диаметра центрального посадочного отверстия подвижной полумуфты, при котором точность срабатывания муфты наибольшая, с учетом указанного оптимального значения угла скоса боковой поверхности кулачка полумуфты.

## **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. Тепинкичиев, В.К. Предохранительные устройства от перегрузки станков / В.К. Тепинкичиев. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1968. – 112 с.
3. Дьяченко, С.К. Предохранительные муфты / С.К. Дьяченко, Н.Ф. Киркач. – Киев: Гостехиздат УССР, 1962. – 122 с.
4. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц., Д.Р. Меркин. В 2-х т. Т. 1: Статика и кинематика. – 4-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.- мат. Лит., 1985. – 240 с.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.
6. Афанасьев, М.К. Исследование фрикционных муфт повышенной точности ограничения нагрузки: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Афанасьев М.К. – Киев, 1971. – 21 с.
7. Добровольский, В.А. Детали машин. Учеб. для машиностроит. вузов / В.А. Добровольский, К.И. Заблонский, С.Л. Мак, А.С. Радчик, Л.Б. Эрлих. – М.: Машиностроение, 1972. – 503 с.
8. Крагельский, И.В. Коэффициенты трения / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова. – М.: Машгиз, 1962. – 220 с.

### **Шижкарев Михаил Павлович**

Ростовская-на-Дону государственная академия сельскохозяйственного машиностроения, г. Ростов-на-Дону  
Доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Технология автоматизированного машиностроения»  
Тел. (863-2) 52-41-35  
E-mail: Shishkarev@tam.rgashm.ru

Ю.М. ИВАЩЕНКОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХРОМА НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 20ГЛ ДЛЯ ОТЛИВОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*В работе проведен анализ микролегирования хромом с целью повышения механических свойств стали 20ГЛ. Данный анализ проведен для отливок железнодорожного транспорта на ООО «Промышленная компания «Бежицкий Сталелитейный Завод» (ООО «ПК «БСЗ») г. Брянск.*

**Ключевые слова:** микролегирование, циклические асимметричные нагрузки, усталостных напряжений, раскисление, неметаллические включения, ликвация, микроструктура, трещиностойчивость, горячеломкость, прокаливаемость.

*In work the analysis microalloying by chrome for the purpose of increase of mechanical properties of a steel 20ГЛ is carried out. The given analysis is spent for castings a railway transportation on Society with Limited Liability «Industrial company «the Bezhiitsky Steel foundry» («SLL» IC «BSZ») town of Bryansk.*

**Key words:** microalloying, cyclic asymmetric forces, fatigue pressure, desoxydation, nonmetallic inclusions, liquation, a microstructure, crack resistance, hot-short state, hardening capacity.

В связи с повышением требований ОАО «РЖД» (Российские Железные Дороги) к стальным литым деталям железнодорожного транспорта в направлении повышения надежности и эксплуатационных свойств отливок на ООО «ПК«БСЗ» проведена исследовательская работа в направлении повышения механических свойств стали с помощью микролегирования хромом (Cr).

В процессе эксплуатации детали железнодорожных вагонов испытывают в условиях низких температур циклические асимметричные нагрузки, что приводит к накоплению усталостных напряжений, образованию трещин и преждевременному выходу их из строя. Основными факторами, способствующими изломам, являются недостатки технологии раскисления, приводящие к загрязненности стали неметаллическими включениями (НМВ), газами и образованию в теле отливок объемных структурных несовершенств, вследствие процессов ликвации.

Повышение прочности стали при микролегировании в основном можно обеспечить за счет:

- упрочнения твердого раствора элементами, растворяющимися в феррите по типу внедрения или замещения;
- измельчения аустенитного и феррито-перлитного зерна;
- создания дисперсной фазы в матрице сплава.

Наличие в стали углерода или растворенного азота, образующих с ферритом твердые растворы внедрения, способствует образованию атмосфер Коттрелла. Это приводит к снижению подвижности дислокаций и, как следствие, к повышению прочности стали и увеличению ее склонности к хрупкому разрушению. Микролегирование карбидообразующими элементами (Ti, V, Nb, Mo, Cr) в сравнительно небольших количествах, необходимых только для связывания углерода в карбиды, ослабляет блокировку дислокаций в стали и уменьшает ее склонность к хрупкому разрушению. Дальнейшее увеличение концентрации указанных элементов в феррите усиливает взаимодействие атомов внедрения с дислокациями, повышая степень их блокировки, что приводит к повышению прочности, но одновременно тормозит релаксацию напряжений и уменьшает надежность стали против хрупкого разрушения. Установлены интервалы критических значений отношения концентрации ванадия, молибдена, хрома, марганца к концентрации углерода, при которых наблюдается оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств стали [1].

Свойства стали 20ГЛ после нормализации должны быть (по ТУ завода и ГОСТ 22703-91) следующие:  $\sigma_T = 290-370$  МПа,  $\sigma_B = 490-520$  МПа,  $\delta \geq 18\%$ ,  $\psi \geq 25\%$ .

Одним из важнейших структурообразующих факторов стали и параметров, влияющих на ее механические свойства, является химический состав. Химический состав стали 20ГЛ по ТУ завода представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав стали 20ГЛ по ТУ завода

Химический состав, % по массе									
C	Mn	Si	S*	P*	Cr	Ni	Cu	Al	Ti
			Не более						
0,17-0,25	0,90-1,40	0,20-0,60	0,040	0,040	0,30	0,30	0,30	0,02-0,04	0,002-0,01

\* по требованиям ТУ  $\sum (P+S) \leq 0,06$ .

Хром по сравнению с кремнием и марганцем является слабым упрочнителем феррита. При небольшом содержании хрома (до 1%) несколько повышаются пластические характеристики нормализованного феррита [2]. Дальнейшее увеличение содержания его в стали вызывает снижение пластичности.

Интерес к хрому как конструкционным материалам обусловлен рядом положительных свойств, в частности, высокой температурой плавления, высоким модулем упругости, стойкостью к окислению, жаропрочностью, низким сечением захвата нейтронов.

Для исследования на практике влияния хрома на механические свойства стали 20ГЛ были проведены 8 опытных плавок стали 20ГЛ в электропечах с содержанием Cr 0,28-0,39%. Это обуславливается тем, что небольшие добавки хрома улучшают трещиностойкость, но при добавках свыше 0,8% возрастает склонность к образованию крупнозернистой структуры и горячеломкости стали. Хром существенно увеличивает закаляемость и прокаливаемость стали.

Результаты полученных исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав и механические свойства стали 20ГЛ после нормализации, выплавленной в электропечах с содержанием Cr 0,28-0,39%

№ плавки	Химический состав стали, %										Механические свойства (нормализация)			
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Сu	Ti	Al	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
25	0,21	1,00	0,38	0,020	0,026	0,38	0,10	0,17	0,002	0,045	365	560	29	51
16	0,19	1,19	0,45	0,027	0,028	0,34	0,10	0,16	0,002	0,038	375	590	26	47
24	0,22	1,00	0,31	0,022	0,024	0,28	0,10	0,10	0,001	0,033	340	540	23	42
31	0,22	1,26	0,45	0,027	0,027	0,29	0,10	0,12	0,002	0,050	380	620	26	51
45	0,22	1,08	0,34	0,032	0,028	0,33	0,11	0,11	0,001	0,050	385	580	24	39
52	0,20	1,09	0,38	0,030	0,026	0,29	0,11	0,22	0,003	0,036	355	550	24	35
21	0,21	1,32	0,47	0,028	0,025	0,39	0,10	0,14	0,002	0,048	405	620	21	44
27	0,20	1,03	0,37	0,031	0,025	0,29	0,11	0,16	0,001	0,041	360	570	23,5	44

Анализ данных таблицы 2 показывает следующие значения механических свойств стали 20ГЛ, для  $\sigma_T=340-405$  МПа,  $\sigma_B=540-620$  МПа,  $\delta=21-29\%$ ,  $\psi=35-51\%$  при содержании углерода 0,19–0,22% и Mn 1,0–1,32%, что выше требований ТУ и ГОСТ 22703-91. Следовательно, микролегирование стали 20ГЛ хромом способствует не только повышению механических свойств, но и избавление от нежелательных примесей в металле, устранение возможности появления различных дефектов в отливках.



При выборе легирующих элементов для стали, отвечающей соответствующим техническим требованиям по прочности и вязкости, целесообразнее использовать комплексное легирование хромом, марганцем, кремнием, в различных сочетаниях. Легирующие элементы, вводимые в сталь в определенном оптимальном сочетании, оказывают на свойства стали значительно большее влияние, чем каждый из них в отдельности. В то же время качественное влияние каждого легирующего элемента сохраняется и в комплексно-легированной стали.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лившиц, Л.С. Значение относительной степени легирования (Me/C) для формирования свойств стали / Л.С. Лившиц, В.С. Щербакова // «Изв. АН СССР. Сер. Металлы». – 1969. – № 5. – С. 144 – 147.
2. Гудремон, Э. Специальные стали / Гудремон Э. – Т.2 – М.: Металлургия, 1966. – 1274 с.

### Иващенко Юрий Михайлович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск  
Ассистент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства»  
Адрес: г. Брянск, Бульвар 50 летия Октября, д. 7  
Тел. 8-920-602-43-00  
E-mail: yura\_liteshik@mail.ru



В монографии рассматриваются вопросы методологии эффективного проведения исследований методами натурального эксперимента и физического моделирования при создании новых транспортных машин. В частности, обобщен и систематизирован длительный опыт отечественных экспериментальных исследований тяговых приводов железнодорожного подвижного состава, предложены способы проведения их с минимальными затратами времени и материальных ресурсов. Даны конкретные рекомендации по организации исследований методами натурального эксперимента, проведению испытаний, обработке результатов и принятию решений на основе полученной информации. Рассмотрен ряд практических примеров эффективного использования стендового моделирования, как средства, позволяющего сократить расходы при проектировании силовых передач транспортных средств, двигательных установок, вспомогательных агрегатов и систем управления. Показано использование на практических примерах теории подобия.

Предназначена научным и инженерно-техническим работникам, занимающимся вопросами проектирования эксплуатации транспортной техники, а также студентам машиностроительных специальностей вузов.



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

УДК 621.7 (075)

М.И. БОРЗЕНКОВ, А.Ф. ТРУБИЦИН

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ХОЛОДНОЙ ВЫСАДКОЙ**

*Исследованы наиболее характерные виды поверхностных дефектов в процессе получения исходной заготовки из калиброванной стали для холодной высадки крепежных изделий. Определено их влияние на критическую степень осадки и количественное соотношение между ними. Разработана новая технология и технические условия производства исходных заготовок для высадки крепежных изделий, начиная от прокатки и заканчивая калибровкой. Предложенная технология позволила получить требуемые качества готовых изделий в процессе получения заготовки, что дало значительный экономический эффект.*

**Ключевые слова:** *поверхностные дефекты, критическая степень осадки, калиброванная сталь для холодной высадки.*

*The most characteristic forms of surface defects in the process of obtaining the initial billet of calibrated steel for the cold heading of fastening products are investigated. Their influence on the critical degree sediments and the numerical ratio between them is tested. The new technology and the technical specifications of the production of initial billets for the debarkation of fasteners, beginning from the rolling and concluding by the calibration is developed. The technology offered allowed the required qualities of final products in the process of obtaining the billet, which gave the significant economic effect.*

**Key words:** *surface defects, the critical degree of sagging, calibrated steel for the cold debarkation.*

В последние годы, несмотря на сокращение производства изделий получаемых из проволоки и прутков в России, растет спрос на крепежные и другие изделия повышенной прочности и сложности, изготавливаемые холодной штамповкой-высадкой.

Традиционные методы обеспечения высоких прочностных характеристик таких изделий требуют значительных затрат. Например, термообработка (закалка с отпуском) отштампованных изделий из среднеуглеродистых марок сталей повышает их стоимость на 10 – 20 % и вызывает обезуглероживание поверхностного слоя металла.

Применение легированных сталей для повышения прочности крепежных изделий затрудняет их изготовление на холодновысадочных автоматах, требуются дополнительные затраты на нагрев заготовок, механическую обработку, что значительно удорожает производство.

Совершенно очевидно, что для производства конкурентоспособной продукции метизной промышленности необходимо исключить трудоемкие операции механической обработки низко – и среднеуглеродистых сталей, обеспечив требуемые показатели прочности и пластичности металла на возможно более ранних стадиях получения заготовки.

При штамповке на холодновысадочных автоматах возможны два вида разрушения заготовок: недостаточная пластичность материала и наличие поверхностных дефектов. Штампуемость материала оценивается с помощью осадки образцов. Количественное соотношение между глубиной поверхностных дефектов и критической степенью осадки образца устанавливалось экспериментальным путем. Глубина и типы дефектов измерялись на шлифованных торцах образца с помощью микроскопа.

Образцы осаживали на 50 % по высоте, после чего контролировали их на предмет развития трещин и продолжали осадку в ступенчатом режиме через 3 – 5 % высоты, повторяя контрольные осмотры. Осадка образцов принималась также в качестве одного из стан-

дартных видов испытаний калиброванного проката. В этом случае стандарт предусматривает степени осадки 50%, 66 % и 75 % и соответственно весь материал аттестуют по результатам испытаний на принадлежность к одной из этих трех групп.

Исследовали прокат низко- и среднеуглеродистых марок стали: 10,10 КП, 20, 20 КП, 35 – диаметром от 7,0 до 30,0 мм. В большом объеме были испытаны образцы металла 102 плавок Белорусского метзавода и около 40 комбината «Криворожсталь» после калибровки на Орловском сталепрокатном заводе.

Установлено, что 44,5 % дефектов составляют волосовины и трещины глубиной от 0,44 мм до 0,50 мм, 30,5 % неметаллические включения с выходом на поверхность и 25 % плены и закаты глубиной от 0,07 мм до 3,08 мм.

Таким образом, преобладающая часть дефектов ведет свое происхождение от сталеплавленного производства – это волосовины, трещины и неметаллические включения (69,5 %). Другие дефекты – плены и закаты (30,5 %) являются следствием нарушения технологии прокатки, начиная со слитка.

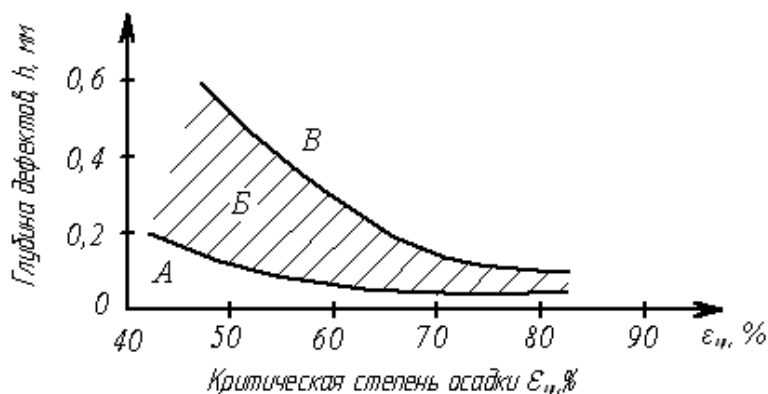


Рисунок 1 – Влияние волосовин и трещин на критическую степень осадки  
 А – допустимая глубина дефектов; Б – опасная глубина дефектов;  
 В – недопустимая глубина дефектов

Штампуемость заготовок зависит от критической степени осадки, которая определяется посредством ступенчатого уменьшения высоты образцов. Результаты экспериментов для волосовин и трещин представлены на рисунке 1. Кривые, полученные для неметаллических включений, пленов и закатов имеет такой же качественный вид. Области А, Б, В показывают допустимую глубину дефектов, опасную и недопустимую.

Установлены наиболее характерные виды поверхностных дефектов калиброванного проката и количественные соотношения между ними:

- волосовины и трещины с глубиной залегания до 0,5 мм – 44,5 % от общего числа дефектов;
- неметаллические включения с выходом на поверхность – 30,5 %;
- плены и закаты с глубиной залегания до 3 мм – 25 %.

Определена допустимая глубина поверхностных дефектов при испытании образцов на осадку по группе 75 и 66:

- волосовины и трещины 0,04 ... 0,08 мм;
- плены и закаты 0,07...0,17 мм;
- неметаллические включения 0,08...0,16 мм;

Проведенные эксперименты позволили установить приоритетные направления совершенствования технологии изготовления – переработка проката в стадии его изготовления. Брались заготовки из непрерывного материала, которые прокатывались на квадрат 125 x125 мм и подвергались зачистке наждачными кругами. Переработка в калиброванный прокат показала резкое уменьшение неметаллических включений и числа дефектов, образующихся при прокатке, благодаря более плотной структуре металла.

Так для партий заготовок Оскольского металлургического комбината сократился брак при высадке деталей сложной формы с 7,8 до 0,1 %.

Всего было исследовано 44 плавки комбината «Криворожсталь» и 13 плавок Белорусского метзавода в состоянии проката из сталей 08 КП, 10 КП, 20 КП, 35. Выдержали осадку на 75 % соответственно 70% и 92 % плавок. После калибровки проката эти показатели возросли в первом случае до 85 % - 99,7 % и во втором до 100%.

Критическая степень осадки и штампуемость заготовок зависят от химического состава и структуры металла.

В настоящее время любое конкурентоспособное производство должно отвечать международным сертификационным требованиям, в том числе требованиям к сквозной технологии, начиная с качества сырья. Исследования показали, что в белорусском металле суммарное содержание серы и фосфора меньше в 1,37 раза чем в Криворожском. Так же в белорусском металле сравнительно мало содержания хрома – до 0,18%, никеля – до 0,17%, меди – до 0,21 %, что благоприятно отражается на показателях пластичности.

Исследование влияния микроструктуры на критическую степень осадки проводилось на марках стали 10 КП, 20, 35, 40 Х. Фиксировали степень сфероидизации перлита, величину аустинитного зерна.

Результаты испытаний показали, что степень сфероидизации перлита не оказывает существенного влияния на критическую степень осадки (около 88%) образцов из низкоуглеродистых сталей 20 и 10 КП. Для среднеуглеродистых сталей при 100% сфероидизации перлита критическая степень осадки изменяется соответственно с 82 до 91%. Рост размеров зерна (не выше 5 номера) снижает прочность в 1,2 ... 1,3 раза, критическая степень осадки повышается с 84 до 89%.

В процессе переработки проката на калиброванные заготовки его подвергают волочению в холодном состоянии. Управление упрочнением металла в процессе калибровки позволяет получить изделия повышенной прочности, так как при высадке болтов, винтов их стержневая часть практически не деформируется, поэтому повысить ее прочность можно заранее – при волочении заготовок.

Проблема заключается в том, чтобы при упрочнении проката сохранить на требуемом уровне показатели штампуемости и пластичности.

Исследования, проведенные на сталях марок 10, 20, 35, 45 для 50 плавок Белорусского метзавода позволили получить повышение прочности проката в 1,3 ... 1,6 раза при сохранении критической степени осадки.

Для среднеуглеродистых сталей наряду с деформационным упрочнением целесообразно прибегать к термомеханическому упрочнению проката.

С целью минимизации материальных затрат использовали технологический нагрев при обработке на проволочно-сортовом стане.

Температура конца прокатки составляла 1020° – 1050°С. Применяли ускоренное двухстадийное охлаждение: сначала в спреерных секциях, затем на конвейере туннельного типа. Двухстадийное охлаждение позволило получить равномерную мелкозернистую структуру металла, что повысило в 1,2 раза прочность проката без особых материальных затрат только за счет его ускоренного охлаждения по окончании прокатки.

Легированные стали по сравнению со среднеуглеродистыми обладают повышенной прочностью и стоимостью.

Для их замещения было исследовано микролегирование сталей бором с получением готовых крепежных изделий высадкой на холодновысадочных автоматах.

На Криворожском комбинате по стандартам Германии изготовили прокат из сталей 20 Р, 30 Р и 35 Р и испытали его на осадку и прокаливаемость. Результаты экспериментов показали, что из боросодержащих сталей целесообразно изготавливать крепежные изделия повышенной прочности с применением закалки после формоизменяющих операций. В тоже время пластические свойства проката в состоянии прокатки высоки: относительное сужение образцов из стали 20 Р, 30 Р, 35 Р составляет 64%, 61,5%, 45% соответственно.

По результатам изложенных исследований были разработаны технические условия «Прокат, термически обработанный (подкат) и калиброванный из стали качественной конструкционной углеродистой для холодного выдавливания и высадки».

Согласованный документ содержит требования к исходному прокату: по химсоставу, механическим свойствам, структуре, поверхностным дефектам, обезуглероженному слою, методике и видам механических испытаний. При разработке конкретной технологии процесса производства калиброванного металла для высадки, разработанные технические условия позволяют обоснованно подойти к выбору исходной заготовки, включая требования к ее получению, начиная с первого металлургического передела. В зависимости от назначения калиброванного проката и от технологии получения заготовки предложенный технологический процесс, включает операции волочения с определенной степенью обжатия, термообработки и травления.

Применение разработанной новой технологии позволило получить технико-экономический эффект на Челябинском автомеханическом заводе при изготовлении толкателя тарелки клапана (снижен брак по растрескиванию с 12 % до 3 %, повысилась стойкость высадочного инструмента в 1,5 ... 2,5 раза), а так же на Орловском сталепрокатном заводе при производстве крепежных изделий.

Использование боросодержащих сталей для высадки группы крепежных изделий на заводе «Автономаль» позволило получить механические характеристики, соответствующие требованиям стандартов Германии, Японии и других стран.

Результаты исследований, приведенные в данной работе, были получены в течение длительного ряда лет и потребовали больших материальных затрат.

Следует отметить, что крайне мало работ посвящено совершенствованию технологии получения исходной заготовки и воздействию ее на конечный продукт – готовое крепежное изделие.

В изложенной работе рассмотрено влияние всего технологического цикла производства исходной заготовки, начиная прокаткой и заканчивая волочением. Обычно научно-исследовательские работы, относящиеся к данной области производства, изучают непосредственно технологический процесс холодной высадки, распределение обжатий по переходам, изменение продукции и стойкости высадочного инструмента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзенков, М.И. Исследование влияния качественных характеристик горячекатаного и калиброванного проката на способность металла к холодному выдавливанию и высадке крепежных изделий / М.И. Борзенков, И.М. Шумилин, В.Я. Осадчий, А.А. Мышечкин // Кузнечно-штамповочное производство – 1966, № 11, - с. 12 – 14.

2. Борзенков, М.И. Выбор покрытий для защиты поверхности металла от обезуглероживания при нагреве стали. // М.И. Борзенков, А.Ф. Трубицин. гидродинамическая теория смазки – 120 лет: материалы международного научно-практического симпозиума – Орел: ОрелГТУ, 2006, с. 370 – 373.

### **Борзенков Михаил Иванович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»

302020 г. Орел Наугорское шоссе, 29.

Тел. 8 (4862) 43-48-90

E-mail. bim@ostu.ru

### **Трубицин Александр Филиппович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, профессор

302020 г. Орел Наугорское шоссе, 29.

Тел. 8 (4862) 43-48-90

E-mail. bim@ostu.ru

## РАСЧЕТЫ ДИАМЕТРОВ ЗУБЬЕВ МНОГОЗУБОГО ДОРНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ИЗ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

*Изложена новая методика расчета диаметров зубьев многозубого дорна при обработке отверстий трубчатых заготовок в режимах формообразования, калибрования и выглаживания. Многозубый дорн содержит деформирующие зубья, форма продольного сечения которых соответствует форме очага деформации. Приведены алгоритмы, позволяющие автоматизировать расчетные операции.*

**Ключевые слова:** деформация, дорн, многозубый дорн, выглаживание, калибрование, формообразование.

*The article gives an account of new methods of calculation of teeth diameters of many-teeth mandrel for processing of apertures of pipe bars in moulding, calibration and burnishing. Many-teeth mandrel contains deforming teeth, whose shape of longitudinal section corresponds with the shape of centre of deflection. It also gives algorithms which allow to automate calculating operations.*

**Key words:** deflection, mandrel, many-teeth mandrel, burnishing, calibration, moulding.

Дорнование отверстий трубчатых заготовок обычно выполняется многозубыми дорнами, состоящими из отдельных секций, каждая из которых выполняет одну из специфических задач формообразования, калибрования и выглаживания. При формообразовании происходит изменение диаметров и длины заготовки, при калибровании обеспечивается требуемая точность отверстия, а на этапе выглаживания – требуемая шероховатость. Каждый этап дорнования характеризуется величиной натяга и геометрией очага деформации. На этапе формообразования материал заготовки благодаря большим натягам переходит в пластическое состояние по всему поперечному сечению. На этапе калибрования натяги существенно меньше, пластические деформации малы, а изменение размеров заготовки незначительное. На этапе выглаживания воспроизводится режим упругого деформирования заготовки без изменения ее размеров. Для обеспечения требуемых показателей обработки необходимо правильно распределять натяги по отдельным этапам дорнования.

Полная схема очага деформирования при проходе через заготовку конусного зуба

дорна, имеющего диаметр  $d_d = 2r_d$  и заборный угол  $\alpha$ , приведена на рисунке 1. В общем случае очаг деформации состоит из пяти сопряженных участков, находящихся в чисто упругом ( $T_0-T_1$  и  $T_5-T_6$ ) или в упруго-пластическом ( $T_1-T_2$  и  $T_3-T_5$ ) состояниях. Зоны деформации между точками  $T_0-T_2$  и  $T_3-T_6$  являются внеконтактными, их разделяет участок контакта деформированного материала с поверхностью конуса инструмента  $T_2-T_3$ . Положения точек  $T_1$  и  $T_6$  определяют значения максимальных упругих смещений  $U_y$  и поворотов  $\theta_y$  в передней и задней зонах. В точке  $T_2$  материал трубы входит на конус инструмента, в точке  $T_3$  – сходит с него под углом  $\theta_n < \alpha$ . Точки  $T_2-T_3$  определяют длину контакта  $l_k$  деформируемой трубы с дорном. Форму упруго-пластических участков  $T_1-T_2$  и  $T_3-T_4-T_5$  определяют радиусы дуги изгиба  $R_n$  с центрами в точках 4 и 5 и углы входа и схода

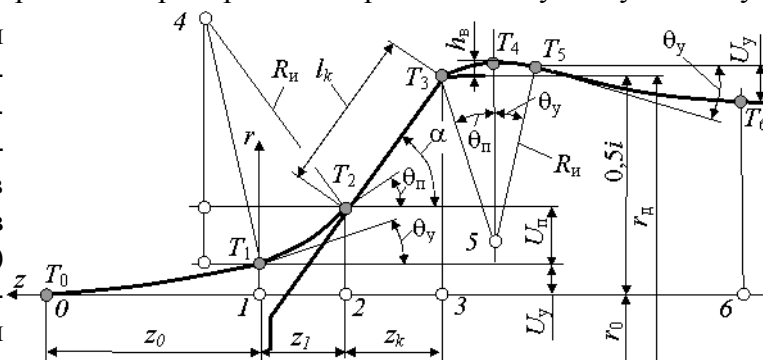
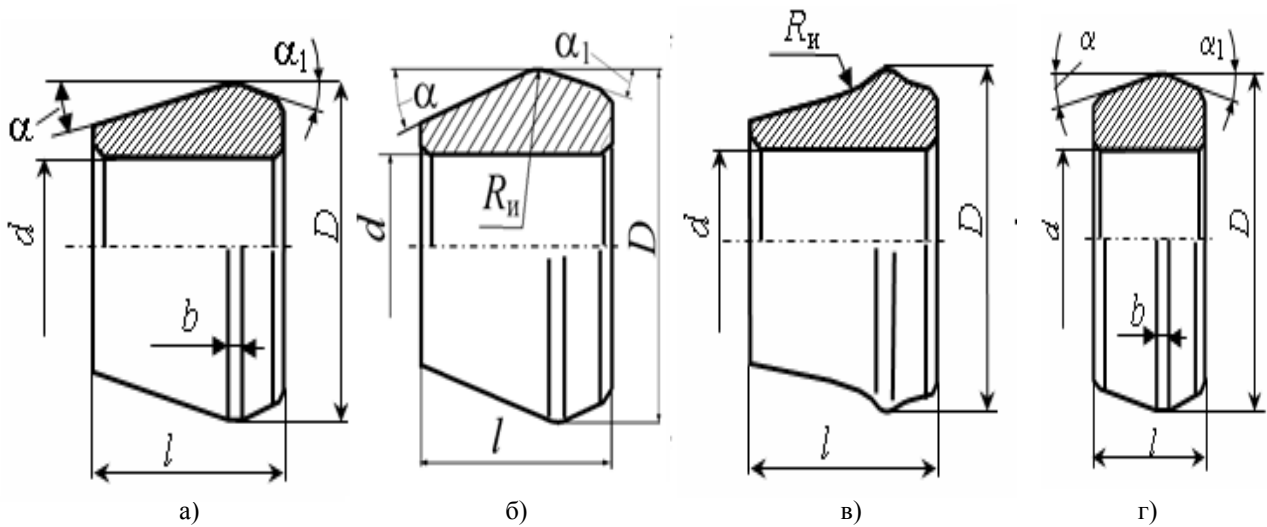


Рисунок 1– Геометрия очага деформации трубчатой заготовки при дорновании отверстия

инструмента  $T_2-T_3$ . Положения точек  $T_1$  и  $T_6$  определяют значения максимальных упругих смещений  $U_y$  и поворотов  $\theta_y$  в передней и задней зонах. В точке  $T_2$  материал трубы входит на конус инструмента, в точке  $T_3$  – сходит с него под углом  $\theta_n < \alpha$ . Точки  $T_2-T_3$  определяют длину контакта  $l_k$  деформируемой трубы с дорном. Форму упруго-пластических участков  $T_1-T_2$  и  $T_3-T_4-T_5$  определяют радиусы дуги изгиба  $R_n$  с центрами в точках 4 и 5 и углы входа и схода

да материала  $\theta_n$ . Точка  $T_4$  находится в вершине упруго-пластической волны высотой  $h_b$ , точка  $T_5$  определяет начало упругой разгрузки в задней зоне деформации.

Максимальная устойчивость деформирующего зуба в процессе его прохождения через отверстие и уменьшение погрешностей продольной формы детали могут быть достигнуты,



**Рисунок 2 – Формы продольных сечений деформирующих (а, б, в), калибрующих и выглаживающих (г) зубьев многозубого дорна**  
 Тип профиля зуба: а, г) – с рабочим и обратным конусами;  
 б) – с рабочим конусом и геометрическими элементами очага деформации на выходе материала; в) – с дополнительными геометрическими элементами очага деформации на входе и выходе материала

если профиль продольного сечения деформирующих зубьев будет соответствовать профилю очага деформации. Рекомендуемые формы профилей зубьев многозубого дорна с различной степенью приближения к форме очага деформации приведены на рисунке 2.

Использование наиболее простого конусного профиля формообразующего зуба (рисунок 2,а) сопровождается образованием двухсторонних внеконтактных зон деформаций. Профили других типов зубьев позволяют частично (рисунок 2,б) или полностью (рисунок 2,в) совпадать с профилем очага деформации. Калибрующие и выглаживающие зубья конструктивно более простые, выполняемые с симметрично расположенными относительно цилиндрической ленточки конусами (рисунок 2,г).

Для расчета диаметров зубьев многозубого дорна необходимо знать максимальные значения упругих смещений и наибольший угол упругого разворота поперечного сечения в очаге деформации в точке 1 (рисунок 1), в которой материал трубы переходит в пластическое состояние. Согласно [1] их величины определяются из следующих выражений:

$$U_{\max} = \frac{\beta \sigma_s}{2E} f_c; \quad \theta_{\max} = 2 \frac{\beta \sigma_s}{E} \alpha_c$$

где  $\beta$  – коэффициент Лодэ;

$\sigma_s$  – сопротивление материала пластическому деформированию (с учетом упрочнения);

$E$  – модуль продольной упругости деформируемого материала;

$r_0$  – начальный радиус отверстия;

$m$  – относительная толщина стенки (отношение диаметров заготовки);

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{G m \mu}{m^3 m}} \text{ – геометрическая характеристика поперечного сечения.}$$

Коэффициент  $f_c$  зависит от толщины стенки:

$$\text{при } m < 1,2 \quad f_c = \frac{m H_{\text{н}}}{H_{\text{н}} m \sigma} \geq; \text{ при } m \geq 1,2 \quad f_c = \frac{H_{\text{н}}^2}{H_{\text{н}} m \sigma^2}$$

Натяги дорнования и диаметры зубьев для этапов выглаживания, калибрования и формообразования определяем в следующей последовательности.

### 1 ВЫГЛАЖИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Пластические деформации при выглаживании отсутствуют, натяги дорнования  $i_{\text{в}}$  на выглаживающие зубья определяются смещениями в интервале  $0 < i_{\text{в}} \leq 2U_{\text{уп}}$ . Максимальный натяг выглаживания  $i_{\text{вп}}$  определяет наибольшую длину линии контакта, которую при достаточно малых натягах приближенно можно рассчитать без учета внеконтактных смещений по формуле:

$$l_{\text{вп}} = 0,5 i_{\text{вп}} / \sin \alpha$$

Натяг выглаживания может быть меньше, чем  $i_{\text{вп}} = 2U_{\text{упmax}}$ , в этом случае фактическую длину контакта  $l_{\text{в}}$  определяет принятый натяг выглаживания:

$$l_{\text{в}} = 0,5 i_{\text{в}} / \sin \alpha$$

Расчет диаметров выглаживающих зубьев выполняется в соответствии со следующим алгоритмом.

- 1.1. Расчет наибольшего упругого смещения  $U_{\text{упmax}}$ .
- 1.2. Расчет наибольшего натяга выглаживания  $i_{\text{вп}} = 2U_{\text{упmax}}$ .
- 1.3. Назначение фактического натяга выглаживания  $i_{\text{в}} = 0,5 \dots 0,5 i_{\text{вп}}$ .
- 1.4. Назначение количества выглаживающих зубьев  $n_{\text{в}}$  (целесообразно иметь 1..3 зуба)
- 1.5. Диаметры выглаживающих зубьев целесообразно принять равными с натягом на каждый выглаживающий зуб, равным принятому значению  $i_{\text{в}}$ .
- 1.6. Расчет диаметров выглаживающих зубьев по формуле  $d_{\text{в}} = d_{\text{дт}} + i_{\text{в}}$ .

### 2 КАЛИБРОВАНИЕ ОТВЕРСТИЯ

Натяг дорнования должен быть таким, чтобы в области контакта возникали пластические деформации без образования внеконтактного пластического участка 1–2 на рисунке 1.

Необходимая для образования полной упругой зоны сила  $Q$ , приходящаяся на единицу длины окружности дорна, по данным исследований [1] равна:

$$Q = \frac{m H_{\text{н}}}{m H_{\text{н}} \sigma} \quad (1)$$

Сила  $Q$  зависит от давления, образующегося на поверхности контакта дорна с заготовкой в процессе преодоления сопротивления деформируемого материала трубы:

$$R = \frac{\sigma_s m}{2n} \quad (2)$$

Очевидно,  $Q = p_k l_{\text{кп}}$ ,

где  $l_{\text{кп}}$  – длина линии контакта зуба дорна с заготовкой.

Принимая во внимание (1) и (2), получаем:

$$l_{\text{кп}} = \frac{2 H_{\text{н}}}{m \left[ \frac{\sigma_s m}{2n} \sigma \right]} \quad (3)$$

Наибольший натяг, при котором возможно пластическое деформирование при отсутствии внеконтактных пластических смещений, не должен превышать величину, равную:

$$i_{кр} = 2l_{кр} \sin \alpha U_{узм}. \quad (4)$$

Натяг дорнования на калибрующие зубья  $i_k$  согласно схеме на рисунке 1 находится в интервале  $U_{узм} = i_{кр} < i_k \leq i_{кр}$ . Если фактический натяг на отдельные зубья дорна  $i_k$  больше величины  $i_{кр}$ , полученной по формуле (4), в очаге деформирования появляются внеконтактные пластические деформации. Фактические натяги на калибрующие зубья  $i_k$  могут быть меньше, чем  $i_{кр}$  и упругие смещения и длина контакта пропорционально уменьшаются:

$$U_k = U_{кр} i_k / i_{кр}; \quad l_k = l_{кр} i_k / i_{кр}. \quad (8)$$

Расчет диаметров калибрующих зубьев выполняется по следующему алгоритму.

2.1. По формуле (3) определяем величину  $l_{кр}$ .

2.2. По формуле (4) определяем величину  $i_{кр}$ .

2.3. Назначаем суммарный натяг калибрования  $i_k = 0,850,85 i_{кр}$ .

2.4. Принимаем число калибрующих зубьев  $n_k$  (единый блок из 3-х.–5-и зубьев).

2.5. Определяем диаметры калибрующих зубьев  $d_{k_i}$ , используя логарифмическую или линейную зависимости распределения суммарного натяга:

$$d_{k_i} = d_{кр} + i_k \left[ \frac{z_{k_i} - 1}{n_k - 1} \right] \quad \text{или} \quad d_{k_i} = d_{кр} + i_k \frac{z_{k_i}}{n_k},$$

где  $z_{k_i}$  – номер калибрующего зуба.

Геометрия продольного профиля выглаживающих и калибрующих зубьев должна соответствовать типу «г» на рисунке 2.

### 3 ПЛАСТИЧЕСКОЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ

Увеличение поперечного сечения заготовки происходит при натяге, превышающем максимальный натяг калибрования:  $i_n \geq i_{кр}$ . В процессе формообразования образуются внеконтактные пластические участки, форма которых в продольном сечении приближенно может быть описана дугами окружностей радиуса  $R_n$ . При больших деформациях и чистом изгибе этот радиус согласно исследованиям [1] равен:

$$R_n = \frac{1}{2} \sqrt{f_1^2 + f_2^2}, \quad (9)$$

где  $f_1 = \frac{2 \Delta d}{d} \frac{1}{\sin \alpha}$ ;  $f_2 = \frac{2 \Delta d}{d} \frac{1}{\cos \alpha}$

Точка касания дуги внеконтактной деформации с поверхностью инструмента (см. рисунок 1) определяет величину наибольшего внеконтактного пластического смещения  $U_{пр}$ :

$$U_{пр} = \frac{2 \Delta d}{d} \frac{1}{\sin \alpha} \frac{1}{\cos \alpha}. \quad (10)$$

Это смещение происходит под действием давления на контактной поверхности, длину которой и соответствующий ей натяг можно рассчитать по формулам:

$$l_{кр} = \frac{2 \Delta d}{d} \frac{1}{\sin \alpha} \frac{1}{\cos \alpha} \quad (11)$$

$$i_{кр} = 2 l_{кр} \sin \alpha U_{узм}. \quad (12)$$



Фактический натяг дорнования может быть больше или меньше рассчитанного по формуле (12). При  $i_{\text{п}} > i_{\text{пр}}$  длина контакта увеличивается, а прочие параметры очага деформирования остаются неизменными.

При  $i_{\text{п}} < i_{\text{пр}}$  длина контакта  $l_{\text{п}}$  и угол захода деформируемого материала  $\theta_{\text{п}}$  на конус инструмента уменьшаются. Используя принцип пропорциональности смещений, для данного условия имеем:

$$U_{\text{п}} = U_{\text{пр}} i_{\text{п}} / i_{\text{пр}}; \quad l_{\text{п}} = \left[ \frac{i_{\text{п}} - 2U_{\text{п}}}{U_{\text{п}}} \right] i_{\text{к}}; \quad \theta_{\text{п}} = \arcsin \left( \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{п}}} \right) \quad (13)$$

Для расчета диаметра деформирующего зуба дорна предварительно выбираем тип его продольного профиля (рисунок 2): а – обычный с рабочим и обратным конусами; б, в – геометрически подобный (частично или полностью) профилю очага деформации. Для типа «а» при расчете диаметра необходимо учитывать высоту деформационной волны  $h_{\text{в}}$ :

$$h_{\text{в}} = R_{\text{п}} (1 - \cos \theta_{\text{п}}), \quad (14)$$

с учетом которой диаметр деформирующего зуба равен:

$$d_{\text{п}} = d_{\text{к}} - i_{\text{к}} - 2h_{\text{в}} \quad (15)$$

Диаметры деформирующих зубьев дорна определяются по следующему алгоритму.

3.1. Определяем радиус  $R_{\text{п}}$  пластического внеконтактного участка по формуле (9).

3.2. Определяем расчетную длину контакта  $l_{\text{пр}}$  по формуле (11) и соответствующий этой длине натяг дорнования  $i_{\text{пр}}$  по формуле (12).

3.3. Определяем фактический натяг на деформирующий зуб, используя известные значения диаметров наибольшего калибрующего зуба  $d_{\text{к max}}$ , минимальный диаметр отверстия трубчатой заготовки  $d_{\text{0 min}}$  и допуск на него  $T_d$ :

$$i_{\text{п}} = d_{\text{к max}} - d_{\text{0 min}} - T_d. \quad (16)$$

3.4. Выбираем тип продольного профиля и расчетный диаметр

3.4.1. Для расчета диаметра зуба, имеющего форму продольного сечения типа «а» (см. рисунок 2), определяем высоту волны  $h_{\text{в}}$  по формуле (14) и затем  $d_{\text{п}}$  по формуле (15)

3.4.2. Диаметр зуба, форма продольного сечения которого соответствует типу «б» или «в» на рисунке 2, а пластическая волна деформации отсутствует, диаметр зуба равен:

$$d_{\text{п}} = d_{\text{к}} - i_{\text{к}} \quad (17)$$

## ВЫВОДЫ

Методика расчета диаметров зубьев многозубого дорна позволяет в автоматическом режиме определять главные размеры инструмента для формообразующего, калибрующего и выглаживающего этапов обработки отверстий в деталях из трубчатых заготовок

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайдес, С.А. Технологическая механика осесимметричного деформирования: Моногр. / С.А. Зайдес, А.Н. Исаев. – Иркутск: ИрГТУ, 2007. – 432 с.

**Исаев Альберт Николаевич**

Ростовская государственная академия с/х машиностроения

Доктор техн. наук, профессор кафедры «Технология автоматизированного машиностроения»

Тел. (863)2524135

E-mail: anis@tam.rgashm.ru

**Лебедев Алексей Романович**

Ростовская государственная академия с/х машиностроения

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология автоматизированного машиностроения»

Тел. (863)2525136

E-mail: alex@cit.rgashm.ru

В.С. СЕЛИФОНОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗИНОТКАНЕВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ

*В статье рассмотрены способы ремонта конвейерной ленты, представлена методика проведения экспериментальных исследований. Приведены расчётные зависимости составляющей силы резания от режимов обработки.*

**Ключевые слова:** конвейерная лента, составляющая силы резания, экспериментальные исследования, механическая обработка материала.

*The article describes the ways of repairing a conveyor belt is provided method for experimental studies. Calculation based component of the cutting force on the modes of processing*

**Key words:** conveyor belt, the cutting force component, pilot studies, machining material.

Потребителями конвейерных лент (КЛ), являющихся тяговым и грузонесущим органом ленточных конвейеров являются предприятия, эксплуатирующие ленточные конвейеры. Эксплуатация данного вида изделия происходит в тяжёлых условиях, что ведёт к быстрому повреждению и даже разрушению непосредственно транспортирующего элемента [1]. Поэтому ремонт данного вида изделия является часто выполняемой работой при обслуживании конвейеров, позволяющей существенно продлить срок службы ленты.

В отечественной и зарубежной практике имеется опыт ремонтов конвейерных лент [1]. Наиболее эффективным, не требующим больших капитальных затрат и специальных предприятий является текущий ремонт, который может быть организован в пределах существующих служб, обслуживающих ленточные конвейеры на данном предприятии, на базе имеющегося оборудования и материального обеспечения. Задачей текущего ремонта является поддержания ленты в работоспособном состоянии без снятия её с конвейера. Текущему ремонту подвергаются как резинотканевые, так и резинотросовые конвейерные ленты. Основное назначение текущего ремонта — заделка повреждений обкладок, каркаса и ликвидация мелких порывов бортов.

Восстановительный ремонт лент предусматривает большой объём работ практически на всей площади ленты. При восстановительном ремонте выполняются следующие операции: замена изношенных обкладок ленты, заделка пробоин, ремонт повреждённых бортов, стыковка отдельных отрезков лент.

Одной из основных проблем восстановительного ремонта конвейерных лент является обеспечение высокой прочности связи в клеевых соединениях данного материала [1,4]. Это возможно при наличии определенного микрорельефа обрабатываемой поверхности с определённым значением параметра шероховатости поверхности  $R_a$ . Экспериментально установлено, что наиболее оптимальным значением является значение  $R_a=14...15$  мкм [4]. Для достижения требуемого параметра качества поверхности необходимо использовать специальные режущие инструменты, таких как шероховальные головки [1,3]. Однако такие инструменты имеют сложную конструкцию, сложны в изготовлении, имеют высокую стоимость.

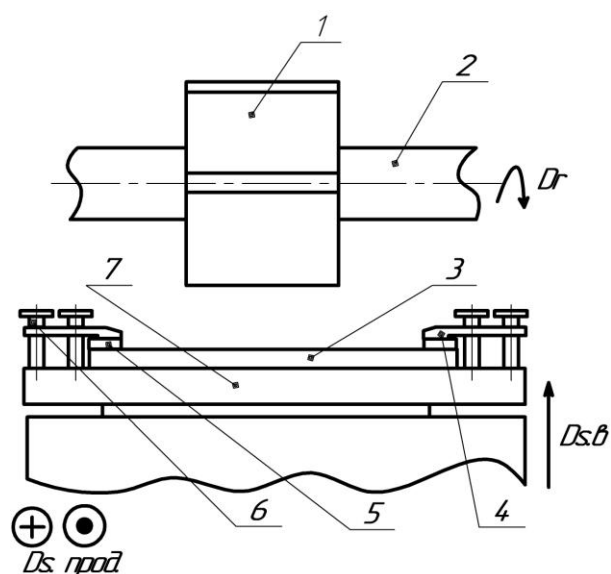
Анализ технической литературы показал наличие небольшого количества информации о возможностях механической обработки конвейерных лент, режимах резания и параметрах качества поверхности. Целью данных исследований является получение теоретических зависимостей составляющей силы резания в зависимости от режимов обработки, которые необходимы для расчёта усилий закрепления, мощности резания и т. д. Для данного рода расчётах используется главная составляющая силы резания – окружная сила  $P_z$  [2].

При проведении экспериментальных исследований использовалось следующее оборудование: автоматизированная система научных исследований (АСНИ), в состав которой вхо-

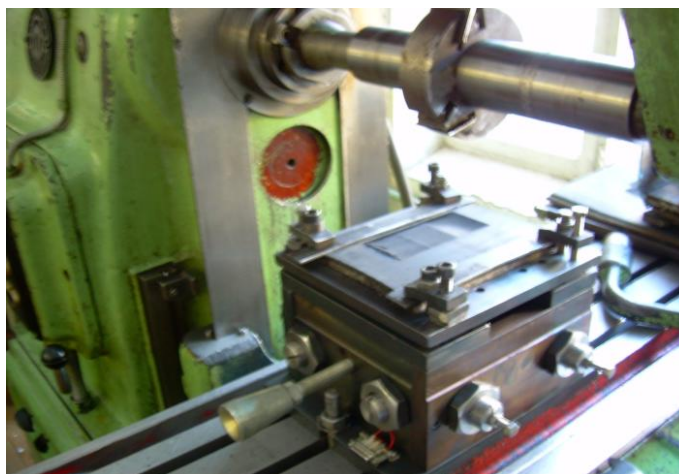
дит: горизонтально-фрезерный станок мод. 6М82Г, динамометрический стол (динамометр), разработанный и изготовленный в лаборатории кафедры, усилитель со встроенным АЦП, ЭВМ.

Крепление образцов 3 конвейерной ленты марки 2Т2-800-6-ТК-200-2-6-2-2-Т-2-Р6 на рабочем столе 7 динамометрического устройства, который в свою очередь устанавливается на рабочий стол горизонтально-фрезерного станка мод. 6М82Г, осуществлялось с помощью прихватов 4 через стальные пластины с противоположных сторон. Данный способ крепления ленты позволяет наиболее эффективно использовать рабочую площадь для проведения наибольшего количества экспериментальных повторений, обеспечивая тем самым необходимое натяжение образца на динамометрическом столе.

В качестве режущего инструмента применялась цилиндрическая фреза 1 диаметром  $D=165\text{мм}$ , которая в свою очередь устанавливается на оправке 2 горизонтально – фрезерного станка. Схема крепления образца представлена на рисунке 1, общий вид крепления на рисунке 2. Материал рабочей части инструмента Р6М5, число зубьев фрезы  $Z=3$ .



**Рисунок 1 – Схема закрепления образца конвейерной ленты**  
 1 – режущий инструмент; 2 – оправка; 3 – образец резиноканевой конвейерной ленты; 4 – прихват; 5 – пластина; 6 – винт; 7 – рабочий стол динамометрического стола (динамометра);  $D_r$  – главное движение резания (вращение инструмента);  $D_{s.v}$  – движение подачи (вертикальное перемещение рабочего стола станка с динамометрическим устройством);  $D_{s.прод}$  – движение подачи (продольное перемещение стола станка)



**Рисунок 2 – Общий вид закрепления образца на станке**

Входными факторами при проведении исследований являются:  $x_1$  – t-глубина резания, мм;  $x_2$  – V-скорость главного движения резания, м/мин,  $x_3$  – Sz -подача на зуб, мм/зуб. Значения входных факторов, необходимых для проведения исследований, представлены в таблице 1. Экспериментальный график составляющих силы резания в процессе механической обработки материала представлен на рисунке 3.

Таблица 1 – Значения уровней входных факторов для эксперимента

Фактор $X_i$	Параметр, соответствующий фактору	Уровень фактора	
		Нижний (-1)	Верхний (+1)
$x_1$	t(мм)	1	4
$x_2$	V(м/мин)	157	564
$x_3$	$S_z$ (мм/зуб)	0,005	0,33

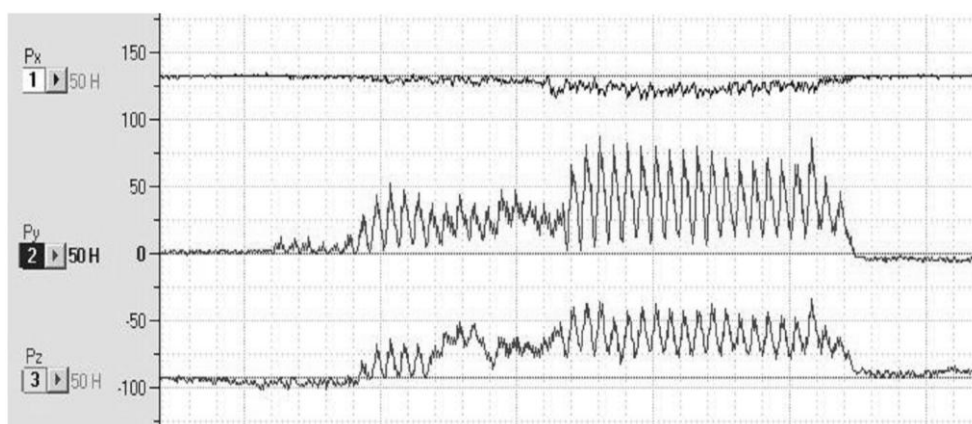


Рисунок 3 – График зависимости составляющих силы резания в процессе механической обработки материала

После проведения регрессионного анализа было получено следующее уравнение:

$$F_z = 573,4 \cdot t^{0,583} \cdot V^{-0,451} \cdot S_z^{0,235} \text{ (Н)}$$

Результаты проверки на адекватность выражения с использованием критерия Фишера показали, что данное уравнение адекватно описывает процесс и может быть использовано в инженерных расчётах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высочин, Е. М. Стыковка и ремонт конвейерных лент на предприятиях чёрной металлургии /Е. М. Высочин, Е. Х. Завгородний, В. И. Заренков. – М.: Металлургия, 1989 – 192 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова // - М.:Машиностроение-1. - 2001. – 944 с.
3. Евзович, В.Е. Восстановление пневматических изношенных шин / В.Е. Евзович. – М.: Автополис-плюс, 2005. – 624 с.
4. Материалы 58-й научной конференции профессорско-преподавательского состава / Под ред. С.П. Сазонова, И.В. Говорова. – Брянск: БГТУ, 2008. – 576 с.

#### Селифонов Виталий Сергеевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск  
 Соискатель кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»  
 Адрес: г. Брянск, Б-р 50 летия Октября, д.7  
 Тел. (4832) 588289  
 E-mail: msi@tu-bryansk.ru

## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.391

М.В. ИЛЮШИН, А.А. АФАНАСЬЕВ, О.О. БАСОВ

### **ПСИХОАКУСТИЧЕСКИЙ КЛАССИФИКАТОР КАДРОВ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ КОДИРОВАНИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО РЕЧЕВОГО СИГНАЛА**

*Снижение скорости передачи и повышение качества синтезированного широкополосного речевого сигнала по показателям естественности его звучания и узнаваемости говорящего может быть достигнуто за счет учета особенностей восприятия речи человеком. В статье предложен новый метод использования свойств психоакустики. Показана возможность оптимизации распределения информационных ресурсов кодека с переменной структурой.*

**Ключевые слова:** широкополосный речевой сигнал, психоакустика, перцептуальная энтропия, линейное предсказание, адаптивная система.

*Bit-rate reducing and improving the quality of the synthesized wideband speech signal on indicators of naturalness speech and recognition of the speaking can be achieved by extended employing the methods of psychoacoustics. In article new method of using the psychoacoustic is suggested. Possibility of optimization information resources distribution codec with variable structure is shown.*

**Key words:** wideband speech signal, psychoacoustic, perceptual entropy, linear prediction, adaptive system.

В настоящее время в условиях развития глобального информационного общества, когда имеется возможность мобильного доступа к широкому спектру мультимедийных услуг, для реализации полноценного телекоммуникационного обмена в некоторых приложениях современных сетей связи необходимы низкоскоростное (менее 16 кбит/с) кодирование и передача речевого сигнала (РС). При этом требуется обеспечить естественность звучания восстановленного речевого сигнала, включая возможность идентификации диктора, его эмоционального состояния и характеристик окружающей его акустической среды [1].

Для низкоскоростного кодирования речи используются вокодеры, модель речеобразования которых основана на параметрическом представлении РС. Несмотря на значительные успехи в данной области, актуальной является задача дальнейшего снижения скорости передачи и повышения качества синтезированного РС по показателям естественности его звучания и узнаваемости говорящего. Перспективными направлениями повышения качества звучания восстановленного РС являются переход от кодирования узкополосного РС к передаче широкополосного речевого сигнала (ШРС) с диапазоном частот от 50 до 7000 Гц [2] и учет при кодировании особенностей восприятия речи человеком [3, 4].

Современные кодеры широкополосного речевого сигнала (КШРС) используют метод линейного предсказания с кодовым возбуждением и строятся по встраиваемой технологии: с пирамидальной, многополосной и/или многоуровневой структурой [5]. Одним из перспективных подходов к оптимизации КШРС является кодирование ШРС с применением метода векторного квантования компонентов сигнала возбуждения в частотных полосах.

В перцептуальном (психоакустическом) кодере ШРС, наряду с уменьшением информационной избыточности, стоит цель сокращения перцептуальной избыточности, которая достигается за счет передачи только тех составляющих исходного РС, которые аудиторная система человека способна воспринять, и расположения в спектре сигнала внесенных искажений ниже порога маскирования. Для того, чтобы потери от квантования были ниже порога

восприятия акустической информации слушателем, рассчитывается субполосная перцептуальная энтропия, определяющая количество бит, необходимых для кодирования.

Анализ результатов исследований показал неравномерное распределение субполосной перцептуальной энтропии для подавляющего большинства кадров ШРС. В этих условиях правомерно для функционирования систем липредерного кодирования ШРС с возбуждением от кода использовать структурную адаптацию к психоакустическим особенностям восприятия речи аудиторной системой человека.

Обобщенная структурная схема КШРС представлена на рисунке 1.

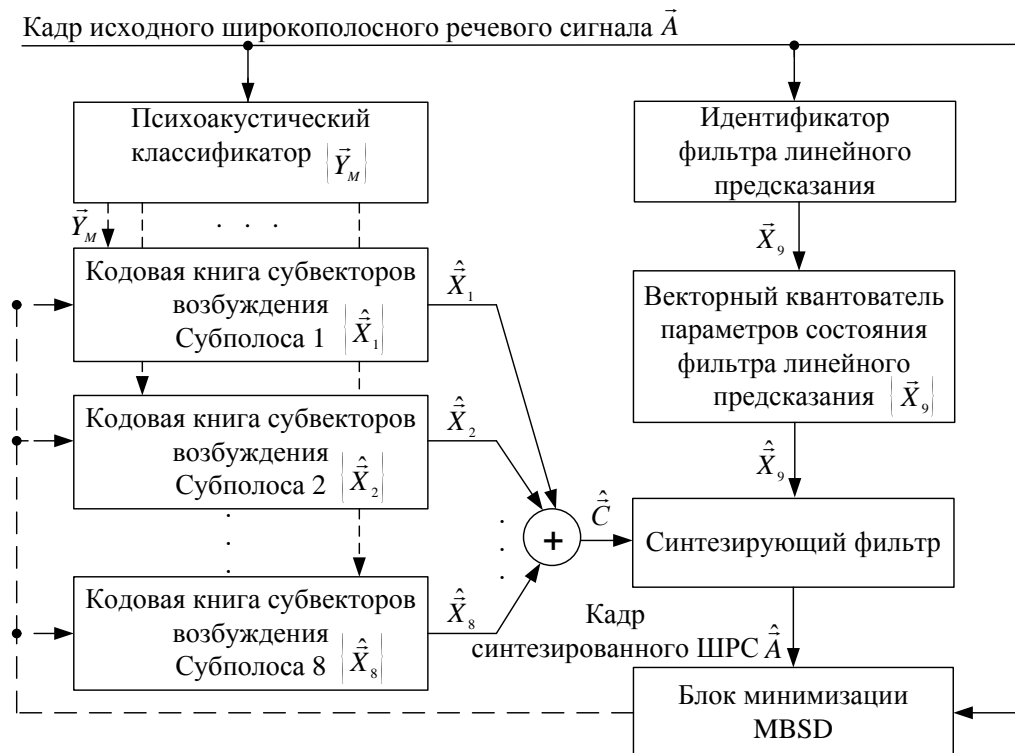


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема кодера широкополосного речевого сигнала

В состав КШРС входят следующие элементы:

- психоакустический классификатор (ПАК), разделяющий пространство анализируемых кадров ШРС  $\mathcal{A}$  на  $M$  непересекающихся классов на основе анализа распределения перцептуальной энтропии по критическим частотным полосам обрабатываемого сегмента. ПАК выбирает ту структуру кодирующего устройства из пространства состояний кодера  $\mathcal{K}_M$ , которая обеспечивает минимум меры искажений ШРС;
- набор кодовых книг субвекторов возбуждения, участвующих в процедуре анализа через синтез при поиске минимума меры искажений ШРС сигнала возбуждения  $\hat{C}$ ;
- устройства, определяющие состояние фильтра линейного предсказания (вектор коэффициентов линейного предсказания  $\hat{X}_9$ );
- синтезирующий фильтр для формирования кадра синтезированного ШРС  $\hat{A}$ ;
- блок минимизации модифицированного искажения спектра барков MBSD (Modified Bark Spectral Distortion), обеспечивающий выбор оптимальных параметров состояния фильтра линейного предсказания и сигнала возбуждения [6].

Необходимо отметить, что  $\mathcal{K}_M$  – пространство наблюдений кодируемых параметров, образованное объединением подмножеств параметров состояния фильтра линейного предсказания и параметров сигнала ошибки предсказания анализирующего фильтра (сигнала воз-

буждения) в субполосах анализируемого кадра ШРС. В общем случае множества  $X_i$ , при  $i = \overline{1,9}$  являются бесконечными, что обусловлено природой РС и свойствами используемого параметрического анализа. Степень выявления и использования существующих зависимостей внутри множеств в значительной мере определяет эффективность параметрического либерного кодирования ШРС тем или иным алгоритмом. Количество подмножеств субполосных векторов возбуждения было выбрано с целью отражения частотно зависимого поведения аудиторной системы человека и равно восьми [4, 5].

Практическая реализуемость предлагаемого КШРС требует, чтобы множество  $R_M$  было конечным, а его мощность определялась на основании компромисса между получаемым от оптимизации кодека выигрышем и необходимыми затратами информационных ресурсов на передачу информации о текущем состоянии кодера. В этих условиях алгоритм адаптации, допускающий несколько режимов работы кодека, соответствующих конечному числу непересекающихся классов характеристик кодируемых параметров текущего кадра ШРС, на основе учета особенностей восприятия РС аудиторной системой человека позволит достигнуть указанного компромисса. Указанная задача соответствует стандартной задаче многоальтернативного распознавания принадлежности наблюдаемого объекта  $\vec{A}$  из бесконечного множества  $A$  к одному из конечного фиксированного числа классов, описываемых одинаковым набором признаков. При этом различие между классами проявляется только в том, что у разных объектов (реализаций вектора  $\vec{A}$ ) одни и те же признаки имеют различные количественные характеристики, а различие будет определяться вектором, называемым межклассовым расстоянием и выражающим степень отличия у этих классов характеристик используемых признаков.

В предлагаемом КШРС критерием классификации кадров речи при функционировании ПАК служит распределение перцептуальной энтропии по критическим частотным полосам анализируемого сегмента ШРС. Процедура вычисления субполосной перцептуальной энтропии с помощью построения психоакустической модели, позволяющей рассчитать порог маскирования по критерию «шум маскирует тон» в частотной области, включает следующую последовательность действий [5, 7].

1) Сегмент исходного ШРС взвешивается временным окном и подвергается ДПФ.

2) В каждой критической полосе анализируемого сегмента ШРС рассчитывается энергия как сумма частотных компонент:

$$E_i = \sum_{k \in K_i} |X_k|^2, \quad (1)$$

где  $i = 1 \dots 8$  – номер критической частотной полосы;

$X_k$  – значение  $k$ -го частотного компонента;

$k$  – индекс частотного компонента (спектрального отсчета);

$K_i$  – количество частотных компонент, попадающих в  $i$ -ю критическую частотную полосу.

3) Рассчитывается функция распространения возбуждения по базилярной мембране для оценки эффектов маскирования:

$$SF_{i,j} = 10^{(15.81 + 7.5(x+0.474) - 17.5\sqrt{1+(x+0.474)^2})/10}, \quad (2)$$

где  $x = i - j$ ,  $i$  – номер барка маскируемого сигнала;

$j$  – номер барка маскирующего сигнала.

4) Вычисляется распространение спектральной энергии барка в каждой критической частотной полосе как свертка энергий критических частотных полос  $E_i$  с функцией распространения возбуждения по базилярной мембране  $SF_i$  для учета распространения маскирования:

$$C_i = E_i \cdot SF_i. \quad (3)$$

5) Рассчитываются коэффициенты тональности для каждой критической частотной полосы:

$$ton_i = \min \left( \frac{SFM_i}{SFM_{\max}} \right), \quad (4)$$

где  $SFM_i$  – мера спектральной пологости в  $i$ -ой критической частотной полосе, которая определяется как отношение среднего геометрического  $GM$  к среднему арифметическому  $AM$  спектральных компонент внутри критической полосы  $i$ :

$$SFM_i = 10 \log_{10} \left( \frac{GM}{AM} \right), \text{ [дБ];} \quad (5)$$

где  $SFM_{\max}$  – максимальное значение меры спектральной пологости, равное 60 дБ.

6) Определяются смещения порогов маскирования:

$$O_i = ton_i(14.5 + i) + (1 - ton_i)5.5, \text{ [дБ].} \quad (6)$$

7) Производится расчет порогов маскирования в критических полосах и их нормализация:

$$T_i = 10^{(\log_{10} C_i - O_i / 10)}. \quad (7)$$

Для нормализации требуется определить ошибку распространения спектральной энергии барка. Для этого предполагается, что на слуховую систему воздействует гипотетический раздражитель, спектральная энергия которого в критической частотной полосе равна единице

$$C'_i = SF_i \cdot 1. \quad (8)$$

Нормализованные пороги маскирования определяются так:

$$T'_i = T_i - 10 \log_{10}(C'_i). \quad (9)$$

8) Рассчитываются окончательные значения порогов маскирования:

$$T_{if} = \max(C'_i, ATH(f)), \quad (10)$$

где  $ATH(f)$  – функция, аппроксимирующая значение абсолютного порога слышимости и рассчитываемая с помощью следующего выражения:

$$ATH(f) = 3.64 f^{-0.8} - 6.5 e^{-0.6(f-3.3)^2} + 10^{-3} f^4, \quad (11)$$

где  $f$  – частота в кГц.

9) По вычисленным значениям энергий критической частотной полосы и порога маскирования осуществляется определение субполосной перцептуальной энтропии:

$$SPE_i = \log_2 \left( \frac{E_i}{\sqrt{\frac{6 \cdot T_{if}}{H_i}}} + 1 \right), \text{ [бит/полосу]} \quad (12)$$

где  $H_i$  – ширина  $i$ -ой критической частотной полосы в спектральных отсчетах.

За счет использования апостериорных данных о перцептуальной энтропии критических частотных полос анализируемого сегмента ШРС, полученных в результате функционирования психоакустического классификатора, разделяющего пространство анализируемых кадров ШРС  $\mathcal{A}$  на  $M$  непересекающихся классов, появляется возможность динамического перераспределения выделенных информационных ресурсов при постоянстве структуры признакового пространства кодера.

Учет особенностей восприятия речи аудиторной системой человека позволяет повысить качество синтезированного ШРС по показателям естественности его звучания и узнаваемости говорящего при сохранении разборчивости речи, а применение двухконтурной адаптации (первый контур производит оптимизацию структуры кодирующего устройства, второй – оптимизацию передаваемых параметров для выбранной структуры) обеспечивает повышение эффективности функционирования КШРС.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дрейзин, В.Э. Основные проблемы и перспективные направления цифрового кодирования речевых сигналов / В. Э. Дрейзин, С. П. Николаенко. Телекоммуникации. 2004. №4. – С.14–18.
2. Рыболовлев, А. А. Объективные основы повышения естественности (натуральности) синтезированной речи при расширении полосы частот речевого сигнала до диапазона 50–7000 Гц / А. А. Рыболовлев, М. В. Илюшин. Доклады 11-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применения», Москва, 2009. - С. 234–237.
3. Илюшин, М. В. Использование методов психоакустического кодирования звукового сигнала в задаче построения эффективных речепреобразующих устройств / М. В. Илюшин, А. А. Рыболовлев. Материалы 34-й Всероссийской научно-технической конференции "Информационные и телекоммуникационные технологии. Подготовка специалистов для инфокоммуникационной среды". Часть 1. – РВВКУС, 2009. – С. 263-265.
4. Цвикер, Э. Ухо как приемник информации / Э. Цвикер, Р. Фельдкеллер. Перевод с немецкого под редакцией Б. Г. Белкина. – М.: Связь, 1971. – 255 с. : ил.
5. Лившиц, М. З. Широкополосный CELP – кодер с мультиполосным возбуждением и многоуровневым векторным квантованием по кодовой книге с реконфигурируемой структурой / М. З. Лившиц, М. Парфенюк, А. А. Петровский. Цифровая обработка сигналов, № 2, 2005. – С. 20–35.
6. Yang, W. Enhanced Modified Bark Spectral Distortion (EMBSD): An Objective Speech Quality Measure Based On Audible Distortion And Cognition Model / A Dissertation of the Requirement for the Degree Doctor of Philosophy – May, 1999.
7. Johnston, J. D. Transform coding of audio signals using perceptual noise criteria, IEEE J. Selected Areas in Comm., vol. 6, pp. 314-323, Feb. 1988.

**Илюшин Михаил Владимирович**

Академия ФСО России, г. Орел  
Аспирант  
Тел. (4862) 41-99-47  
E-mail: mike.ilushin@gmail.com

**Афанасьев Андрей Алексеевич**

Академия ФСО России, г. Орел  
Старший научный сотрудник  
Тел. (4862) 41-99-47  
E-mail: andreyska@mail.ru

**Басов Олег Олегович**

Академия ФСО России, г. Орел  
Преподаватель  
Тел. (4862) 41-99-47  
E-mail: oobasov@rambler.ru

Д. П. САННИКОВ

## РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ

*Для расширения динамического диапазона фотоэлектронных умножителей, применяемых в составе хроматографов, предлагается стабилизировать напряжение между динодами схемой автоматической компенсации фототока и регулировать чувствительность приборов изменением напряжения на катоде.*

**Ключевые слова:** фотоэлектронный умножитель, световая характеристика, регулятор тока.

*To expand the dynamic range of photoelectronic multipliers applied in chromatograph it is suggested to stabilize voltage between dynodes using the scheme of automatic compensation of a photocurrent and to regulate devices sensitivity changing voltage on the cathode.*

**Key words:** photoelectronic multiplier, light characteristic, current regulator.

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) широко применяются в современных газовых и жидкостных хроматографах и масс-спектрометрах для экологического мониторинга и экспрессного анализа качественного и количественного состава различных органических веществ. Современные ФЭУ обладают высокой интегральной чувствительностью, которая в тысячи раз превышает чувствительность полупроводниковых фотодатчиков излучения.

Многокаскадные ФЭУ позволяют получить коэффициент усиления тока до десятков миллионов при очень малом темновом токе, не превышающем десятков наноампер [1]. Однако линейный участок световой характеристики ФЭУ не превышает трех-четырёх порядков, чем ограничивается динамический диапазон приборов фотоэлектрического контроля.

Чтобы оценить возможность построения широкодиапазонных ФЭУ, нужно рассмотреть особенности работы данных устройств. Согласно принципу действия ФЭУ, световой поток  $\Phi$  вызывает эмиссию электронов из фотокатода. Полученные фотоэлектроны ускоряются электрическим полем и попадают на первый динод, имеющий положительный потенциал относительно катода, и в результате вторичной электронной эмиссии из него выбиваются электроны, число которых в  $K \approx 6 \dots 8$  раз превышает количество первичных фотоэлектронов. Аналогичное увеличение количества электронов обеспечивается на всех последующих динодах ФЭУ, имеющих более высокие электрические потенциалы, и в результате такого усиления на анод ФЭУ поступает ток, значительно превышающий фототок  $I_{\Phi 1}$  первого динода.

Например, в ФЭУ, содержащем  $N = 10$  динодов, можно получить анодный ток, составляющий  $I_{\Phi N} \approx K^N I_{\Phi 1} \approx 3 \cdot 10^8 I_{\Phi 1}$ , или коэффициент усиления фототока  $K^N \approx 3 \cdot 10^8$ .

В типовой схеме включения многоступенчатого фотоэлектронного умножителя, приведенной на рисунке 1, для получения разных напряжений на динодах используют резистивный делитель на одинаковых резисторах  $R_1 = R_2 = \dots = R_{N+1} = R$ , подключенный к катоду ФЭУ. Выходное напряжение, пропорциональное фототоку  $U_{\text{ВЫХ}} = I_{\Phi N} \cdot R_H$ , снимается с резистора нагрузки  $R_H$ , подключенного к аноду. При отсутствии светового потока через резисторы  $R_1, \dots, R_{N+1}$  в этой схеме протекает постоянный ток  $I_D$ , который устанавливают больше максимального значения фототока по условию  $I_D \gg I_{\Phi N}$ . При появлении исследуемого светового потока  $\Phi$  через резисторы  $R_1, \dots, R_N$  начинает протекать суммарный ток  $I_{\Sigma} = I_D + I_{\Phi N}$ , потребляемый от высоковольтного источника отрицательного напряжения питания  $-U_K$ , подключенного к катоду ФЭУ. В то же время через последний резистор  $R_{N+1}$  течет только постоянный ток делителя  $I_D$ , так как весь фототок  $I_{\Phi N}$  от последнего динода поступает непосредственно на анод ФЭУ и преобразуется в выходное напряжение резистором  $R_H$ .

Поэтому падение напряжения на резисторе  $R_{N+1}$  уменьшается относительно начального значения  $U_{N+1} = I_D \cdot R_{N+1}$  на величину  $\Delta U_{N+1} = I_{\Phi N} \cdot N \cdot R$  вследствие протекания контролируемого фототока  $I_{\Phi N}$  через резисторы  $R_1, \dots, R_N$ .

Это приводит к уменьшению напряжения между последним диодом и анодом ФЭУ и, как следствие, к уменьшению крутизны световой характеристики и ослаблению интегральной чувствительности ФЭУ при повышении интенсивности оптического излучения.

Практически уменьшение напряжения  $U_{N+1}$  на резисторе  $R_{N+1}$  и одновременное возрастание напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  на сопротивлении нагрузки  $R_H$  ограничивает динамический диапазон фотоэлектрических приборов контроля на максимальном уровне  $10^3 \dots 10^4$ .

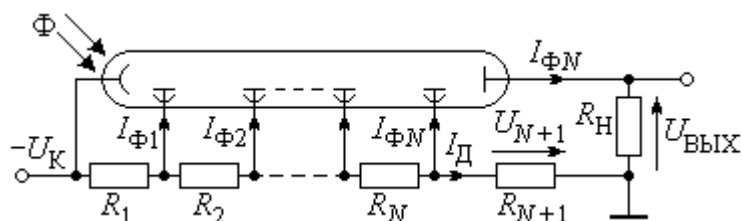


Рисунок 1 – Типовая схема подключения ФЭУ к источнику напряжения питания

Для повышения линейности световой характеристики ФЭУ нужно увеличивать ток  $I_D$ , протекающий через резистивный делитель. Однако уменьшение резисторов  $R_1, \dots, R_{N+1}$  приводит к их дополнительному нагреву из-за повышения мощности рассеяния и, как следствие, к увеличению температурной нестабильности напряжения питания ФЭУ.

При постоянном значении напряжения на катоде ФЭУ ( $U_K = \text{const}$ ) вместо этих резисторов иногда используются стабилитроны с малым дифференциальным сопротивлением, однако такой способ неприемлем в устройствах с регулируемым напряжением  $U_K$  на катоде.

В случаях измерения импульсного оптического излучения можно шунтировать резисторы  $R_1, \dots, R_{N+1}$  высоковольтными конденсаторами для уменьшения их сопротивления на переменном токе, но такой способ имеет ограниченное применение.

Для уменьшения влияния фототока на стабильность напряжения между последним диодом и анодом ФЭУ целесообразно использовать схему регулятора на высоковольтном транзисторе  $VT$ , подключенном параллельно резистору  $R_{N+1}$ . При расчете такого регулятора нужно учитывать, что напряжение между диодами ФЭУ может превышать 100 В, поэтому для получения небольшого сигнала обратной связи целесообразно разделить резистор  $R_{N+1}$  на две части, т. е. использовать в схеме дополнительный резистор  $R_{N+2} \ll R_{N+1}$ .

Кроме того, для управления регулирующим транзистором в этой схеме лучше всего применять дифференциальный усилитель, выделяющий разность между падением напряжения на резисторе  $R_{N+2}$  и опорным напряжением, для формирования которого можно использовать либо стабилитрон, либо цифро-аналоговый преобразователь.

Для нормальной работы такого стабилизатора параллельного типа необходимо обеспечить протекание коллекторного тока через регулирующий транзистор  $VT$  даже при отсутствии фототока на входе ФЭУ. Вследствие этого общее сопротивление резисторов  $R_{N+1} + R_{N+2}$ , подключенных к последнему диоду ФЭУ, нужно устанавливать больше каждого из сопротивлений между другими диодами ФЭУ, по условию  $R_{N+1} + R_{N+2} > R_N$ . При выполнении неравенства  $R_{N+1} + R_{N+2} > 2R_N$  половина постоянного тока делителя  $I_D$  будет протекать через резисторы  $R_{N+1}$ ,  $R_{N+2}$ , а вторая половина этого тока – через регулирующий транзистор. Дальнейшее увеличение номиналов этих резисторов позволяет расширить диапазон компенсации влияния фототока на напряжение между последним диодом и анодом ФЭУ.

Для оценки качества стабилизации напряжения на последнем диноде ФЭУ проведено схемотехническое моделирование стабилизатора с регулирующим транзистором по программе *Electronics Work Bench* [2]. При моделировании в качестве исходных данных задавался номинальный ток делителя  $I_D = 1$  мА при трех значениях напряжения  $U_K = 400, 1000$  и  $1500$  В.

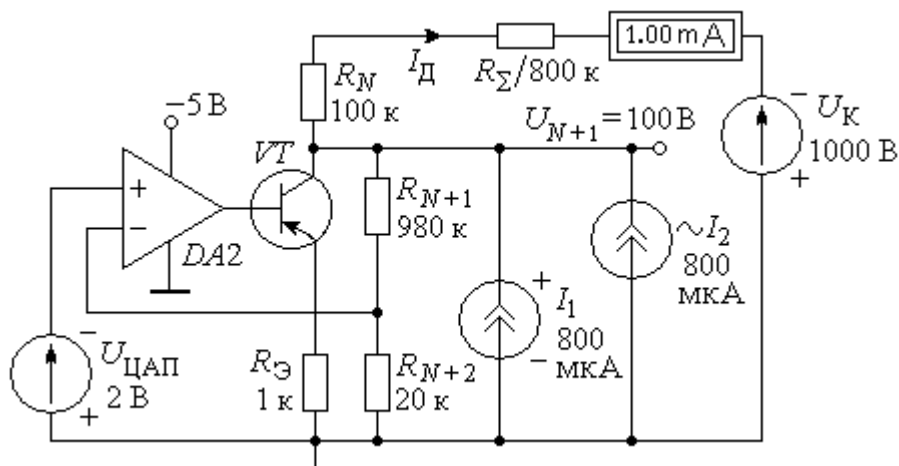


Рисунок 2 – Модель схемы стабилизатора напряжения

В исследуемой схеме стабилизатора, показанной на рисунке 2, общее сопротивление резисторов  $R_{N+1} + R_{N+2} = 10R_N$  выбрано на порядок больше других сопротивлений схемы ФЭУ, поэтому в исходном состоянии 90% тока  $I_D$  протекает через регулирующий транзистор. Двумя генераторами постоянного и переменного тока смоделировано влияние фототока  $I_{ФN} = I_1 + I_2$  и его изменение в диапазоне от 0 до 1,6 мА. При выбранных номиналах резисторов  $R_{N+1}, R_{N+2}$  расчетное напряжение между последним динодом и анодом ФЭУ составляет  $U_{N+1} = 100$  В.

Стабилизация напряжения между последним динодом и анодом ФЭУ обеспечивается за счет применения дифференциального усилителя *DA*, управляющего транзистором *VT* с токоограничивающим резистором  $R_Э$  в цепи эмиттера (рисунок 3). Усилителем *DA2* выделяется и усиливается в разность между выходным напряжением  $U_{ЦАП}$  цифроаналогового преобразователя и напряжением обратной связи, снимаемым с резистора  $R_{N+2}$ .

Согласно полученным результатам моделирования, увеличение тока на 1,6 мА приводит к изменению напряжения на диноде всего на  $\Delta U_{N+1} \leq 2$  мВ, т. е. относительная погрешность стабилизации этого напряжения составляет менее чем  $\delta = 100 \cdot \Delta U_{N+1} / U_{N+1} \leq 0,002\%$ . Изменением опорного напряжения в диапазоне  $U_{ЦАП} = (0,8 \dots 3,2)$  В можно стабилизировать напряжение на катоде ФЭУ в диапазоне  $U_K = (400 \dots 1600)$  В независимо от уровня фототока.

Следовательно, предложенная схема стабилизатора позволяет практически полностью исключить влияние фототока на стабильность напряжения между динодами ФЭУ и тем самым повысить линейность световой характеристики аппаратуры фотоэлектрического контроля.

При разработке широкодиапазонного ФЭУ необходимо учитывать две основные характеристики, а именно: световую характеристику и зависимость интегральной чувствительности ФЭУ от его напряжения питания.

Согласно типовому графику относительной световой характеристики ФЭУ, приведенной на рисунке 3, *a*, линейность фотоэлектрического преобразования можно практически обеспечить только в 1000-кратном динамическом диапазоне. Этот диапазон снизу ограничен уровнем темнового тока ФЭУ, а сверху – уменьшением напряжения  $U_{N+1}$  между последним динодом и анодом ФЭУ при больших значениях фототока  $I_{ФN}$  и одновременным повышением выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  на резисторе нагрузки  $R_H$ .

В то же время интегральная чувствительность и коэффициент усиления фототока существенно зависят от напряжения питания ФЭУ, и его четырехкратное увеличение позволяет повысить чувствительность ФЭУ примерно на четыре порядка (рисунок 3, б) [2].

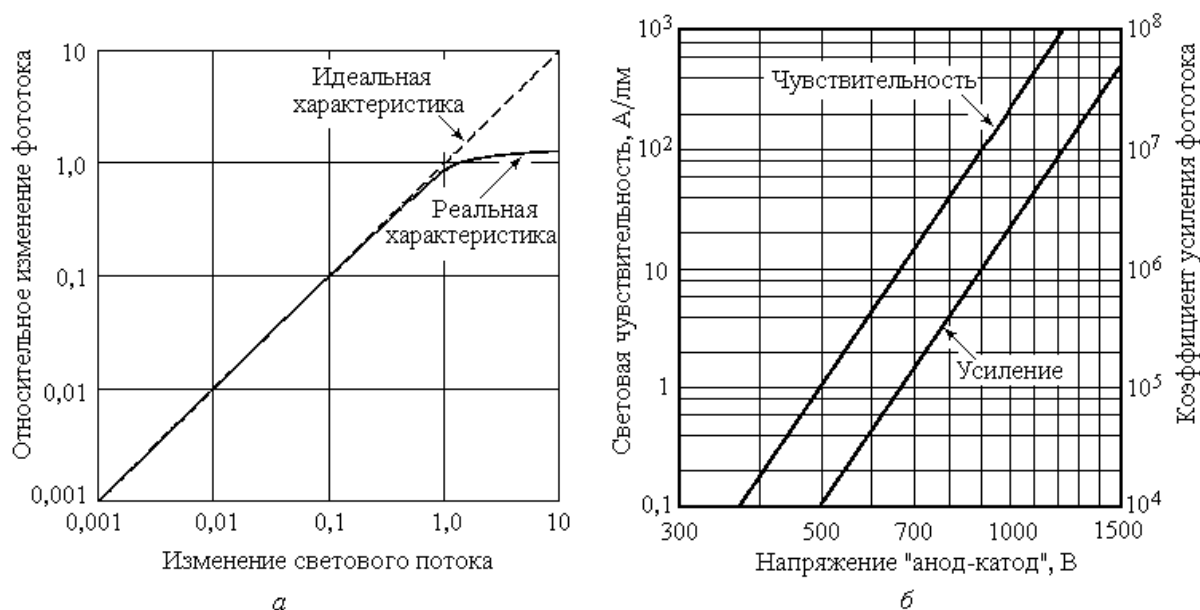


Рисунок 3 – Графики световой характеристики (а) и световой чувствительности ФЭУ (б)

Следовательно, применяя автоматическую регулировку напряжения питания ФЭУ в зависимости от уровня выходного фототока  $I_{ФН}$  или выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  можно значительно – на два-три порядка – расширить динамический диапазон приборов контроля. Такое техническое решение позволяет повысить универсальность применения жидкостных хроматографов и использовать их как для контроля веществ как с малым коэффициентом оптического поглощения (при небольшом напряжении питания ФЭУ порядка  $U_K \approx 400$  В), так и жидкостей с большой оптической плотностью (при повышении напряжения на катоде ФЭУ до уровня  $U_K \geq 1500$  В). Регулировать напряжение питания ФЭУ  $U_K$  можно с помощью микропроцессора, управляющего цифроаналоговым преобразователем.

Для ослабления влияния сопротивления нагрузки на линейность световой характеристики ФЭУ вместо резистора  $R_H$  можно использовать преобразователь тока в напряжение на дифференциальном усилителе с сопротивлением в цепи отрицательной обратной связи.

В современных цифровых приборах экспресс контроля газообразных и жидких веществ в качестве регулируемых источников высоковольтного напряжения ФЭУ используют стабилизаторы с широтно-импульсным преобразованием. Выходное напряжение ШИМ стабилизаторов также можно регулировать путем изменения уровня опорного напряжения, формируемого с помощью цифроаналогового преобразователя, управляемого командами микропроцессора или с клавиатуры прибора.

Совместное применение трех схемотехнических решений – регулируемого по командам микропроцессора широтно-импульсного стабилизатора высоковольтного напряжения питания ФЭУ, управляемого стабилизатора напряжения между последним диодом и анодом ФЭУ и установка усилителя с резистором в цепи обратной связи для преобразования фототока в напряжение – позволяют значительно расширить динамический диапазон работы.

Разработка регулируемого источника питания с широтно-импульсной модуляцией не представляет технической сложности, так как для этой цели можно использовать стандартную микросхему ШИМ, например КР1114ЕУ4, управляющую силовыми ключами. При этом достаточно использовать один цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) как для формирования опорного напряжения на входе ШИМ стабилизатора, так и для управления регулирующим транзистором в схеме компенсации влияния фототока на напряжение питания ФЭУ.

Структурная схема широкодиапазонного прибора фотоэлектрического контроля с управляемым стабилизатором высоковольтного напряжения ФЭУ приведена на рисунке 4.

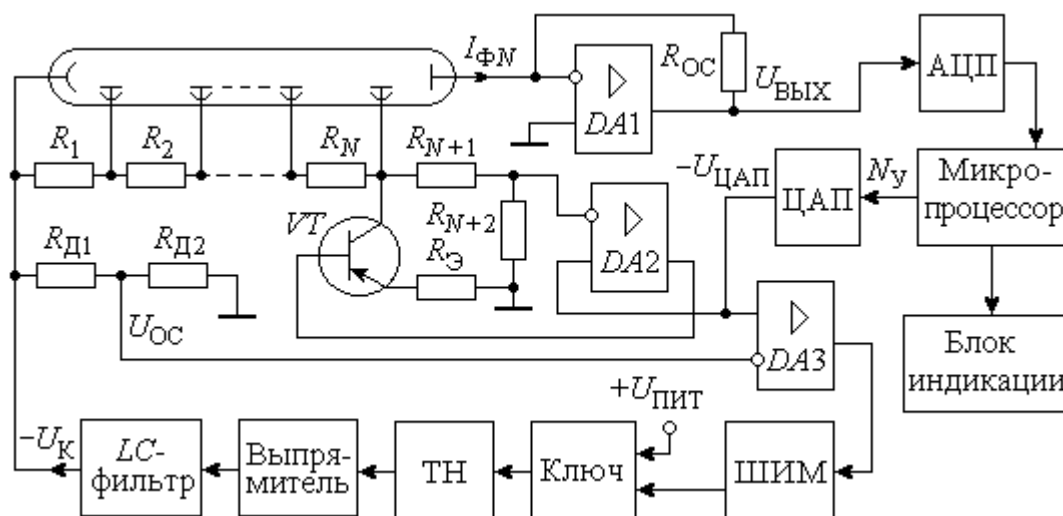


Рисунок 4 – Структурная схема ФЭУ с регулируемым источником напряжения питания

В этой схеме к аноду ФЭУ подключен усилитель  $DA1$  с резистором  $R_{OC}$  в цепи обратной связи, выходное напряжение которого  $U_{ВЫХ} = I_{ФN} \cdot R_{OC}$  определяется фототоком  $I_{ФN}$ . При использовании усилителя  $DA1$  с большим коэффициентом усиления  $K_{U1} \geq 10^4$  эквивалентное сопротивление нагрузки ФЭУ  $R_{НЭ} = R_{OC} / K_{U1}$  становится пренебрежимо малым, поэтому напряжение на аноде ФЭУ остается постоянным и не зависит от уровня фототока.

Высоковольтное напряжение на катоде ФЭУ задается цифровым кодом  $N_y$ , поступающим от микропроцессора на ЦАП. Выходное напряжение  $U_{ЦАП}$  сравнивается усилителем  $DA3$  с напряжением обратной связи  $U_{OC}$ , которое пропорционально напряжению  $U_K$  питания ФЭУ и снимается с резистивного делителя напряжения  $R_{D1}, R_{D2}$ . Сигнал с выхода усилителя  $DA3$  поступает на широтно-импульсный модулятор ШИМ, управляющий силовым ключом, подключенным к трансформатору напряжения ТН для формирования высоковольтных импульсов. Из этих импульсов после выпрямления и фильтрации получается напряжение  $U_K$  на катоде ФЭУ. При этом обеспечивается высокий коэффициент стабилизации напряжения питания  $K_{СТ} \approx R_{D2} K_{U1} / (R_{D1} + R_{D2}) \geq 10^3$ , а абсолютная погрешность установки высоковольтного напряжения ФЭУ в диапазоне  $U_K \approx (400 \dots 1600)$  В не превышает значения  $\Delta U_K \leq 1$  В.

Анализ показал, что разработанная схема регулируемого питания позволяет расширить до  $10^6$  динамический диапазон ФЭУ при минимальных аппаратных затратах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат, 1995. – 352 с.
2. Карлашук, В.И. Программа EWB и ее применение / В.И. Карлашук. – М.: Солон-Р, 1999. – 506 с.
3. Применение фотоэлектронных умножителей [Электронный ресурс] / 2008. – Режим доступа: [www.yeint.ru](http://www.yeint.ru)

**Санников Дмитрий Петрович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Ассистент кафедры «Информационные системы»

Тел. (4862) 42-22-31

E-mail: [sdp@rekom.ru](mailto:sdp@rekom.ru)

## УМЕНЬШЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕЙРОСЕТИ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ РЕЧИ

*В данной статье рассмотрено решение задачи распознавания речевого сигнала с использованием иерархической динамической нейронной сети. Для уменьшения ее структурной сложности предложена функциональная схема устройства сокращения информационной избыточности речи. В статье представлен алгоритм исключения неинформативных параметров речевого сигнала, основанный на учете его статистических характеристик. Предлагаемое решение может быть использовано при построении систем верификации по голосу, функционирующих в реальном масштабе времени.*

**Ключевые слова:** система распознавания, иерархическая динамическая нейронная сеть, речевой сигнал, информационная избыточность речи, статистические характеристики.

*In given article the decision of a speech signal recognition problem with use of a hierarchical dynamic neural network is considered. For reduction of its structural complexity the function chart of the device of a speech information redundancy reduction is offered. In article the algorithm of a not informative parameters exception of the speech signal, based on the account of its statistical characteristics is presented. The offered decision can be used at construction of verification systems on a voice, functioning in real time.*

**Key words:** recognition system, hierarchical dynamic neural network, speech signal, information redundancy of speech, statistical characteristics.

В настоящее время наблюдается бурный рост интереса к системам распознавания абонентов по индивидуальным особенностям речи, основанных на нейронных сетях, позволяющих учитывать статистические характеристики речевых сигналов. Одной из важнейших проблем при создании таких систем является высокая сложность структуры нейросети, обусловленная изменяющимися во времени параметрами речевого сигнала.

Общим недостатком традиционных нейронных сетей является то, что их предварительное обучение требует больших вычислительных и временных затрат, что не всегда приводит к оптимальному результату [1]. Это связано, прежде всего, с большой размерностью пространства настраиваемых параметров сети (до  $10^6$ ) и рядом специфических трудностей, возникающих в процессе настройки ее оптимальных параметров. Так, помимо ловушек локального экстремума, алгоритмы обучения могут приводить сеть в состояния насыщения, коллапса и другие критические состояния, когда изменение параметров сети не приводит к дальнейшему уменьшению ошибки распознавания абонентов. Кроме того, дополнительное обучение нейронной сети часто приводит к разрушению ранее сформированных навыков, и потому иногда требуется повторное переобучение.

Трудности применения традиционных нейронных сетей в системах распознавания речи и автоматизированных системах с речевым управлением обусловлены спецификой динамической природы речевого сигнала и выражаются в том, что в процессе классификации сигнал должен быть нелинейно деформирован по шкале времени с целью нормализации длительностей его различных участков.

Попытки нормализовать длительность сигнала (т. е. учесть его динамику) при использовании стационарных нейронных сетей требуют нелинейной деформации пространства входов сети. Данная операция может быть осуществлена в несколько этапов на всех уровнях сети за счет введения в нейроподобные элементы дополнительных сигнальных входов, организующих временные задержки информации на требуемые интервалы времени [2]. Такое усложнение сети ведет, в свою очередь, к значительному увеличению времени обучения при использовании алгоритма обратного распространения.

Применение традиционных рекуррентных сетей аналогично введению в сеть механизма задержек и, как следствие, приводит к увеличению времени обработки данных.

Другим характерным недостатком традиционных нейронных сетей применительно к задаче распознавания речевых образов является отсутствие учета иерархической структуры речи, выражающейся в том, что более сложные образы формируются на основе более простых, соединяемых специфическими переходными участками. Использование словарей эталонов речевых единиц на нескольких уровнях, где каждый из элементов словаря представляется связями элементов более низкого уровня, очевидно, позволило бы формировать более гибкие и компактные представления таких эталонов.

Необходимость использования для распознавания речи именно динамических, а не стационарных нейронных сетей, становится очевидной и понятной, если принять во внимание тот факт, что процесс порождения речевого сигнала представляет собой сложный динамический процесс, реализуемый под управлением многих уровней нервной системы человека. Вследствие этого именно динамические нейронные сети, являясь универсальным средством для моделирования динамических систем на однородных вычислительных средах с массовым параллелизмом при обработке многоканальных данных, оказываются наиболее адекватными для практического решения задачи распознавания речи.

В силу указанных причин для реализации однородного представления речевых и языковых знаний на всех уровнях системы распознавания речевых сигналов предлагается использовать нетрадиционное построение нейросети – ее реализацию на принципе иерархической структуры, содержащей несколько отдельных и простых динамических нейронных сетей на основе нейроподобных элементов с временным суммированием получаемых на их выходах сигналов [3].

Основным элементом типовой динамической нейронной сети (ДНС) является нейроподобный элемент (НЭ), реализующий обработку  $n$ -членных фрагментов (так называемых  $n$ -грамм)  $\hat{a}_t = F(a_{t-n+1}, a_{t-n+2}, \dots, a_t)$  входной последовательности  $A = F(a_t)$  и моделирующий гиперсферу  $n$ -мерного сигнального пространства.

Обеспечить эффективное распознавание позволяет введение в ДНС механизма управления, реализующего функцию, подобную концентрации (локализации) и рассредоточению (генерализации) внимания, который называется механизмом управления (МУ). Идея работы МУ основана на использовании ранее распознанной информации для предсказания последующих данных и подстройки параметров ДНС (радиуса расфокусировки) под наилучшее распознавание ожидаемой на входе информации. Это выражается в постепенном увеличении радиусов расфокусировки НЭ в течение интервала времени, когда происходит непрерывное распознавание – вложение образа входной последовательности в одну из трубок траекторий эталона в сигнальной плоскости динамической нейронной сети.

Использовать способность динамических нейронных сетей к структурной обработке информации с максимальной эффективностью позволяет объединение отдельных нейронных сетей в иерархическую структуру, состоящую из нескольких уровней, в которой выходы ДНС нижних уровней соединены с входами ДНС верхних уровней.

Схема иерархической структуры ДНС приведена на рисунке 1.

Способность обученной ДНС к распознаванию входных последовательностей и их отдельных участков позволяет использовать ее для обнаружения неизвестной информации во входном потоке. В этом случае ДНС работает как фильтр, поглощая распознанные участки входных последовательностей и пропуская на выход только неизвестные участки. Таким образом, выход у обученной ДНС реализует фильтрующее преобразование  $Y_f$  через заданный или составленный по итогам обучения словарь  $\hat{W}$  по отношению к информационному входу  $A = F(a_t)$ .



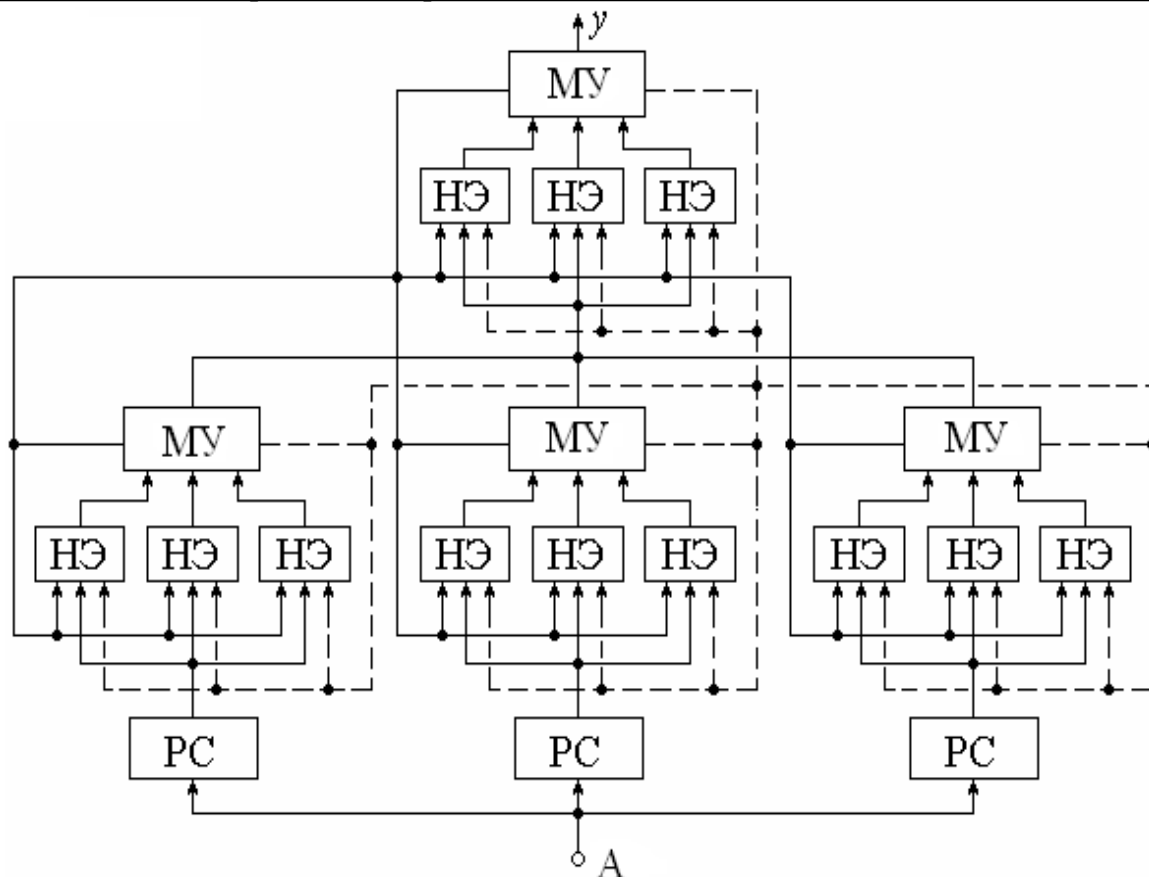


Рисунок 1 – Типовая структурная схема иерархической ДНС

В результате такого преобразования реализуется функция вида  $Y_f[W^{\wedge}, A] = F(y_t) = Y$ ,

$$\text{где } y_t = \begin{cases} y_i, \text{ если } \exists i: y_i \neq 0 \\ a_t, \text{ иначе} \end{cases},$$

что означает подачу на выход ДНС сигнала  $y$  из распознавшего НЭ  $w_i^{\wedge}$ , в случае, если такой существует, и пропуск на выход элемента  $a_t$  в противном случае.

Сформированное в иерархической структуре ДНС представление входной информации можно интерпретировать как многократно преобразованный суперграф. При этом реализуется иерархия связанных сетей нескольких уровней, состояния которых соответствуют составляющим элементам входной информации разной степени сложности. Одноуровневые связи между ними задают отношения ассоциативности, а межуровневые связи – отношения вхождения одних элементов в другие (более простых элементов в более сложные).

Одним из способов уменьшения структурной сложности иерархических динамических нейронных сетей, применяемой в системах идентификации личности по голосу, является сокращение информационной избыточности речевого сигнала на этапе запоминания его параметров в регистре сдвига. Аналогичный прием успешно используется в устройствах управления на нечеткой логике [4].

Сущность предлагаемого алгоритма заключается в том, что длительность произнесения гласных букв в большинстве слов значительно превышает интервал дискретизации речевого сигнала (10 – 30 мс) при кодировании его параметров. Вследствие этого значения коэффициентов или признаков речи в соседних кадрах преобразования могут незначительно отличаться друг от друга. Это дает возможность сократить общее количество кадров, используемых для идентификации абонентов по особенностям речевого сигнала, непосредственно в процессе запоминания параметров речи в регистрах сдвига, применяемых в составе динамической нейронной сети.

Принцип сокращения избыточности речи основан на сравнении двух последовательных кадров по совокупности признаков (коэффициентов) речевого сигнала в предыдущий ( $t_n$ ) и в последующий ( $t_{n+1}$ ) моменты времени. При этом в зависимости от значения разности параметров этих кадров запоминается либо предыдущий, либо последующий кадр речи.

Такие операции можно реализовать в цифровом устройстве, структурная схема которого показана на рисунке 2.

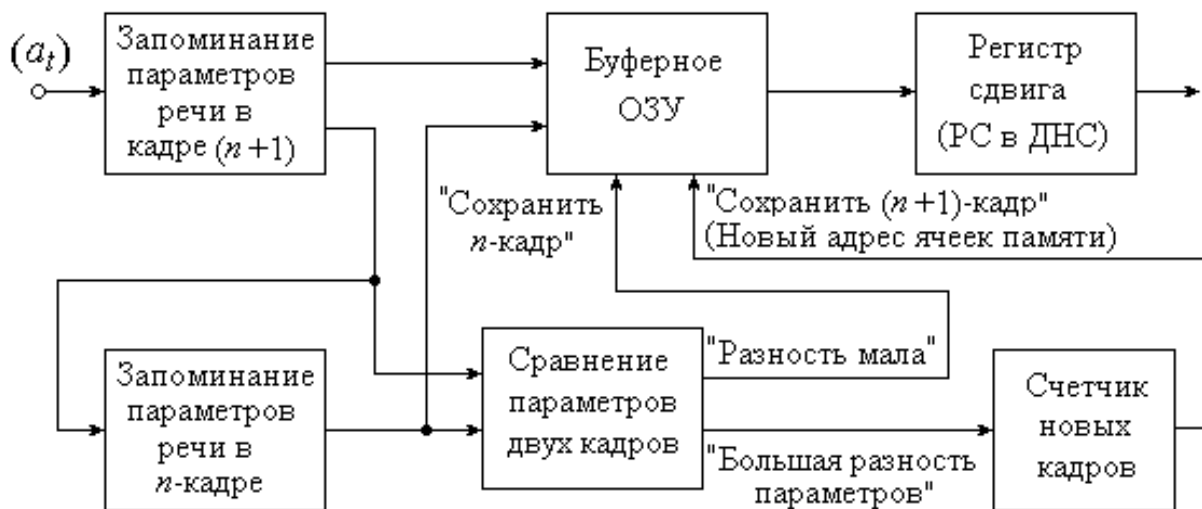


Рисунок 2 – Функциональная схема устройства сокращения информационной избыточности речевого сигнала

Процесс преобразования в данном устройстве (рисунок 2) выполняется за четыре такта. Сначала запоминаются параметры речевого сигнала в  $n$ -м кадре, затем – в  $(n+1)$ -м кадре, после чего схема сравнения вычисляет эквивалентную разность параметров в соседних кадрах. В качестве критериев для оценки разности параметров речи в двух кадрах могут использоваться либо изменение математического ожидания или суммы параметров, либо дисперсия их отклонения. В четвертом такте преобразования подается команда на буферное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), в соответствующие ячейки памяти которого записываются оцифрованные параметры речевого сигнала в  $n$ -м кадре (при малой разности параметров), либо запоминаются параметры речи в  $(n+1)$ -м кадре, если его характеристики существенно отличаются от предыдущего кадра.

Отличительной особенностью устройства сокращения избыточности речи является то, что запись информации в ОЗУ выполняется в каждом четвертом такте независимо от разности параметров в кадрах речи. Однако счетчик кадров, управляющий адресными входами ОЗУ, срабатывает по команде схемы сравнения, формируемой только при большой разности параметров соседних кадров. При одинаковых или близких информативных параметрах речевого сигнала их запись выполняется в одни и те же ячейки памяти ОЗУ (без смены адреса), чем обеспечивается сокращение информативной избыточности речи.

После окончания произнесения ключевых фраз или предложений при распознавании личности по речевым признакам зафиксированные в ОЗУ параметры вводятся в регистр сдвига, применяемый в составе иерархической ДНС, для последующего выполнения процесса идентификации или аутентификации.

Использование рассмотренного и сравнительно простого устройства (рисунок 2) позволяет как минимум в два раза уменьшить объем информации при распознавании речи, вследствие чего примерно в четыре раза уменьшается объем вычислений [5], при этом сокращается время распознавания речи при идентификации личности, а также имеется реальная возможность сократить общее число применяемых НЭ в иерархической ДНС.

Алгоритм функционирования данного устройства представлен на рисунке 3.

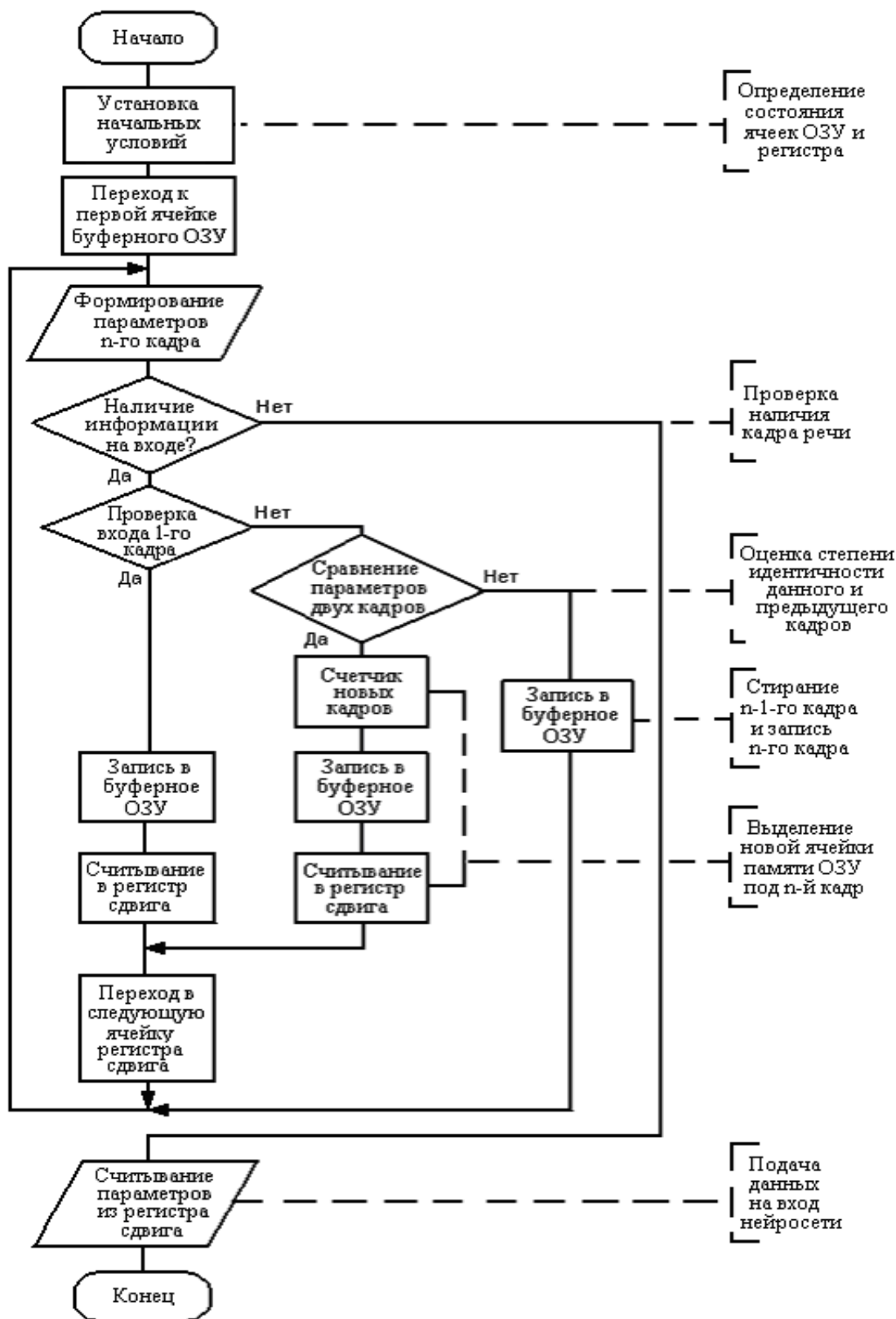


Рисунок 3 – Алгоритм исключения неинформативных параметров речевого сигнала

Основные функциональные преобразования речевых сигналов, реализуемые данным алгоритмом, приведены на рисунке 3 и не требуют дополнительных пояснений. Практически выполнение последовательности вычислительных операций по данному алгоритму при работе динамической нейронной сети позволяет значительно минимизировать аппаратные затраты на построение реальных систем разграничения доступа абонентов к ресурсам распределенных информационно-телекоммуникационных систем.

Таким образом, для реализации процедуры распознавания речи наиболее перспективно использование динамической нейронной сети, сочетающей в себе преимущества традиционных нейросетей с возможностью отслеживания динамического характера речевого сигнала. Объединение простых динамических нейронных сетей в иерархические структуры позволяет с максимальной эффективностью использовать способность таких систем к эффективной обработке речевой информации при их реализации аппаратно-программным способом или в виде специализированных нейрочипов, обеспечивающих работу в реальном масштабе времени. При этом использование предложенного устройства позволяет значительно уменьшить информативную избыточность речевых сигналов при одновременном ослаблении влияния темпа произнесения речи на надежность распознавания абонентов в информационных системах с ограничением доступа к вычислительным ресурсам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галушкин, А.И. Нейрокомпьютеры. Книга 3 серии «Нейрокомпьютеры и их применение» / А.И. Галушкин. – М.: ИПРЖР, 2000.
2. Горбань, А.Н. Нейроинформатика / А.Н. Горбань, В.Л. Дунин-Барковский, А.Н. Кирдин, Е.М. Миркес, А.Ю. Новоходько, Д.А. Россиев, С.А. Терехов, М.Ю. Сенашова, В.Г. Царегородцев. – Новосибирск. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296 с.
3. Царегородцев, А.В. Современные технологии управления в человеко–машинных системах / А.В. Царегородцев. – М.: Радио и связь, 2002. – 184 с.
4. Бауер, П. Введение в нечеткую логику и системы нечеткого управления П. Бауер, С. Нотиак, Р. Винклер. – 1997.
5. Таха, Хэмди А. Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2007. – 912 с.

**Катков Олег Николаевич**

Академия ФСО России, г. Орел

Кандидат технических наук, преподаватель

Тел. 8-920-287-6218

E-mail: katkov\_orel@list.ru

Ю. Б. ИВАНОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМОЩНОГО СВЕТОЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Для уменьшения потребляемой мощности и повышения линейности преобразования оптического излучения в частоту предлагается применять в аппаратуре фотоэлектрического контроля цифровые КМОП микросхемы и интегратор фототока на микромощном усилителе с однополярным напряжением питания.*

**Ключевые слова:** светочастотный преобразователь, световая характеристика, фототок.

*For to reduction of power consumption and increase of linearity transformation of light in frequency it is offered to apply digital CMOS microcircuits and the integrator of a photocurrent on the micropowerful amplifier with a unipolar pressure a feed in the equipment of the photo-electric control.*

**Keywords:** the lightfrequency converter, the light characteristic, a photocurrent.

Фотодиодные преобразователи оптического излучения в частоту импульсов напряжения широко применяются в современных приборах фотоэлектрического контроля запыленности и задымленности воздуха, а также в хроматографах и масс-спектрометрах для экологического мониторинга и экспрессного анализа состава различных органических веществ. Применение предварительного светочастотного преобразования позволяет значительно повысить помехоустойчивость и упростить построение цифровой аппаратуры фотоэлектрического контроля, так как кодирование частотного сигнала и вывод результатов измерений на цифровое табло можно реализовать на одной микросхеме микроконтроллера.

Кроме типовых требований к линейности световой характеристики и стабильности получаемых результатов в современных приборах с автономным питанием необходимо принимать меры для уменьшения потребляемой мощности, чтобы повысить время работы приборов без замены элементов питания и тем самым увеличить универсальность их применения. Одним из способов, применяемых для понижения потребляемой мощности, является применение комплементарных (КМОП) микросхем с малым напряжением питания и микромошных усилителей с регулируемым током питания [1].

Уменьшение тока питания до десятков микроампер позволяет не только увеличить время автономной работы приборов контроля, но и повысить температурную стабильность светочастотных преобразователей за счет исключения дополнительного нагрева применяемых микросхем собственной мощностью рассеяния. Кроме того, снижение тока питания позволяет уменьшить до единиц наноампер входные токи микромошных операционных усилителей и тем самым повысить чувствительность приборов фотоэлектрического контроля.

Чтобы оценить возможность построения микромошных преобразователей оптического излучения в частоту, нужно рассмотреть особенности работы таких устройств. Согласно принципу светочастотного преобразования, для формирования выходных импульсов нужно выполнять интегрирование фототока, получаемого от фотодиода при его освещении оптическим излучением, сравнивать компаратором выходное напряжение интегратора с пороговым уровнем и затем выполнять разряд интегратора. В большинстве частотных преобразователей для разряда интегратора используют либо дополнительный источник опорного напряжения, либо параллельно интегрирующему конденсатору устанавливают электронный ключ для быстрого разряда этого конденсатора в конце каждого такта частотного преобразования.

Применение нескольких аналоговых элементов (интегратора, источника опорного напряжения и компаратора) ограничивает предел уменьшения потребляемой мощности на минимальном уровне порядка десятки милливатт. В то же время целесообразно снижать эту мощность до значений в сотни микроватт, чтобы обеспечить работу аппаратуры контроля с

автономным питанием в течение одного года без замены гальванических элементов или без повторного заряда малогабаритных аккумуляторных батарей.

Например, при эксплуатации автономного прибора фотоэлектрического контроля в одну смену (по 40 часов в неделю) время его работы в течение года составит  $T_{РАБ} \approx 2000$  ч. Следовательно, при типовой энергоемкости малогабаритных аккумуляторов  $W \approx 0,5$  А·ч ток питания прибора не должен превышать значения  $I_{ПИТ} \approx W/T_{РАБ} \leq 250$  мкА.

Для уменьшения энергопотребления светочастотных преобразователей можно использовать измеряемый фототок не только для заряда, но и для разряда интегрирующего конденсатора, если переключать полярность фотодиода на входе интегратора. Кроме того, для упрощения схемы и уменьшения потребляемой мощности вместо аналогового компаратора лучше всего применять триггер Шмитта на КМОП логической микросхеме, и подавать однополярное напряжение питания  $U_{ПИТ}$  на операционный усилитель в схеме интегратора.

С учетом этих условий разработан микромощный светочастотный преобразователь, упрощенная схема которого приведена на рисунке 1. В этом устройстве для преобразования оптического излучения  $\Phi$  в электрический сигнал используется фотодиод  $VD$  типа ФД-24К, который через двухканальный переключатель  $D1$  на мультиплексоре типа КР1564КП1 подключается к входу интегратора  $D2$  на микромощном операционном усилителе КР140УД12, входные токи которого составляют  $I_{ВХ} \leq 5$  нА [1]. Для задания минимального тока питания микромощного усилителя на уровне  $I_{ПИТ} \approx 15$  мкА служит резистор  $R_6 = 3$  МОм. Триггер Шмитта собран на одном элементе  $D3$  микросхемы типа КР1564ЛП2 с резисторами  $R_4$  и  $R_5$  в цепи положительной обратной связи. Второй логический элемент  $D4$  этой же микросхемы выполняет функцию логического повторителя, чтобы исключить влияние входной емкости цифровой части прибора на коэффициент светочастотного преобразования.

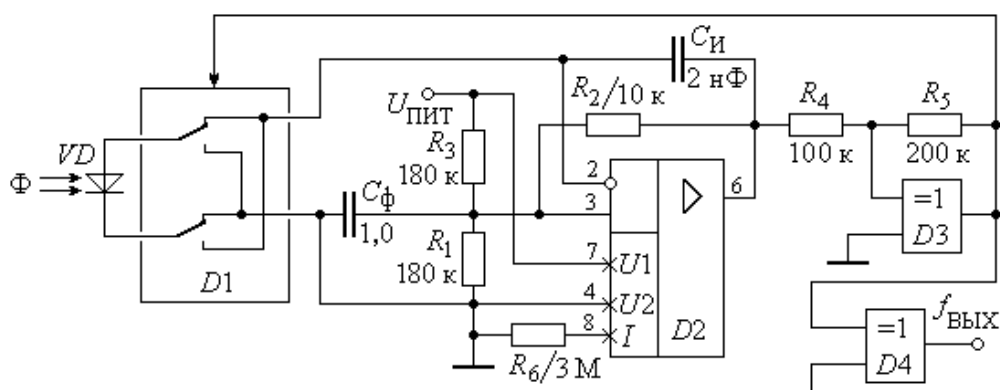


Рисунок 1 – Принципиальная схема преобразователя фототока в частоту импульсов

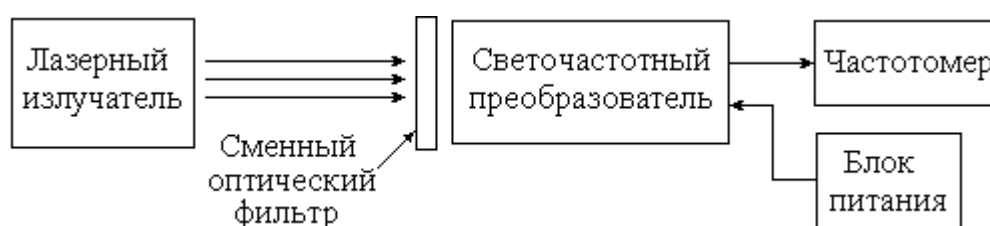
Применение цифровых КМОП микросхем серии КР1564 и микромощного операционного усилителя с однополярным напряжением питания позволяет значительно уменьшить потребляемую мощность светочастотного преобразователя. Экспериментально установлено, что при стабилизированном напряжении питания  $U_{ПИТ} = 5$  В среднее значение тока, потребляемого данным устройством, составляет не более  $I_{ПИТ} = 80$  мкА при изменении частоты выходных импульсов в диапазоне от нуля до нескольких кГц.

При экспериментальной оценке параметров фотоприемников светового или лазерного излучения практически невозможно достоверно оценить линейность энергетической характеристики и погрешность фотоэлектрического преобразования из-за отсутствия высокоточных излучателей световых сигналов и оптических фильтров со строго нормируемым коэффициентом поглощения или коэффициентом пропускания оптического излучения. В отличие от цифровых электроизмерительных приборов, имеющих класс точности не хуже 0,1%, современные спектрофотометры, применяемые для калибровки аппаратуры фотоэлектрического контроля, характеризуются погрешностью преобразования не менее 0,5%.

Фактически реальная погрешность измерения оптических величин может быть еще больше, так как она существенно зависит от условий проведения измерений и длины волны исследуемого оптического излучения.

Кроме того, даже при использовании лазерного монохроматического излучателя с фиксированной длиной световой волны точность фотоэлектрических измерений зависит от разброса коэффициентов поглощения оптических фильтров (прозрачных и цветных стекол), которые нормируют в лучшем случае с допуском  $\pm 1\%$  относительно номинальных значений. Вследствие этого нелинейность световой характеристики фотодатчиков можно оценить с минимальной инструментальной погрешностью, составляющей примерно  $\gamma_{НЛ} \approx (2...3)\%$ .

Экспериментальная оценка чувствительности и линейности световой характеристики проводилась с помощью набора калиброванных нейтральных фильтров с нормированными коэффициентами оптического поглощения. Коэффициенты поглощения применяемых светофильтров предварительно калибровались на фотоэлектрическом колориметре КФК-2УХЛ-4.2, а затем устанавливались на оптической оси перпендикулярно потоку излучения (рисунок 2).



*Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для исследования нелинейности световой характеристики фотодатчиков*

При проведении экспериментальных исследований светочастотная характеристика устройства снималась следующим образом. Сначала измерялась начальная частота выходных импульсов  $f_{НАЧ}$  при закрытом оптическом входе фотодатчика, затем измерялась максимальная (номинальная) частота импульсов  $f_{НОМ}$  при его открытом оптическом входе, но без оптического ослабителя. После этого перед входом светочастотного преобразователя в специальную оправку вертикально устанавливались калиброванные светофильтры, каждый из которых имел индивидуально нормированный коэффициент оптического поглощения, указанный в паспорте для видимого диапазона световых волн (0,4...0,7 мкм). При проведении исследований использовался набор нейтральных фильтров со следующими номинальными коэффициентами оптического поглощения: 0,08; 0,12; 0,25; 0,32; 0,45; 0,60; 0,95.

Дополнительные промежуточные точки при снятии светочастотной характеристики определялись посредством одновременной установки перед фотодатчиком двух светофильтров.

Для измерения частоты выходных импульсов применялся цифровой частотомер типа ЧЗ-54, обеспечивающий высокую точность за счет применения кварцевого термостатированного генератора образцовой частоты  $f_0 = 10$  МГц. При измерении частоты выходных импульсов  $f_{ВЫХ} \geq 1$  кГц время измерения на частотомере выбиралось равным  $T_{ИЗМ1} = 1$  с, и увеличивалось в 10 раз – до значения  $T_{ИЗМ2} = 10$  с – в низкочастотном диапазоне при малых значениях частоты  $f_{ВЫХ} < 1000$  Гц. Это позволило уменьшить относительную погрешность дискретности цифрового частотомера до уровня [20]:  $\gamma_D \leq 100/f_{ВЫХ} T_{ИЗМ} \leq 0,1\%$ .

Параметры элементов в схеме светочастотного преобразователя (рисунок 1) устанавливались таким образом, чтобы показания цифрового частотомера, применяемого для измерения частоты  $f_{ВЫХ}$  выходных импульсов устройства, были прямо пропорциональны измеряемому фототоку на выходе фотодиода  $VD$  в соответствии с выражением [2]:

$$I_{Ф} \approx f_{ВЫХ} T_{ИЗМ} U_{ПИТ} R_2 C_{И} / (R_2 + 0,5 R_1) = N_{ВЫХ}, [нА].$$

Данная формула справедлива при установке зоны гистерезиса триггера Шмитта на элементе D3 в схеме светочастотного преобразователя (рисунок 1) равной половине напряжения питания устройства:  $\Delta U_{\Gamma} \approx U_{\text{ПИТ}} R_4 / R_5 = 5 \cdot 100 \cdot 10^3 / 200 \cdot 10^3 = 2,5 \text{ В}$ .

Применение в схеме фотодатчика (рисунок 1) высокоточных резисторов типа С2-29В с допуском 0,05% и интегрирующего конденсатора с номинальной емкостью  $C_{И1} = 2 \text{ нФ}$  позволяет реализовать прямое измерение фототока непосредственно по показаниям цифрового частотомера с размерностью "наноампер".

Экспериментально установлено, что при малых значениях фототока  $I_{\Phi}$ , не превышающих входного тока операционного усилителя  $I_{\Phi} \leq I_{\text{ВХ}} \approx 5 \text{ нА}$ , импульсы на выходе не формируются, так как интегрирующий конденсатор  $C_{И}$  не разряжается фототоком  $I_{\Phi}$ , поэтому темновой ток фотодиода  $VD$  не влияет на результат светочастотного преобразования.

Кроме того, установлено, при малом расстоянии между лазерным излучателем и фотодиодом ( $l = 0,5 \text{ м}$ ) частота выходных импульсов устройства превышает значение 10 кГц, что соответствует фототоку  $I_{\Phi} \geq 10 \text{ мкА}$ . Однако на этой и более высоких частотах значительно понижается коэффициент усиления микромощного усилителя КР140УД12, вследствие чего световая характеристика устройства становится нелинейной. Поэтому после предварительных экспериментов перед фотодиодом был установлен дополнительный светозащитный экран с отверстием прямоугольной формы с размерами  $2 \times 8 \text{ мм}$ , причем развернутый лазерный луч фокусировался параллельно короткой стороне этого отверстия. Такое техническое решение позволило понизить максимальную частоту выходных импульсов до уровня  $f_{\text{НОМ}} \approx 4 \text{ кГц}$ , соответствующего максимальному значению фототока  $I_{\Phi_{\text{max}}} \approx 4 \text{ мкА}$ . При таком значении фототока исследованы светочастотные характеристики устройства, графики которых приведены на рисунке 3. Чтобы оценить влияние инерционности микромощного операционного усилителя на частоту выходных импульсов устройства его исследования выполнялись при установке двух интегрирующих конденсаторов:  $C_{И1} = 2 \text{ нФ}$  и  $C_{И2} = 4 \text{ нФ}$ .

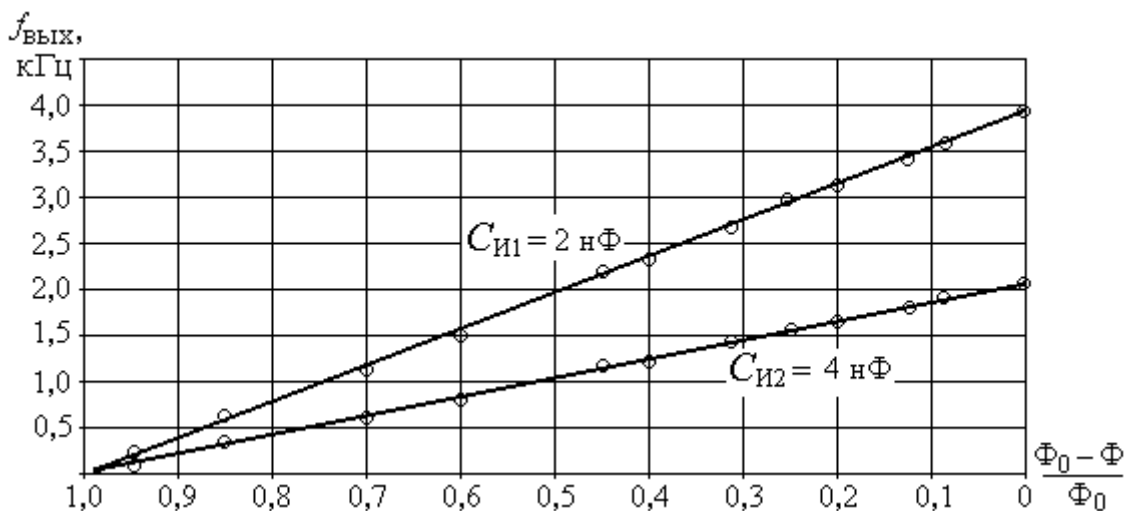


Рисунок 3 – Результаты исследований зависимости выходной частоты преобразователя от коэффициента ослабления светового потока

В результате исследований установлено, что инерционные свойства микромощного операционного усилителя практически не оказывают влияния на линейность характеристики преобразования, а приводят только к изменению ее наклона. Так, при использовании интегрирующего конденсатора  $C_{И2} = 4 \text{ нФ}$  максимальная частота выходных импульсов составляет  $f_{\text{ВЫХ1 max}} = 2,08 \text{ кГц}$ , а при двукратном уменьшении конденсатора  $C_{И1}$  частота составляет  $f_{\text{ВЫХ2 max}} = 3,94 \text{ кГц}$  при ее расчетном значении  $f_{\text{ВЫХ2 рас}} = 4,16 \text{ кГц}$ .



С учетом полученных результатов, запаздывание операционного усилителя приводит к мультипликативной погрешности светочастотного преобразования, составляющей

$$\gamma_M \leq 100(f_{\text{ВЫХ}2_{\text{рас}}} - f_{\text{ВЫХ}2_{\text{max}}}) / f_{\text{ВЫХ}2_{\text{рас}}} \leq 5\%.$$

Данная мультипликативная составляющая погрешности преобразования может быть скомпенсирована либо уменьшением на 5% емкости интегрирующего конденсатора  $C_{\text{И}2}$ , либо уменьшением резистора  $R_2$  в цепи положительной обратной связи интегратора на микромощном усилителе  $D2$ , применяемом в схеме устройства (рисунок 1).

Разработанная и исследованная схема светочастотного преобразователя практически используется для допускового контроля светодиодов разного типа с их отбраковкой по световому потоку при нормированном значении тока накачки. Для упрощения процесса контроля применена дополнительная технологическая оснастка – светочастотный преобразователь конструктивно размещен в жесткой конструкции черного цвета с закрывающейся крышкой, внутри которой расположен разъем для подключения контролируемого светодиода.

При допусковом контроле светодиодов ток накачки стабилизируется на номинальном уровне  $I_{\text{СД}} = 5$  мА микросхемой стабилизатора напряжения, к выходу которой подключен токоограничивающий резистор.

Кроме рассмотренного светочастотного преобразователя в аппаратуре допускового контроля светодиодов используется микроконтроллер типа *AN89S8253* [3], который кроме цифрового измерения частоты выходных импульсов светочастотного преобразователя выполняет несколько дополнительных функций. В частности, с его помощью реализуется автоматизированная коррекция аддитивной погрешности (измерение начальной частоты выходных импульсов преобразователя, обусловленных темновым током фотодиода, и ее вычитание из результатов последующих измерений светового потока), периодический контроль напряжения питания светочастотного преобразователя с введением соответствующих поправок в результаты измерений, и самодиагностика работоспособности прибора.

Процесс допускового выборочного контроля яркости светодиодов заключается в сравнении результатов цифровых измерений выходной частоты светочастотного преобразователя с установленным номинальным значением, которое задается микроконтроллером и индицируется в виде цифры "100%". Если при измерении микроконтроллер показывает значение меньше 80%, то делается вывод о несоответствии данного светодиода (и даже партии светодиодов) требованиям, предъявляемым данной продукцией при ее экспорте за рубеж.

Следует также отметить, что новизна рассмотренной схемы микромощного светочастотного преобразователя защищена патентом на полезную модель [4].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загорский, Я.Т. Микромощные электронные измерительные устройства / Я.Т. Загорский, Б.Р. Иванов. – М.: Энерго-атомиздат, 1993. – 320 с.
2. Богданов, Н.Г. Расширение динамического диапазона фотоэлектрических преобразователей / Н.Г. Богданов, Ю.Б. Иванов, Е.Ю. Наумов // Телекоммуникации. – 2007. – № 7. – С. 41 – 44.
3. Каталог микросхем фирмы *Analog Devices*, 2006. – С. 245 – 247.
4. Светочастотный преобразователь. Богданов Н.Г., Иванов Ю.Б. Патент № 73074 от 16.01.08.

### **Иванов Юрий Борисович**

Академия ФСО России, г. Орел

Кандидат технических наук, преподаватель кафедры № 11

Тел. (4862) 42-61-61

E-mail: zhmur@yahoo.com

С.В. ТЕРЕНТЬЕВ, И.И. ШИШКОВ

## О ПРОБЛЕМЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

*В статье рассматриваются особенности визуализации изображений в информационной системе компьютерной томографии. Приводятся требования, предъявляемые к процессу визуализации изображений в информационной системе. Рассматриваются различные алгоритмы визуализации, предполагающие использование программного интерфейса OpenGL. В качестве наиболее эффективного алгоритма предлагается метод, основанный на использовании пиксельных шейдеров.*

**Ключевые слова:** информационная система, компьютерная томография, визуализация изображений.

*The article describes peculiarities of images visualization in an information system of computer tomography. The requirements that the visualization process must satisfy are mentioned. Then different visualization algorithms that are based on using OpenGL API are described. The algorithm that uses fragment shaders is offered as the most effective one.*

**Key words:** information system, computer tomography, images visualization.

### ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время компьютерная томография находит все более широкое применение в медицине, во многих случаях становясь незаменимым инструментом диагностики и контроля результатов лечения заболеваний.

Томография как метод исследования позволяет изучить внутреннюю структуру объекта, используя просвечивающее излучение. В случае рентгеновского излучения для организации томографического процесса требуется получить большое число рентгеновских снимков, сделанных под разными углами. С помощью томографических алгоритмов полученные снимки обрабатываются таким образом, чтобы представить внутреннюю структуру объекта в виде некоторого набора плоских изображений, соответствующих его отдельным тонким слоям, либо в виде единого объемного трехмерного изображения [1].

В связи с развитием томографической техники постоянно повышается разрешение создаваемых снимков, увеличивается вычислительная сложность их обработки. В этих условиях повышаются требования к скорости обработки графической информации. Это связано также с тем фактом, что при эксплуатации томографа часто возникает необходимость исследования томографических данных в интерактивном режиме. В процессе изучения изображений пользователь (например, медицинский работник) может изменять их различные параметры с целью повышения качества или извлечения какой-либо информации. При этом заранее не известно, какие именно значения параметров необходимо задать для достижения цели (скажем, для более детального рассмотрения того или иного участка изображения). В этой связи пользователь должен иметь возможность изменять различные наборы значений параметров изображения для нахождения тех, которые обеспечат требуемое качество изображения. Так как поиск нужных параметров может занять значительное время, исключительно важно обеспечить минимальное время отклика системы на изменение параметров изображения. Это повысит удобство работы с ней и скорость решения конкретных прикладных задач [2].

### ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЦЕССУ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В рамках деятельности учебно-научно-исследовательской лаборатории специального программного обеспечения, функционирующей в Орловском государственном техническом университете, разрабатывается программно-аппаратный комплекс проведения томографического обследования пациента.

Программно-аппаратный комплекс включает в себя информационную систему, которая, в числе прочего, реализует обработку получаемых рентгеновских снимков с целью получения томографического изображения, хранение и поиск информации о проведенных обследованиях пациентов, визуализацию получаемых изображений.

Используемое аппаратное обеспечение позволяет получать изображения, которые представляют собой двумерный массив пикселей, заданных в цветовом пространстве оттенков серого, причём для хранения оттенка одного пикселя используется 16 бит. Максимальный размер изображения – 4096x4096 пикселей.

В процессе создания указанного комплекса возникают упомянутые задачи оперативной обработки изображений. В частности, необходимо реализовать следующие функции таким образом, чтобы время их выполнения было незаметно для пользователя:

- 1) перемещение по изображению, не помещающемся в окно;
- 2) масштабирование изображения;
- 3) отображение изображения в режимах негатива и позитива;
- 4) применение нормализации (см. ниже);
- 5) изменение нижнего порога визуализации — все пиксели, интенсивность которых меньше нижнего порога визуализации, считаются чёрными;
- б) изменение верхнего порога визуализации — все пиксели, интенсивность которых больше верхнего порога визуализации, считаются белыми.

Современные дисплеи используют для представления цвета 24 бита — по 8 бит на красную, зелёную и синюю его составляющие. Таким образом, каждая составляющая может иметь 256 различных оттенков. При визуализации чёрно-белых изображений все три составляющие цвета устанавливаются равными интенсивности очередного пикселя. Таким образом, дисплей способен отображать 256 различных оттенков серого.

Так как в разрабатываемой системе для хранения интенсивности пикселя изображения используется 16 бит, то возникает задача нормализации интенсивностей – преобразования значения интенсивности пикселя из 16-битного формата в 8-битный.

В общем виде это преобразование можно описать с помощью функции  $f(i_s, min, max)$ , которая отображает исходное значение интенсивности  $i_s$  с учётом порогов визуализации  $min$  и  $max$  в диапазон от 0 до 255, причём

$$\forall i: 0 \leq i < min \quad f(i, min, max) = 0, \quad (1)$$

$$\forall i: max < i \leq 65535 \quad f(i, min, max) = 255. \quad (2)$$

Таким образом, перед выводом изображения интенсивность каждого пикселя должна быть преобразована с помощью функции  $f$ . При изменении параметров  $min$  или  $max$  также необходимо осуществить нормализацию и вывести изображение.

Выделяется два типа нормализации: линейная и экспоненциальная. При линейной нормализации с учётом формул (1) и (2) функция  $f$  имеет вид:

$$f(i, min, max) = 255 \cdot \frac{i - min}{max - min}. \quad (3)$$

В случае экспоненциальной нормализации функция  $f$  представляется следующим образом:

$$f(i, min, max) = \left[ e^{\frac{(i - min) \cdot \ln 256}{max - min}} - 1 \right]. \quad (4)$$

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

В качестве средства программной реализации визуализации изображений был выбран OpenGL – кросс-платформенный программный интерфейс для написания приложений, использующих двумерную и трехмерную компьютерную графику [3]. Такой выбор обусловлен тем, что OpenGL позволяет программисту самостоятельно оптимизировать процесс визуализации, непосредственно программируя видеокарту.

В процессе поиска наиболее эффективного способа реализации перечисленных функций было разработано и исследовано несколько алгоритмов визуализации изображения с использованием OpenGL.

**Алгоритм, основанный на использовании массива нормализованных значений**, представляет собой следующую последовательность действий:

- 1) для каждого значения интенсивности от 0 до 65535 вычисляется соответствующее значение функции  $f$  и сохраняется в массиве нормализованных значений `map`;
- 2) с его помощью для каждого пикселя изображения определяется нормализованное значение, в результате в памяти формируется нормализованное изображение;
- 3) командой OpenGL `glRasterPos` устанавливается позиция вывода изображения на экране дисплея;
- 4) нормализованное изображение выводится командой `glDrawPixels`.

Однако данный алгоритм оказался неэффективным, так как при его использовании преобразование интенсивностей пикселей осуществляется в оперативной памяти. Для повышения скорости нормализации необходимо добиться, чтобы оно осуществлялось видеокартой.

Кроме того, можно выделить ещё один важный недостаток — использование команды `glRasterPos`. Как сказано в [3], эта команда устанавливает позицию вывода нижнего левого пикселя изображения. Если переданная ей точка выходит за границы видимого объёма, то позиция вывода изображения не определена. Это заставляет программиста обеспечивать постоянное отображение нижнего левого пикселя, что делает невозможным перемещение по изображению, если оно выходит за границы окна.

Избавиться от первого из указанных недостатков позволяет **подход, основанный на задании таблицы отображения**. OpenGL поддерживает набор простых математических операций, которые выполняются над пикселями в момент, когда они выводятся в буфер цвета. Задание типа преобразования осуществляется командой `glPixelTransfer`. Одной из поддерживаемых этой командой операций является отображение цветов, которое активизируется вызовом `glPixelTransferi` с параметрами `GL_MAP_COLOR` и `GL_TRUE`. После этого отдельно для каждой компоненты цвета необходимо задать таблицу отображения, которая представляет собой одномерный массив, индексируемый исходным цветом и содержащий новые значения интенсивностей. Загрузка таблицы отображения осуществляется командой `glPixelMap`.

Таким образом, если активировать отображение цветов и в качестве таблицы отображения использовать массив `map`, то нормализация изображения будет осуществляться видеокартой в процессе вывода на экран. Это существенно ускоряет процесс визуализации изображения, однако не решает проблему невозможности перемещения по изображению.

Как показали дальнейшие исследования, лучших результатов удастся достичь, если применить **метод, использующий текстуру**. Отображение цветов в OpenGL выполняется не только при прямом копировании пикселей в буфер цвета с помощью команды `glDrawPixels`, но и при создании текстуры командой `glTexImage2D`. Таким образом, если выводить изображения путём наложения текстуры на прямоугольник, имеющий размеры окна вывода, то путём изменения текстурных координат можно обеспечить масштабирование и перемещение по изображению при сохранении высокой скорости нормализации и вывода. Единственной проблемой является то, что отображение цветов текстуры осуществляется при её загрузке, то есть в буфере видеокарты хранится уже изменённая текстура. Следовательно, при изменении порогов визуализации необходимо осуществлять повторную загрузку текстуры.

Такой подход не обладает упомянутыми недостатками, но в то же время не является эффективным, так как независимо от того, сколько пикселей отображается на экране, осуществляется перезагрузка всей текстуры. Как указано выше, максимальный размер изображения – 4096x4096 пикселей, то есть в процессе визуализации каждый раз в память видеокарты загружается текстура объёмом  $4096 \cdot 4096 \cdot 2 = 2^{25} \text{ байт} = 32 \text{ Мб}$ . Так как, например, при пе-

ремещении по изображению его необходимо перерисовывать несколько раз в секунду, такой объём передаваемых данных не позволяет достичь высокой скорости визуализации.

В OpenGL существует команда `glTexSubImage2D`, позволяющая осуществить перезагрузку прямоугольной части текстуры из переданного ей буфера, причём при выполнении этой команды также осуществляется отображение цветов. Тогда обрабатывать изменение порогов визуализации можно по следующему алгоритму:

1) когда пользователь нажимает на ползунок, положение которого определяет один из порогов визуализации, в специальный буфер в оперативной памяти копируется видимая часть исходного изображения;

2) при перемещении ползунка, то есть при изменении параметров нормализации, командой `glTexSubImage2D` перезагружается только сохранённая часть изображения;

3) когда пользователь отпускает ползунок, происходит перезагрузка всей текстуры.

Максимальное разрешение современного монитора составляет 1920 на 1080 пикселей. Не учитывая, что изображение занимает не весь экран, получаем, что каждый раз осуществляется загрузка текстуры, размеры которой в  $\frac{4096 \cdot 4096}{1920 \cdot 1080} \approx 8$  раз меньше исходного изобра-

жения. Однако если использовать масштаб, обеспечивающий отображение в окне всего кадра, то, несмотря на то, что реальное число отображаемых пикселей не равно площади исходного изображения, при каждом изменении порога будет происходить перезагрузка всей текстуры.

Для устранения последнего недостатка был разработан **алгоритм, использующий пиксельные шейдеры** [3,4], которые можно создавать в OpenGL с помощью языка GLSL.

Использование пиксельных шейдеров имеет следующие преимущества:

1) их выполнение осуществляется на процессорах видеокарты, что обеспечивает копирование и сложение четырёхкомпонентных векторов за один такт;

2) пиксельные шейдеры могут выполняться параллельно;

3) количество их вызовов не превышает количества пикселей окна вывода.

Последнее преимущество позволяет решить проблему зависимости скорости визуализации от выбранного масштаба.

С помощью пиксельных шейдеров была разработана следующая схема формирования интенсивностей пикселей изображения:

1) командой `glTexImage2D` содержимое изображения загружается в двумерную текстуру с указанием формата внутреннего представления два байта на пиксель;

2) при изменении параметров нормализации массив `map` загружается в одномерную текстуру размером 65536 пикселей;

3) вывод изображения осуществляется наложением текстуры на прямоугольник;

4) для визуализации устанавливается пиксельный шейдер;

5) для каждого пикселя шейдер с помощью команды `texture2D` определяет соответствующую ему интенсивность кадра;

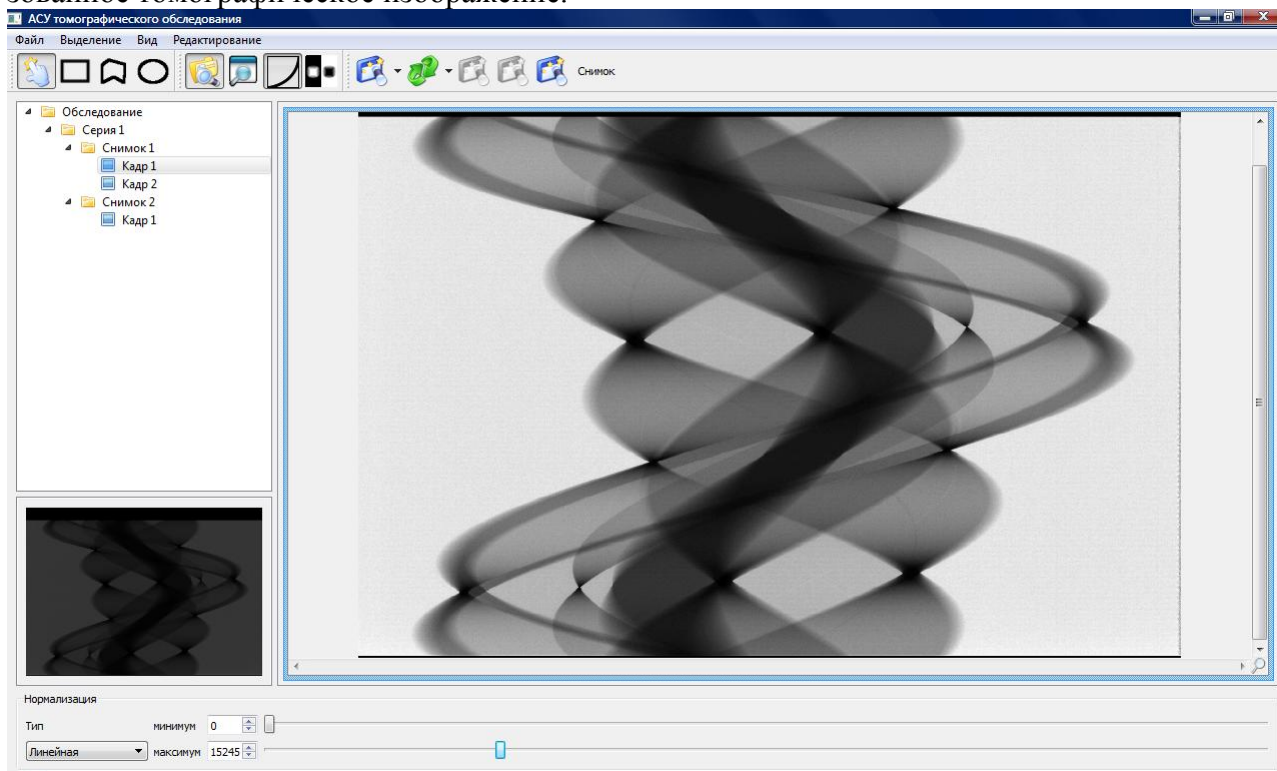
6) используя полученное значение как текстурную координату, с помощью команды `texture1D` из загруженной одномерной текстуры читается нормализованная интенсивность;

7) эта интенсивность записывается в выходную переменную `gl_FragColor`, задающую цвет выводимого пикселя.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представленный алгоритм, использующий пиксельные шейдеры, является наилучшим из рассмотренных способом реализации процесса визуализации томографических изображений. Он позволяет осуществлять перемещение по изображению, его масштабирование, нормализацию и вывод в режимах негатива и позитива практически без различимых человеком временных задержек. Именно этот подход использован для визуализации проекционных данных и томографических снимков в разрабатываемой информационной системе. На ри-

сунке 1 приведён пример экранной формы информационной системы, содержащей нормализованное томографическое изображение.



*Рисунок 2 – Пример экранной формы информационной системы, содержащей нормализованное томографическое изображение*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kak, A.C. Principles of Computerized Tomographic Imaging [Текст] / A.C. Kak, M. Slaney // Society of Industrial and Applied Mathematics, 2001. – 327 с. – ISBN 089871494X.
2. Митин, А.А. К вопросу об оперативной обработке растровых изображений большого размера [Текст] / А.А. Митин, И.И. Шишков // Материалы IV Международной научно-технической конференции ИТ-НОП-2010, Т3. – Орел: ОрелГТУ, 2010. – С. 194-197.
3. Wright, R. OpenGL SuperBible [Текст] / Richard Wright, Benjamin Lipchak, Nicholas Haemel : [англ.]. – 4-е издание. – Addison Wesley, 2007. – 1262 с. : ил. – ISBN-13 978-0-321-49882-3.
4. OpenGL Reference Pages [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opengl.org/sdk/docs/man>. – Заголовок с экрана. – Систем. требования: Windows 2000, Opera 9, Pentium 166, 16 Мб ОЗУ, видеопамять 2Мб, мышь.

### **Терентьев Сергей Викторович**

Орловский государственный технический университет  
Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Информационные системы»  
Тел.: (4862) 76-19-10  
E-mail: terser76@inbox.ru

### **Шишков Илья Иванович**

Орловский государственный технический университет  
Аспирант кафедры «Информационные системы»  
Тел.: (4862) 43-56-11  
E-mail: shishkov.ilia@gmail.com

# **ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА** **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 539.611

С.Н. СЫЧЕВ, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, Е.В. ПАХОЛКИН,  
С.Г. ПУЗЫРЕВ, В.А. ГАВРИЛИНА

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ВХОДЯЩИХ В ЯВЛЕНИЕ КОГЕЗИИ**

*Обсуждается применение метода главных компонент для выявления характера межмолекулярных взаимодействий, ответственных за явление «когезия». Показано, что в ряде случаев удается получить дифференцированные молекулярные характеристики когезии из интегральных характеристик макросистем, таких как вязкость, поверхностное натяжение, температур плавления и кипения и т.д.*

**Ключевые слова:** когезия, метод главных компонент.

*We discuss the application of principal component analysis to identify the nature of intermolecular interactions responsible for the phenomenon of "cohesion". It is shown, that in some cases it is possible to obtain differentiated characteristics of the molecular cohesion from the integral characteristics of macrosystems, such as viscosity, surface tension, melting and boiling points, etc.*

**Key words:** cohesion, method of principal component.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Когезия - (от лат. *cohaesus* — связанный, сцепленный), сцепление молекул (атомов, ионов) физического тела под действием сил притяжения. Это силы [межмолекулярного взаимодействия](#), [водородной связи](#) и (или) [химической связи](#). Они определяют совокупность физических и физико-химических свойств вещества: агрегатное состояние, [летучесть](#), [растворимость](#), механические свойства и т.д. Интенсивность межмолекулярного и межатомного взаимодействия (а, следовательно, силы когезии) резко убывает с расстоянием. Наиболее сильна когезия в твердых телах и жидкостях, т. е. в конденсированных фазах, где расстояние между молекулами (атомами, ионами) малы — порядка нескольких десятых нанометра. В газах средние расстояния между молекулами велики по сравнению с их размерами, и поэтому когезия в них незначительна. Мерой интенсивности межмолекулярного взаимодействия служит плотность энергии когезии. Она эквивалентна работе удаления взаимно притягивающихся молекул или атомов на бесконечно большое расстояние друг от друга, что практически соответствует испарению или сублимации вещества [1]. Необходимо отметить, что, согласно определению, энергию когезии можно рассчитать, как величину суммы энергий преодоления сопротивления поверхностного слоя и энергии преодоления взаимодействия внутренних слоев вещества при разрушении вещества, взятую с обратным знаком. С этой точки зрения вязкость должна содержать в неявном виде информацию о влиянии строения жидкости в объеме на когезию, а поверхностное натяжение — о межмолекулярных взаимодействиях поверхностного слоя. Выделение структурных и электрических факторов, влияющих на параметры когезии, из интегральных характеристик веществ и их интерпретация с помощью факторов, полученных, например, из: температур кипения, плавления, показателей преломления и т.д. - возможно методом главных компонент [2,3]. Выбор в качестве объектов исследования низкомолекулярных однозамещенных нормальных алифатических соединений типа  $R - Y$ , где  $R$  — линейные углеводородные радикалы  $CH_3-$ ,  $C_2H_5-$ ,  $C_3H_7-$ ,  $C_4H_9-$ ,  $C_5H_{11}-$ , а  $Y$  — заместители  $H-$ ,  $Cl-$ ,  $-COOH$ ,  $-OH$ ,  $CH_3OCO-$ ,  $NH_2$  — обусловлен интересом к их применению в качестве присадок к моторным маслам.

### МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Метод главных компонент является разновидностью мультикорреляционного анализа. При использовании метода главных компонент мы предполагаем, что несколько измеряемых переменных сильно коррелируют друг с другом. Это означает, что либо они взаимно определяют друг друга, либо связь между ними обуславливается третьей величиной, которую непосредственно измерить нельзя. Модель главных компонент связана с последним предположением [4, 5]. Экспериментальные данные в виде таблицы «признак – свойство» обрабатываются с помощью метода главных компонент, результатом обработки являются линейно-независимые факторы, которые описывают исходную матрицу в виде:

$$A(ij) = [F_1(i) \cdot V_1(j) + F_2(i) \cdot V_2(j) + \dots] S_i + N_i \quad (1)$$

- где  $V_1(j)$  и  $V_2(j)$  – коэффициенты линейной модели;
- $F_1(i)$ ,  $F_2(i)$  – линейно-независимые факторы (параметры);
- $S_i$  – стандартное отклонение по строкам;
- $N_i$  – среднее значение по строкам матрицы  $A$ ;
- $A(ij)$  – элемент исходной матрицы  $A$ .

Основная идея использования метода главных компонент в физической и физической органической химии заключается в получении набора линейно – независимых факторов, описывающих влияние заместителей на рассматриваемое свойство. Получение таких факторов, их интерпретация в терминах межмолекулярных взаимодействий и использование для дальнейших расчетов составляет область использования метода главных компонент анализа в указанных отраслях науки.

### ВЫДЕЛЕНИЕ, АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ФАКТОРОВ, ОПИСЫВАЮЩИХ КОГЕЗИЮ ОДНОЗАМЕЩЕННЫХ АЛИФАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Экспериментальными данными, заведомо содержащими факторы, влияющие на когезию компонентов моторных масел, являются вязкость и поверхностное натяжение. Абсолютные температуры кипения, плавления и показатели преломления замещенных алифатических соединений используются для получения идентификационных факторов при интерпретации факторов из вязкости и поверхностного натяжения.

Располагая экспериментальные данные в виде таблицы «признак-свойство», где «признак» - вид углеводородного радикала, «свойство» – вид заместителя, получаем исходную матрицу температур кипения  $A_1$  для исследования влияния заместителей на температуры.

Таблица 1 – Матрица  $A_1$  для исследования влияния заместителей на температуры кипения замещенных алифатических соединений в градусах Кельвина

	CH <sub>3</sub> -	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> -	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> -	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> -
Cl-	249.3	286.1	319.5	351.5	381.4
H-	111.4	184.4	230.9	272.5	309.1
CH <sub>3</sub> OCO-	330	350	375	399.5	420.6
NH <sub>2</sub> -	266.7	289.6	321	349	377
COOH-	391.5	414	436	459	478.3
OH-	337.5	351.3	370.4	390	404.0

Данные по кислотам взяты из [6], остальные данные взяты из работы [7].

В результате анализа матрицы  $A_1$  были получены два линейно-независимых фактора, описывающие исходную матрицу на 99.94%; причем первый фактор дал вклад 99.06%, а второй, соответственно, 0.88%. Большой вклад первого фактора говорит об одной основной характеристике, ответственной за температуры кипения. Значения факторов и их нагрузок (собственных векторов) приведены в таблице 2.

Рассмотрим первый фактор  $F_1$  и соответствующие ему нагрузки. Из таблицы 2 видно, что все нагрузки на  $F_1$  примерно одинаковы и не зависят от вида углеводородного радикала.





ных факторов с  $F_1$  является интерпретацией исследуемых факторов как самоассоциации. Необходимо отметить, что такой вид ассоциации, особенно характерный для кислот и спиртов, называется антипараллельной диполь-дипольной и зависит от дипольных моментов исследуемых соединений [9].

Фактор  $F_2$ , полученный из температур кипения Cl-, H-, NH<sub>2</sub>-, COOH-, OH- (таблица 1 без данных по CH<sub>3</sub>OCO-заместителю) -замещенных алканов был прокоррелирован с 6-ю наиболее признанными константами Гаммета-Тафта [10]:  $\sigma^*$ ,  $-0.1\delta$ ,  $\sigma^{\circ}_R$ ,  $\sigma^{\circ}_M$ ,  $\sigma^{\circ}_P$ ,  $\sigma^{\circ}_I$  [10]. Максимальный коэффициент корреляции был установлен для корреляции  $F_2$  и  $\sigma^{\circ}_R$  и равен 0.978 (это удовлетворительная корреляция для пяти точек).  $\sigma^{\circ}_R$  константа отвечает за  $\pm$  полярный резонанс в ароматических системах, а фактически за флуктуацию электромагнитного поля молекулы [11] в условиях существования индуцированного дипольного момента (таблица 4).

Таблица 4 – Факторы, полученные из данных таблицы 1 (без CH<sub>3</sub>OCO- заместителя) и  $\sigma^{\circ}_R$

	$F_1$	$F_2$	$\sigma^{\circ}_R$
Cl-	0.194	-0.225	-0.18
H-	1.404	-0.643	0.0
NH <sub>2</sub> -	0.178	0.581	-0.47
COOH-	-1.325	-1.11	0.20
OH-	-0.451	1.40	-0.57

Отсюда следует, что корреляция аналогичных факторов с  $F_2$  является интерпретацией исследуемых факторов как признак существования в системе сильных дисперсионных взаимодействий соединений с полярным заместителем и углеводородным хвостом. Такие взаимодействия могут быть количественно охарактеризованы  $\sigma^{\circ}_R$  константами Тафта, абсолютной энтропией S соединения или гидрофобностью молекулы в виде величин межфазного поверхностного натяжения «соединение – вода» [12].

Из анализа вкладов ( $F_1*V_1$ ) первого фактора и вкладов ( $F_2*V_2$ ) второго фактора следует (таблица 5 и таблица 6), что для ряда соединений с полярным заместителем (например – для метанола) степень ассоциации за счет диполь-дипольной ассоциации и (или) образования водородных связей является решающим фактором, влияющим на температуру кипения.

Наоборот, температура кипения алканов зависит только от генерации флуктуирующих электромагнитных полей углеводородными радикалами [11] (таблица 6), а температура кипения алифатических кислот зависит от обоих вкладов (таблица 5 и таблица 6).

Таблица 5 – Вклад первого фактора в температуры кипения замещенных алканов  $F_1*V_1$

	CH <sub>3</sub> -	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> -	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> -	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> -
Cl-	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062
H-	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
CH <sub>3</sub> OCO-	0.096	0.096	0.096	0.096	0.096
NH <sub>2</sub> -	-0.057	-0.057	-0.057	-0.057	-0.057
COOH-	<b>0.269</b>	0.269	0.269	0.269	0.269
OH-	<b>0.079</b>	0.079	0.079	0.079	0.079

Таблица 6 – Вклад второго фактора в температуры кипения замещенных алканов  $F_2*V_2$

	CH <sub>3</sub> -	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> -	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> -	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> -
Cl-	-0.949	-0.296	0.017	0.385	0.641
<b>H-</b>	-2.398	-0.747	0.042	<b>0.973</b>	<b>1.620</b>
CH <sub>3</sub> OCO-	0.506	0.158	-0.01	-0.205	-0.342
NH <sub>2</sub> -	2.132	0.664	-0.037	-0.865	-1.44
COOH-	-4.330	-1.349	0.080	<b>1.756</b>	<b>2.925!</b>
OH-	5.033	1.568	-0.088	-2.041	<b>-3.400 !!!</b>

Из таблиц 5 и 6 становится ясно, например, что причиной более низких температур кипения спиртов по сравнению с алифатическими кислотами, является значительно более низкий уровень взаимодействия алифатических радикалов спиртов по сравнению с взаимодействием алифатических радикалов кислот.

**В результате анализа матрицы температур плавления** также были получены два фактора, описывающие исходную матрицу на 99.7%; причем первый фактор дал вклад 95.2%, а второй, соответственно, 4.5%. Фактор  $F_1$ , полученный из матрицы температур плавления, по смыслу аналогичен фактору  $F_1$ , полученному из матрицы температур кипения  $A_1$ . Единственным исключением является возросшая степень ассоциации замещенных аминов с 3 до 4 при понижении температуры, что, впрочем, не противоречит известным данным [8]. При корреляции с 6-ю константами Гаммета-Тафта [9]:  $\sigma^*$ ,  $-0.1\delta$ ,  $\sigma^{\circ}_R$ ,  $\sigma^{\circ}_M$ ,  $\sigma^{\circ}_P$ ,  $\sigma^{\circ}_I$  оказалось, что наибольший коэффициент корреляции, равный 0.981 установлен для корреляции  $F_2$  и  $-\sigma^{\circ}_R$  - константы. Важно отметить, что, в отличие от температур кипения, векторы  $V_2$  фактора  $F_2$  и вклады второго фактора  $F_2 \cdot V_2$  (влияние алкильных радикалов) изменяются скачкообразно, резко меняя значение в зависимости от **четности (нечетности)** количества атомов углерода в цепи. Это хорошо известное явление (зависимость температур плавления от четности – нечетности углеродных атомов алкильных радикалов) указывает на большую роль дифракционно-интерференционных эффектов электрона-волны при генерации флуктуирующих электромагнитных полей алкильного радикала. Замечательно еще и то, что резонансные константы, предназначенные для описания внутримолекулярных электронных эффектов ароматических соединений, получены из данных по межмолекулярным взаимодействиям алифатических соединений. В органической химии такой эффект получил название «гиперконъюгации» или «сверхсопряжения». Однако, представленные факты свидетельствуют о том, что резонансные константы Гаммета-Тафта являются универсальными межмолекулярными константами и определяются наиболее вероятной в данных условиях формой электромагнитных полей взаимодействующих молекул, осуществляющих дисперсионные взаимодействия.

**Показатели преломления** могут содержать в неявном виде информацию о важной молекулярной характеристике: деформационной поляризуемости, приводящей к появлению индуцированных дипольных моментов молекул на границе раздела фаз.

***Примечание.** Поляризуемостью называется способность электрических зарядов в молекуле к смещению под действием электромагнитного поля. Вместе с магнитной восприимчивостью, поляризуемость входит в известную формулу Кирквуда для потенциала дисперсионных взаимодействий. Магнитная восприимчивость (для воды и углеводородов - диамагнитная восприимчивость) связана с существованием электрических токов, замыкающихся в пределах каждого атома молекулы - так называемых молекулярных токов [11].*

В результате анализа матрицы показателей преломления были получены два линейно-независимых фактора, описывающие исходную матрицу на 99.87%; причем первый фактор дал вклад 72.52%, а второй, соответственно, 27.35%.

Значения факторов и их нагрузок (собственных векторов) приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Значения факторов и их нагрузок (собственных векторов) из показателей преломления при 20°C замещенных алифатических соединений

	Факторы $F_1$ и $F_2$		Векторы $V_1$ и $V_2$		
	$F_1$	$F_2$		$V_1$	$V_2$
Cl-	-0.044	-1.010	CH <sub>3</sub> -	-0.374	0.600
H-	1.665	0.650	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -	-0.374	0.600
NH <sub>2</sub> -	-0.062	-1.103	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> -	-0.490	-0.308
COOH-	-0.829	0.753	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> -	-0.489	-0.309
OH-	-0.731	0.783	C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> -	-0.490	-0.298

Фактор  $F_1$  удовлетворительно коррелирует (коэффициент корреляции 0.937) с фактором  $F_1$  из температур кипения, идентифицированным как самоассоциация соответствующих чистых жидкостей. Как и следовало ожидать, второй фактор  $F_2$  не коррелирует ни с одним из

факторов температур плавления или кипения и ни с одной из констант Гаммета-Тафта. Можно предположить, что фактор  $F_2$  ответственен за так называемую деформационную поляризацию, которая не входит в температуры плавления или кипения: зато она является параметром показателя преломления, связанного с поверхностным натяжением, энергия которого, в свою очередь, входит в энергию когезии. Таким образом, получены факторы для идентификации самоассоциации (диполь-дипольная самоассоциация), дисперсионных взаимодействий углеводородных хвостов и, возможно, деформационных поляризуемостей.

Вязкость и поверхностное натяжение – явления, суммарно определяющие когезию. Для того, что бы выявить факторы, управляющие когезией, необходимо выявить и интерпретировать факторы, управляющие вязкостью и поверхностным натяжением.

В результате анализа матрицы значений вязкостей были получены два фактора, описывающие исходную матрицу на 99.62%; причем первый фактор дал вклад 93.98 %, а второй, соответственно, 5.64 %. Фактор  $F_1$  имеет максимальный коэффициент корреляции (0.851) с фактором  $F_1$  из температур кипения, идентифицированный как самоассоциация соответствующих чистых жидкостей. Значение коэффициента корреляции невысоко, но если учесть склонность тримеров спиртов к своего рода дополнительной димеризации в чистых жидкостях, то получим степень ассоциации равной шести – тогда коэффициент корреляции возрастает до 0.99 (конечно, это только предположение). Напротив, фактор  $F_2$  удовлетворительно коррелирует (коэффициенты корреляции 0.96) со вторыми факторами из температур плавления и кипения, идентифицированными как дисперсионные взаимодействия углеводородных хвостов.

В результате анализа матрицы значений поверхностных натяжений были получены два фактора, описывающие исходную матрицу на 99.80 %; причем первый фактор дал вклад 77.67 %, а второй, соответственно, 22.13%. Фактор  $F_1$  имеет максимальные коэффициенты корреляции с фактором  $F_1$  из температур кипения (0.978), идентифицированным как самоассоциация соответствующих чистых жидкостей и  $F_1$  из показателей преломления (0.987), также идентифицированным как самоассоциация. Фактор  $F_2$  отлично коррелирует (коэффициент корреляции 0.993) со вторым фактором  $F_2$  из показателей преломления, предположительно идентифицированным как деформационная поляризуемость, приводящая к появлению некомпенсированного заряда на поверхностном слое.

Итоговая матрица корреляции факторов, полученных из разных макрохарактеристик жидкостей, представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Коэффициенты корреляции факторов, полученных из разных макрохарактеристик монозамещенных алифатических углеводородов

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.000	0.000	0,987	0,114	0,784	0,129	0,937	-0,300
2	0.000	1.000	-0,111	0,993	-0,616	0,249	-0,212	-0,146
3	0,987	-0,111	1.000	0.000	0,839	0.000	0,978	-0,195
4	0,114	0,993	0.000	1.000	-0,520	0,289	-0,111	-0,209
5	0,784	-0,617	0,839	-0,520	1.000	0.000	0,851	-0,206
6	0,129	0,249	0.000	0,288	0.000	1.000	-0,198	-0,961
7	0,937	-0,212	0,978	-0,110	0,851	-0,198	1.000	0.000
8	-0,300	-0,146	-0,194	-0,208	-0,206	-0,961	0.000	1.000

1 –  $F_1$  показатель преломления; 2 –  $F_2$  показатель преломления; 3 –  $F_1$  поверхностное натяжение; 4 –  $F_2$  поверхностное натяжение; 5 –  $F_1$  вязкость; 6 –  $F_2$  вязкость; 7 –  $F_1$  температура кипения; 8 –  $F_2$  температура кипения.

### ВЫВОДЫ

В результате анализа представленных экспериментальных величин состав функции, описывающей энергию когезии замещенных алифатических углеводородов, должны входить

такие молекулярные величины и характеристики межмолекулярных взаимодействий, как постоянные и индуцированные дипольные моменты (модель диполь-дипольной ассоциации), энергии и степени самоассоциации, абсолютные энтропии углеводородных хвостов  $S^{\circ}$  или  $\sigma^{\circ}_R$  - константы, молекулярная поляризуемость.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шиц, Л.А. Большая Российская энциклопедия / Л.А. Шиц. – М.: Наука, 2001.
2. Сычев С.Н., Сычев К.С., Ланин С.Н. // Вестник МГУ. 2000. Сер.2. Химия. Т.41. № 1. С.28.
3. Сычев, С.Н. // Контроль. Диагностика / С.Н. Сычев // 2005. – № 1. – С. 70.
4. Лоули, Д. Факторный анализ как статистический метод / Д. Лоули, А. Максвелл. – М.: Мир, 1967.
5. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла. – М.: Статистика, 1980.
6. Павлов, Б.А. Курс органической химии / Б.А. Павлов, А.П. Терентьев. – М.: Химия, 1960.
7. Физер, А. Органическая химия / А. Физер, М. Физер. – М.: Химия, 1969.
8. Шахпаронов, М.И. Введение в современную теорию растворов / М.И. Шахпаронов. – М.: Высшая школа, 1976.
9. Skinner J.F., Fuoss R.M. // J. Phys. Chem. 1964. V.68. N 11. P. 3406.
10. Пальм, В.А. Основы количественной теории органических реакций / В.А. Пальм. – Л.: Химия, 1977.
11. Сычев, С.Н. Методы совершенствования хроматографических систем и механизмы удерживания в ВЭЖХ / С.Н. Сычев. – Орел: ОрелГТУ, 2000.
12. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982.

#### **Сычев Сергей Николаевич**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия» ОрелГТУ  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8(486)41-98-92  
E-mail: chemistry@ostu.ru

#### **Подмастерьев Константин Валентинович**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Доктор технических наук, профессор  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8(486)41-98-92  
E-mail: asms-orel@mail.ru

#### **Пахолкин Евгений Васильевич**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Кандидат технических наук, доцент  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8(486)41-98-92  
E-mail: eugene\_p@bk.ru

#### **Гаврилина Вера Александровна**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Кандидат технических наук, доцент, инженер лаборатории «Жидкостная хроматография»  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8(486)41-98-92  
E-mail: chemistry@ostu.ru

#### **Пузырев Станислав Григорьевич**

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Инженер лаборатории «Жидкостная хроматография»  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8(486)41-98-92  
E-mail: chemistry@ostu.ru

УДК 629.423.31

А.С. КОСМОДАМИАНСКИЙ, В.И. ВОРОБЬЕВ, А.А. ПУГАЧЕВ, А.Д. ХОХЛОВ

### АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЛОКОМОТИВОВ

*Представлены передаточные функции системы охлаждения тяговых электрических машин как объекта регулирования температуры и передаточная функция электропривода вентилятора охлаждения, имеющего два асинхронных двигателя, один из которых содержит поворотный статор, как исполнительно-регулирующего устройства автоматической системы регулирования температуры.*

**Ключевая слова:** система регулирования температуры, тяговый электродвигатель, асинхронный электропривод.

*The transfer function for cooling system of tractive electric machines as controlled entity of temperature and transfer function electric drive with two asynchronous motor one of them have the rotary stator as executive and regulating device for automatic temperature regulation system are presented.*

**Key words:** temperature regulation system, tractive electric machine, asynchronous electric drive.

В составе автоматической системы регулирования температуры тяговых электрических машин можно выделить объект регулирования (система охлаждения тяговых электрических машин), исполнительно-регулирующее устройство (вентиляторы с различными видами приводов) и управляющий орган (связанные между собой измерительные, задающие, сравнивающие, усилительно-преобразующие, суммирующие и другие устройства).

#### СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Тяговая электрическая машина, как тепловой объект, представляет собой сложную систему. Отдельные элементы электрической машины нагреваются неодинаково, они не являются однородными телами, между ними существует теплообмен, условия их нагревания и остывания различны. Существующие методы расчетных исследований тепловых процессов, происходящих в электрических машинах, базируются либо на использовании дифференциальных уравнений теплопроводности, либо на методе эквивалентных тепловых схем. В общем случае в установившемся состоянии распределение температуры определяется уравнением вида

$$\lambda_{xk} \frac{\partial^2 t_k}{\partial x^2} + \lambda_{yk} \frac{\partial^2 t_k}{\partial y^2} + \lambda_{zk} \frac{\partial^2 t_k}{\partial z^2} + q_k = 0$$

где  $\lambda_{xk}$ ,  $\lambda_{yk}$ ,  $\lambda_{zk}$  – коэффициенты теплопроводности в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$ ;

$q_k$  – количество тепла, выделяющегося в единице объема за единицу времени.

Однако граничные условия для этого уравнения сложны и взаимосвязаны. Решения получаются громоздкими и часто неприемлемыми для инженерной практики. Поэтому при практических расчетах принимают ряд допущений, позволяющих существенно упростить решение задачи. Одним из самых существенных упрощений при решении задачи нагрева электрической машины является отказ от рассмотрения поля температур внутри отдельных его частей. Переход к средним температурам позволяет систему с распределенными потерями заменить системой тел с сосредоточенными источниками. При этом дифференциальное уравнение нагревания электрической машины может быть представлено в виде

$$c_k \gamma_k \frac{dt_k}{d\tau} + \sum_{i=1}^n \lambda_{ki} (t_k - t_i) = q_k \quad (1)$$

где  $c_k$  – удельная теплоемкость;

$\gamma_k$  – плотность тела.

При установившемся режиме система уравнений (1) сводится к решению алгебраических уравнений вида

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{ki} (t_k - t_i) = q_k$$

Эта система может быть представлена эквивалентной тепловой схемой, в которой реальную картину распределения потерь и тепловых потоков заменяют условной, представляющей собой взаимный нагрев системы однородных тел.

Если считать электрическую машину однородным телом с равномерным распределением температуры по объему при условии, что с каждой единицы его поверхности рассеивается одно и то же количество тепла, то процесс нагревания в соответствии с классической теорией описывается математическим выражением

$$Qd\tau = cGd\Theta + \alpha_T S \Theta d\tau \quad (2)$$

где  $Qd\tau$  – тепло, выделяемое в теле;

$cGd\Theta$  – тепло, обуславливающее нагревание тела;

$\alpha_T S \Theta d\tau$  – тепло, рассеиваемое с поверхности тела в охлаждающую среду;

$c$  – удельная теплоемкость;

$\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи;

$S$  – теплоотдающая поверхность;

$\Theta$  – превышение температуры тела  $t$  над температурой охлаждающей среды  $t_{oc}$ ;

$Q$  – тепло, выделяемое в теле за единицу времени.

При стационарном тепловом режиме уравнение (2) принимает вид

$$Q = \alpha_T S \Theta_y$$

и тогда

$$\alpha_T S (\Theta_y - \Theta) d\tau = cGd\Theta$$

Решая это уравнение, получим

$$\Theta = \Theta_y (1 - e^{-\frac{\tau}{T_n}})$$

где  $T_n$  – постоянная времени нагревания тела, при этом

$$T_n = \frac{cG}{\alpha_T S}$$

Аналогично определяется зависимость  $\Theta(\tau)$  при остывании и тогда

$$\Theta = \Theta_0 e^{-\frac{\tau}{T_n}},$$

где  $\Theta_0 = \Theta_y$  – превышение температуры тела на температурой охлаждающей среды при  $\tau = 0$ .

Вместе с этим для построения автоматической системы регулирования достаточно определения динамических характеристик и параметров системы охлаждения тяговых электрических машин лишь по регулируемому воздействию во всем возможном диапазоне изменения возмущающих воздействий.

Для аппроксимации динамических свойств системы охлаждения тяговых электродвигателей были использованы следующие передаточные функции:

$$1) W_1(p) = k \frac{e^{-\tau}}{Tp + 1}; \quad (3)$$

$$2) W_2(p) = k \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}; \quad (4)$$

$$3) W_3(p) = k \frac{e^{-\tau}(1 - e^{-\tau})}{Tp}; \quad (5)$$

Методика исследований динамических свойств системы охлаждения тяговых электрических машин как объекта регулирования температуры изложена в работе [1].

При определении значений динамических параметров  $\tau$  и  $T$  передаточных функций вида (3), (4) и (5) могут использоваться методики, приведенные соответственно в работах [2] и [3].

### ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРА ОХЛАЖДЕНИЯ

Применяемые в настоящее время на локомотивах асинхронные электроприводы вентиляторов охлаждения не обеспечивают плавного изменения регулирующих воздействий. Известные виды регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями, разработанных в России и за рубежом, в том числе электроприводы с преобразователями частоты, реализующие алгоритмы частотного управления, обладают рядом недостатков, препятствующих в настоящее время по известным причинам их использованию на отечественном автономном тяговом подвижном составе [4].

Вместе с тем, уже в течение ряда десятков лет в технике применяются различные регулируемые электроприводы с асинхронными двигателями специальных конструкций. Они имеют право на существование благодаря своим бесспорным преимуществам – простоте, хорошим показателям эксплуатационной надежности и невысокой стоимости. Работы по их совершенствованию продолжаются и в настоящее время [5, 6].

В данной работе авторами предлагается использование электропривода с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор [7].

Описание свойств электропривода осуществим на основе схемы замещения, представленной на рисунке 1.

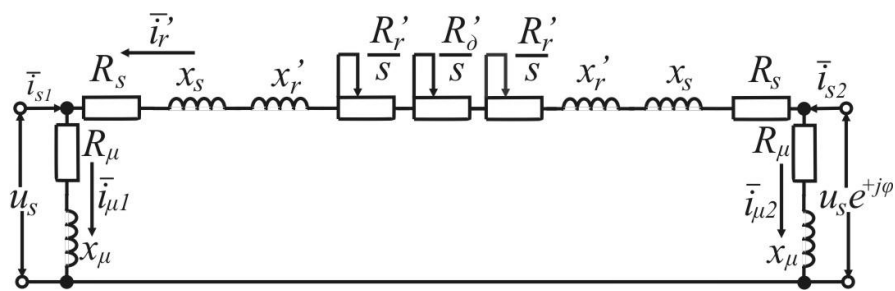


Рисунок 1 – Схема замещения электропривода с поворотным статором

Поворот статора одной из машин на угол  $\phi/(2p)$ , где  $p$  – число пар полюсов, учитывается в схеме замещения как поворот вектора напряжения статора на электрический угол  $\phi$ . Отсюда, с учетом формулы Клосса,

получим, что вращающий момент двигателей определяется выражением:

$$M_{1,2} = \frac{M_k \omega_0 s_k (\omega_0 - \omega) u^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + \omega_0^2 s_k^2} \left( 1 - \cos \phi \pm \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 s_k} \sin \phi \right),$$

где  $s_k = \frac{\omega_0 - \omega_k}{\omega_0}$  – критическое скольжение ( $\omega_k$  – угловая скорость вращения ротора,

соответствующая критическому скольжению  $s_k$ );

$\omega_0$  – угловая скорость вращения магнитного поля;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора;

$M_k$  – критический момент двигателя при номинальных параметрах питающего напряжения и двигателя;

$u$  – относительное значение напряжения статора.

Так как оба двигателя механически связаны, то развиваемый ими результирующий момент  $M$  равен:

$$M = M_1 + M_2 = \frac{2M_k \omega_0 s_k (\omega_0 - \omega) u^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + \omega_0^2 s_k^2} \left( -\cos \phi \right). \quad (6)$$

Линеаризуем выражение для момента (6) путем разложения в ряд Тейлора в окрестности точки установившегося равновесия ( $\omega_y, M_y, \phi_y, u_y$ ):

$$M = M_y + \frac{\partial M}{\partial \omega} \Big|_{\substack{\phi=\phi_y; \omega=\omega_y; \\ u=u_y}} \cdot \Delta \omega + \frac{\partial M}{\partial \phi} \Big|_{\substack{\phi=\phi_y; \omega=\omega_y; \\ u=u_y}} \cdot \Delta \phi + \frac{\partial M}{\partial u} \Big|_{\substack{\phi=\phi_y; \omega=\omega_y; \\ u=u_y}} \cdot \Delta u,$$

или в другом виде:



$$M = M_y + \Delta M_\omega + \Delta M_\varphi + \Delta M_u, \quad (7)$$

где  $\Delta M_\omega = k_\omega \Delta \omega$ ,  $\Delta M_\varphi = k_\varphi \Delta \varphi$ ,  $\Delta M_u = k_u \Delta u$  – приращения момента двигателя, вызванные соответственно приращениями его скорости, угла поворота статора, напряжения статора;

$k_\omega = \partial M / \partial \omega$  – коэффициент изменения момента двигателя при отклонении скорости от установившегося значения при  $\varphi = const$ ,  $u = const$ ;

$k_\varphi = \partial M / \partial \varphi$  – коэффициент чувствительности момента двигателя к углу поворота статора при  $\omega = const$ ,  $u = const$ ;

$k_u = \partial M / \partial u$  – коэффициент чувствительности по моменту к изменению напряжения при  $\omega = const$ ,  $\varphi = const$ .

Согласно (6)

$$k_\omega = \frac{2M_k \omega_0 s_k \left[ (\omega_0 - \omega)^2 - (\omega_0 - \omega_k)^2 \right] \left( -\cos \varphi \right)^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + \omega_0^2 s_k^2};$$

$$k_u = \frac{4M_k \omega_0 s_k (\omega_0 - \omega) u \left( -\cos \varphi \right)}{(\omega_0 - \omega)^2 + \omega_0^2 s_k^2};$$

$$k_\varphi = \frac{2M_k \omega_0 s_k (\omega_0 - \omega) u^2 \sin \varphi}{(\omega_0 - \omega)^2 + \omega_0^2 s_k^2}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что  $k_\varphi$  будет иметь положительное значение при повороте статора по направлению вращения магнитного поля и отрицательное значение при повороте статора против вращения магнитного поля.

Если воспользоваться основным уравнением движения электропривода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (9)$$

где  $J$  – момент инерции механической части электропривода, и подставить в него вместо  $M$  правую часть уравнения (7), а  $M_c$  заменить на  $M_y$  (т.к. в установившемся режиме момент двигателя должен быть равен моменту статической нагрузки), а также рассматривать отклонение от положения равновесия не за счет изменения статического момента, т.е. принять, что  $\Delta M_c = 0$ , то можно воспользоваться уравнением статики  $M_y - M_c = 0$ .

Тогда, заменив в выражении (9)  $d/dt$  на оператор Лапласа  $p$ , уравнение движения примет следующий вид:

$$k_\omega \Delta \omega + k_\varphi \Delta \varphi + k_u \Delta u = J p \Delta \omega. \quad (10)$$

Из (10) можно получить передаточную функцию асинхронного привода между приращением скорости и управляющим воздействием ( $\Delta M_c = 0$ ,  $\Delta u = 0$ ):

$$W_\varphi(p) = \frac{\Delta \omega}{\Delta \varphi} = \frac{k_\partial}{T_M p \pm 1}, \quad (11)$$

где  $k_\partial = k_\varphi / |k_\omega|$ ,  $T_M = J / |k_\omega|$ .

Из (11) видно, что электропривод представляет собой аperiodическое звено, динамические свойства которого зависят от  $k_\omega$ . При  $\omega > \omega_k$ ,  $k_\omega < 0$  – двигатель является устойчивым аperiodическим звеном (в знаменателе ставится «+»). При  $\omega < \omega_k$ ,  $k_\omega > 0$  – двигатель имеет положительный коэффициент жесткости и является неустойчивым звеном первого порядка (в знаменателе ставится «-»). Этот вывод указывает на то, что при  $M_c = const$  нельзя обеспечить устойчивой работы привода в разомкнутых системах при скольжениях, больших критического. Если момент сопротивления зависит от скорости, то его механическая характеристика также обладает определенным коэффициентом жесткости  $k_c$ , при этом условие статической устойчивости принимает вид:

$$k_\omega - k_c < 0.$$

Из изложенного следует, что механические характеристики привода с поворотным статором наилучшим образом удовлетворяют нагрузочному моменту, изменяющемуся по вентиляторному закону.

Передаточная функция электропривода при изменении нагрузки ( $\Delta\varphi = 0, \Delta u = 0$ ) на участке механической характеристики  $\omega_0 < \omega < \omega_k$  имеет вид:

$$W_M(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta M_c} = -\frac{1}{|k_\omega|(T_M p + 1)}.$$

Передаточная функция электропривода при изменении напряжения ( $\Delta\varphi = 0, \Delta M_c = 0$ ) имеет вид:

$$W_u(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta u} = \frac{k_u / |k_\omega|}{(T_M p + 1)}.$$

Структурная схема электропривода с поворотным статором, линеаризованная в окрестности точки установившегося равновесия, представлена на рисунке 2.

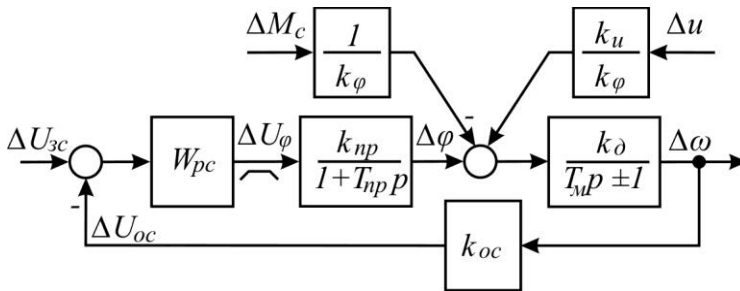


Рисунок 2 – Структурная схема асинхронного электропривода в замкнутой системе

В схеме аperiodическим звеном с коэффициентом передачи  $k_{np}$  и постоянной времени  $T_{np}$  показан вспомогательный электропривод, реализующий функции поворота статора, т.е преобразующий приращение сигнала задания на угол поворота  $\Delta U_\varphi$  в приращение угла поворота  $\Delta\varphi$ . В его качестве можно взять двигатель постоянно-

го тока, работающий в режиме позиционирования. Для исключения статических ошибок по заданию и возмущению (нагрузкой для сервопривода является электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем с вывешенным статором) необходимо применить систему управления с астатизмом по каналам управления и возмущения не менее первого порядка, чему может соответствовать, например, структура электропривода с пропорционально-интегральным регулятором скорости и пропорциональным регулятором положения.

При использовании обратной связи по скорости с помощью пропорционального звена ( $k_{oc}$ ) и применении пропорционального регулятора скорости ( $W_{pc} = k_{pc}$ ) передаточная функция асинхронного электропривода при изменении управляющего воздействия в замкнутой системе примет вид:

$$W(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta U_{зс}} = \frac{k_{pc} k_{np} k_d}{T_{np} T_M p^2 + (T_{np} \pm T_M) p + k_{pc} k_{np} k_d k_{oc} \pm 1}. \quad (12)$$

Передаточная функция электропривода при изменении момента сопротивления:

$$W(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta M_c} = -\frac{k_d (T_{np} p + 1)}{k_\varphi (T_{np} T_M p^2 + (T_{np} \pm T_M) p + k_{pc} k_{np} k_d k_{oc} \pm 1)}. \quad (13)$$

Передаточная функция электропривода при изменении напряжения:

$$W(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta u} = \frac{k_u k_d (T_{np} p + 1)}{k_\varphi (T_{np} T_M p^2 + (T_{np} \pm T_M) p + k_{pc} k_{np} k_d k_{oc} \pm 1)}. \quad (14)$$

Учитывая, что мощность вспомогательного привода не менее, чем на два порядка меньше мощности асинхронного электропривода, можно считать, что постоянная времени  $T_{np} \ll T_M$ , следовательно, как показывает практика настройки регулируемых электроприводов, без большой погрешности для оценки качества регулирования в (12) – (14) можно принять  $T_{np} = 0$ , тогда электропривод будет представлять собой устойчивое аperiodическое звено, если  $k_{pc} k_{np} k_d k_{oc} > 1$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система регулирования, полученная в результате синтеза, выполненного на основании разработанных передаточных функций, определенных аналитически или по экспериментальным данным, еще далека от оптимальной системы. Обусловлено это, прежде всего, не-

полнотой информации о динамике объекта, заложенной в этой модели. С другой стороны неполной является полученная аналитически или экспериментальным путем информация о динамике различных вариантов автоматических регуляторов. Как результат, любой регулятор реализует заданный алгоритм работы лишь приближенно.

Синтез системы регулирования по полученным динамическим характеристикам объекта регулирования и исполнительно-регулирующего устройства в общем случае рассматривается как этап построения оптимальной системы. На этом этапе удается только наметить общую структуру системы регулирования. Окончательно количественные значения параметров настройки системы выбираются уже на действующей системе (работающей при некоторой начальной, пусть даже грубо приближенной, настройке регулятора) в процессе ее наладки и пробной эксплуатации. В результате переходные процессы должны по возможности иметь монотонный или апериодический характер. Эти процессы соответствуют минимальному времени регулирования при отсутствии или минимальном значении перерегулирования. Проведению этих исследований должны предшествовать стендовые испытания автоматической системы регулирования температуры и ее элементов, методика проведения которых приводится в работе [1].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Космодамианский, А.С. Автоматическое регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов: Монография / А.С. Космодамианский. – М.: Маршрут, 2005. – 256 с.
2. Балакирев, В.С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С. Балакирев, Е.Г. Дудников, А.М. Цирлин. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
3. Маковский, В.А. О корректности аппроксимации динамических свойств объектов регулирования передаточной функцией инерционного звена первого порядка с запаздыванием / В.А. Маковский, А.И. Лаврентик // Известия вузов. Энергетика. – 1973. - №10. – С. 87 – 92.
4. Электроприводы вспомогательных механизмов подвижного состава / А.С. Космодамианский [и др.] // Технические, экономические и экологические проблемы транспорта: материалы международной научной конференции, Брянск: БФ РГОТУПС, 2008. Т. 2. – С. 24 – 32.
5. Пугачев, А.А. Регулируемый электропривод вспомогательных агрегатов подвижного состава с асинхронным двигателем, имеющим поворотный статор / А.А. Пугачев // дисс... канд. техн. наук. – Москва. 2009. – 153 с.
6. Кебеде, Н.Д. Специальный двухроторный регулируемый асинхронный с короткозамкнутым ротором электродвигатель/ Н.Д.Кебеде // дисс... канд. техн. наук. – Могилев. 2000. – 125 с.
7. Космодамианский, А.С. Особенности математической модели электропривода с двумя асинхронными двигателями, один из которых содержит поворотный статор / А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев, В.И. Воробьев // Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. - № 1/279 (592) – С. 8 – 13.

#### **Космодамианский Андрей Сергеевич**

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), г. Москва  
Д-р техн. наук, зав. кафедрой «Тяговый подвижной состав» МИИТ  
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9  
E-mail: askosm@yandex.ru

#### **Воробьев Владимир Иванович**

Брянский государственный технический университет (БГТУ), г. Брянск  
Канд. техн. наук, доцент кафедры «Локомотивы» БГТУ  
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7  
8(4832)56-02-61

#### **Пугачев Александр Анатольевич**

Брянский государственный технический университет (БГТУ), г. Брянск  
Канд. техн. наук, доцент кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» БГТУ  
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, д. 7  
8(4832)56-36-02  
E-mail: alexander-pugachev@rambler.ru

#### **Хохлов Алексей Дмитриевич**

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), г. Москва  
Аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» МИИТ  
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

В.В. МАРКОВ

## ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЗНАКОВ И ПАРАМЕТРОВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

*Рассмотрены структура и принцип действия лабораторной установки для экспериментальных исследований признаков и параметров трибосопряжений. Установка предназначена для изучения влияния параметров подшипника и условий его эксплуатации на параметры функции электрического сопротивления. Ее использование позволяет выполнить экспериментальную проверку эффективности диагностических параметров, предложенных при теоретических исследованиях математической модели сопротивления подшипника.*

**Ключевые слова:** лабораторная установка; двухопорный подшипниковый узел; режим эксплуатации; функция электрического сопротивления; подшипник качения.

*The structure and principle work of laboratory mounting for the experimental researches the signs and parameters of friction objects is example. The mounting is intend for the study the influence of inside parameters the bearing and the conditions his exploitation at the parameters the function of electrical resistance. The use of this mounting allow execute of experimental check the effectively of diagnostically parameters, which is be offer by theoretical researches the mathematical model of electrical resistance of rolling bearing.*

**Key words:** laboratory mounting; two-support knot of bearing; regime of exploitation; function of electrical resistance; rolling bearing.

### ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

При подтверждении адекватности разработанной математической модели электрического сопротивления трибосопряжения (на примере подшипника качения) [1, 2] процессам, происходящим в их зонах трения, выявлении взаимосвязи внутренних параметров подшипника и режимов его эксплуатации с параметрами функции электрического сопротивления возникла необходимость в проведении экспериментальных исследований.

Основным фактором, определяющим принципы построения лабораторной установки, обеспечивающей проведение экспериментальных исследований, является необходимость снятия с подшипника электрического сигнала и его последующей обработки [3] в соответствии с поставленными исследовательскими задачами.

При контроле технического состояния подшипника или подшипникового узла без собственного привода, или когда использование собственного привода невозможно (нестабильность частоты вращения, сильные электрические помехи), необходимо использовать специализированное устройство – *механический испытательный стенд*. При этом объект контроля (как правило, подшипниковый узел) устанавливается на центрирующий элемент (для объектов цилиндрической формы – измерительная плита или призма) и фиксируется на нём. С помощью муфты к ротору объекта присоединяют электродвигатель, который также закрепляют на центрирующем элементе. Электродвигатель производит вращение ротора исследуемого объекта с требуемой частотой вращения.

В подшипниковых узлах, как правило, на одном металлическом валу или в одном металлическом корпусе установлено не менее двух подшипников. Поэтому при контроле состояния подшипников электрическими методами возникает проблема выделения информации о конкретном подшипнике из общего сигнала. Для решения этой задачи наиболее часто используют два подхода. Первый заключается в учете разности сопротивлений участков корпуса и вала между подшипниками в узле, а второй – в специальном нагружении подшипникового узла, при котором контролируемый подшипник нагружают требуемым при контроле силовым воздействием, а другой нагружают силовым воздействием, характерным для обычного режима работы узла. В этом случае при обработке суммарного электрического сигнала выделяют его переменную составляющую, которая содержит информацию о пара-

метрах только контролируемого подшипника. Силовое контрольное воздействие может быть создано с помощью блока специализированного радиального нагружения.

Эти известные способы и устройства выделения информации о конкретном подшипнике в узле использованы при проектировании механического испытательного стенда, позволяющего моделировать заданные режимы работы подшипника.

Кроме уже рассмотренных блоков и устройств, лабораторная установка должна содержать *электронный блок*, преобразующий сопротивление подшипника в электрический сигнал и обрабатывающий его в соответствии с поставленными задачами. Входная цепь электронного блока должна поддерживать на подшипнике необходимое значение стабильного тока (1 – 1,5 мкА). Чувствительность электронного блока должна обеспечивать требуемую точность измерения сопротивления. В электронном блоке должны быть предусмотрены каналы измерения частоты вращения колец подшипников и, при необходимости, каналы измерения положения вектора радиальной силы и сепаратора.

### **ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Лабораторная установка (рисунок 1) представляет собой двухопорный подшипниковый узел с электрически изолированными посадочными поверхностями под подшипники качения, дополненный электрическим приводом на основе двигателя постоянного тока, а также устройствами нагружения и измерения частоты вращения вала установки. Структурная схема данной экспериментальной установки приведена на рисунке 2.



*Рисунок 1 – Внешний вид лабораторной установки, коммутатора, токосъёмного устройства, датчиков температуры и положения*

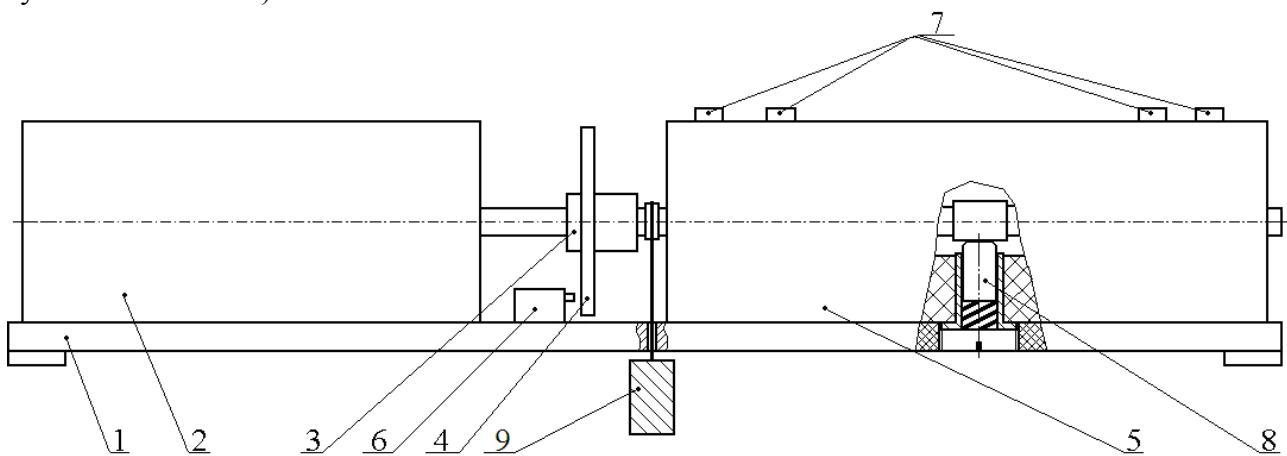
Лабораторная установка обладает следующими техническими характеристиками:

- диапазон регулирования радиальной нагрузки на подшипник, Н: ..... 0-250;
- относительная погрешность задания радиальной нагрузки, %, не более: ..... 2;
- частота вращения вала, мин<sup>-1</sup>: ..... 0-3000;
- габаритные размеры установки, мм: .....500x120x80;

Установка включает в себя следующие составные части:

- основание 1, предназначенное для закрепления основных функциональных частей;
- двигатель 2 постоянного тока, предназначенный для вращения вала подшипникового узла с частотой в диапазоне 0...3000 об/мин;

- муфта 3, обеспечивающая передачу крутящего момента двигателя 2 подшипниковому узлу 5 и установку диска 4;
- сменный диск 4 с черными и белыми секторами – ротор преобразователя частоты 6;
- подшипниковый узел 5, основными элементами которого являются вал, подшипники (2 шт.), сборный корпус, подшипниковые крышки (2 шт.) и сменные шайбы для ступенчатого регулирования осевой нагрузки на подшипники;
- преобразователь 6 частоты, обеспечивающий преобразование частоты вращения диска 4 в электрический сигнал;
- преобразователи 7 температуры, расположенные в различных областях корпуса подшипникового узла;
- токосъемное устройство 8, предназначенное для снятия электрического сигнала с вала подшипникового узла и расположенное внутри устройства;
- устройство 9 для моделирования радиальной нагрузки на вал подшипникового узла;
- источник питания постоянного напряжения (0...30 В) для запуска двигателя (на рисунке 2 не показан).



**Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки**  
**1 – основание; 2 – двигатель; 3 – муфта; 4 – диск; 5 – подшипниковый узел;**  
**6 – преобразователь частоты; 7 – преобразователи температуры;**  
**8 – токосъемник; 9 – устройство нагружения**

Разработанная установка обладает рядом конструктивных особенностей, наделяющих его широкими функциональными возможностями. В перечень этих особенностей входят:

- электрическая развязка наружных колец подшипников, входящих в подшипниковый узел (достигается введением диэлектрической втулки в конструкцию сборного корпуса подшипникового узла 5 и обеспечивает возможность измерения электрических параметров для каждого из подшипников узла);
- электрическая развязка подшипникового узла и двигателя (достигается использованием муфты 3, выполненной из диэлектрического материала, и обеспечивает высокую помехозащищенность электрического метода диагностирования);
- возможность ступенчатого регулирования значения предварительного осевого натяга при сборке узла (достигается использованием сменных шайб различной толщины, устанавливаемых между корпусом подшипникового узла и крышками);
- возможность плавного регулирования частоты вращения вала подшипникового узла (достигается использованием двигателя постоянного тока);
- наличие в корпусе подшипникового узла отверстий для установки преобразователей температуры (позволяют размещать преобразователи температуры в различных областях корпуса и наблюдать распределение температуры во всем его объеме).

В качестве устройства, обеспечивающего поддержание между кольцами испытуемого подшипника постоянного тока силой 1 мкА, используется источник тока, выполненный на основе полевого транзистора; работоспособность источника тока подтверждена предвари-

тельными экспериментальными исследованиями. Для снятия с подшипникового узла электрического сигнала экспериментальная установка оснащена токосъемными устройствами.

Для регистрации значений диагностических параметров предлагается использовать электронный блок, обеспечивающий измерение следующих характеристик:

- температуры поверхностей деталей подшипникового узла,  $^{\circ}\text{C}$ : ..... 0-250;
- частоты вращения вала установки,  $\text{мин}^{-1}$ : ..... 0-3000;
- диагностический параметр НИВ: .....  $10^{-8}$ -1;
- среднее электрическое сопротивление объекта, Ом: .....  $10^3$ - $10^6$ .

Перспективным направлением совершенствования электронного блока лабораторной установки является дополнение её каналом измерения параметров вибрации. Данное техническое решение обеспечит возможность диагностирования трибосопряжений по четырём диагностическим признакам: температуре, среднему сопротивлению, параметру «нормированное интегральное время электрического контактирования» (параметр НИВ), вибрации.

Работа выполнена в соответствии с тематикой научно-исследовательского проекта Рособрнауки (номер государственной регистрации: 01.2.007 05085).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1 Марков, В.В. Методика математического моделирования электрического сопротивления фрикционного контакта при реализации электрорезистивного метода контроля / В.В. Марков // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности. 8-я Международная конференция: Тезисы докладов. Москва, 18-20 марта 2009 г. – М.: ИД «Спектр», 2009. – С.151-152.

2 Марков, В.В. Применение уточнённой математической модели электрического сопротивления фрикционного контакта при создании комплексного диагностического параметра / В.В. Марков, В.В. Семёнов // Известия ОрелГТУ. – Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 2. – С. 102-107.

3 Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.

4 Подмастерьев, К.В. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 томах. // К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Со-снин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий; Под ред. В.В. Клюева. Т. 5: книга 2: Электрический контроль. – М.: Издательский дом «Спектр», 2009. – 732 с. (на английском языке).

#### **Марков Владимир Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»,

г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

Телефон: (4862)41-98-76;

E-mail: pms35vm@yandex.ru

В.И. КОМОВА

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХЕЛАТА ВАНАДИЯ (V) С БГК И N-БФГА В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОДНОАКТИВНОГО КОМПОНЕНТА ЖИДКОСТНОГО ИОНОСЕЛЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДА В ЦЕЛЯХ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ ИОНОВ ВАНАДИЯ (V)

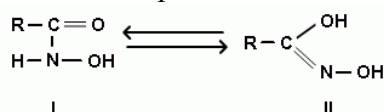
Установлено, что экстракционные системы ванадий(V) – БГК – органический растворитель и ванадий (V) – N-БФГА – органический растворитель проявляют электродную ванадиевую функцию. Крутизна электродной функции близка к нернстовской для двухзарядного иона.

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

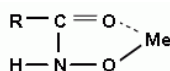
*It is found that the extraction systems of vanadium (V) - BGC - organic solvent and vanadium (V) - N-BFGA - organic solvent demonstrate vanadium electrode function. The steep of electrode function is close to doubly charged ion that is determined by the Nernst equation.*

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

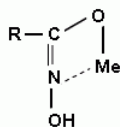
Использование бензгидроксамовой кислоты и N-бензоил-N-фенилгидроксиламина в аналитической химии ванадия является перспективным направлением. Гидроксамовые кислоты содержат один подвижный атом водорода и склонны к таутомерным превращениям:



В литературе имеются данные, согласно которым окрашенные соединения с ионами металлов дает форма I:



Присоединение иона металла приводит к образованию пятичленных хелатных циклов, в которых участвует анионный кислород и нейтральный атом кислорода с двойной связью. Образуются нейтральные, незаряженные комплексы, плохо растворимые в воде, но хорошо растворимые в органических растворителях. Однако наблюдается взаимодействие с ионами металлов и формы II:



В этом случае реагент выступает в виде α-оксимов, донорными атомами в которых являются азот и кислород, что делает такой реагент реагентом «широкого спектра действия».

Реакции ионов металлов с гидроксамовыми кислотами обладают высокой чувствительностью. С аналитических позиций более выгодно рассматривать соединения с ароматическими гидроксамовыми кислотами, обладающими высокой контрастностью. Наиболее часто в литературе упоминается бензгидроксамовая кислота (БГК), что видимо связано с доступностью этого реагента. Имеющиеся в литературе сведения по экстракции ванадия (V) с БГК и N-БФГА позволяют сделать вывод о ценных аналитических свойствах этих реагентов:

- реакции с данными реагентами отличаются высокой чувствительностью;
- реагенты хорошо растворимы в органических растворителях и доступны в практике аналитических лабораторий.



Известно, что чувствительность экстракционно-фотометрических методов определения элементов может быть повышена путем использования смеси растворителей, для извлечения комплексных соединений с органическими лигандами. Часто экстракция смесью растворителей оказывается более эффективной, чем раздельное применение компонентов смеси.

В данной работе было продолжено изучение равновесного фактора в экстракционной системе ванадий (V) – хелатообразующий реагент в смеси растворителей, путем изучения их экстракционных и электродных свойств, с целью разработки ванадийселективного электрода с более низким пределом обнаружения концентрации ионов ванадия (V) в сточных водах промышленных производств.

Нами была изучена экстракция хелата ванадия (V) с N-БФГА из водных растворов органическими растворителями. В качестве растворителей использовали хлороформ, смесь хлороформ-гексанол (2:1) и смесь три-н-бутилфосфат-гексанол (1:6). Количественно экстракцию оценивали по величине коэффициентов распределения, которые были определены как отношение равновесных концентраций ванадия в органической и водной фазах после однократной экстракции в оптимальных условиях комплексообразования. Была снята зависимость коэффициента распределения ванадия (V) от pH водной среды, представленная на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что максимальное извлечение ванадия (V) в органическую фазу наблюдается при pH = 1,0.

Для установления состава экстрагируемого соединения было изучено изменение коэффициентов распределения ванадия (V) от концентрации N-БФГА, представленное на рисунке 2.

Тангенс угла наклона прямолинейного участка графика близок к двум, что позволяет сделать вывод, что в состав комплекса входит 2 молекулы лиганда. Правильность данного вывода подтверждает также зависимость коэффициента распределения от pH водной среды.

Для соединений ионов ванадия (V) с N-БФГА в смеси растворителей развитие максимальной окраски наступает через 5 минут после перемешивания растворов. Нами была снята зависимость оптической плотности экстрактов комплексных соединений ионов ванадия (V) с БГК и N-БФГА от времени. Было установлено, что применение смеси растворителей позволило увеличить устойчивость экстрактов во времени до 10 часов, затем интенсивность окрашивания начинает ослабевать. На основании экспериментально полученных данных были рассчитаны константы экстракции, представленные в таблице 1.

Таблица 1– Физико-химические характеристики комплексного соединения ванадия (V) – N-БФГА – органический растворитель

Реагент	Оптимальная кислотность среды	$\lambda$ , нм опт.	Me:R	lg K <sub>экс.</sub>	Смеси растворителей
N-БФГА	1	530	1:2	6,8	Гексанол-хлороформ (1:2)
				6,6	хлороформ
				6,2	Трибутилфосфат – гексанол (1:6)

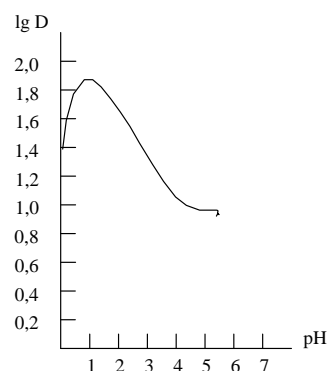


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента распределения ванадия (V) от pH водной фазы  $C_{V(V)} = 1 \cdot 10^{-3}$  моль/л;  $C_{N-БФГА} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  моль/л

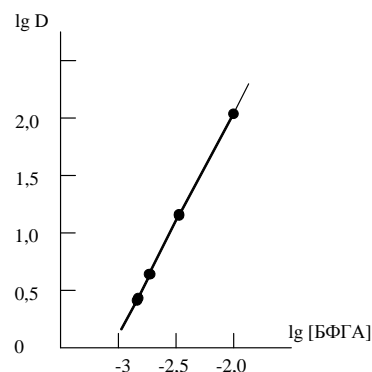
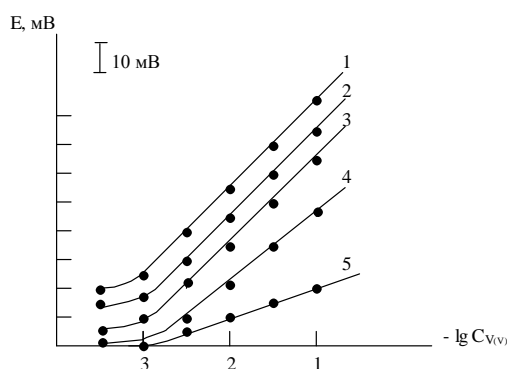


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента распределения ванадия (V) от концентрации N-БФГА в органической фазе pH = 1,0

Рассматривая экстракционное поведение систем ванадий (V) – N-БФГА – органический растворитель, следует отметить, что экстрагирующая способность их достаточно велика и примерно одинакова, как при использовании в качестве растворителя – хлороформа, так и смеси растворителей: три-н-бутилфосфат – гексанол (1:6), гексанол – хлороформ (1:2). Значения  $K_{\text{экс}}$  представлены в таблице 1. Однако устойчивость экстрактов во времени различна. Применение смеси растворителей позволило увеличить устойчивость экстрактов во времени. Для спектрофотометрии – это является положительным фактором, но перед нами не стояла задача разработки экстракционно-фотометрического метода на основе N-БФГА, так как уже такой метод есть, отличающийся высокой избирательностью. Для нас представляло интерес оценить экстрагирующую способность систем ванадий (V) – N-БФГА – органический растворитель с целью использования их в качестве мембран жидкостного ионоселективного электрода на ванадий (V). Полученные константы экстракции порядка  $10^5$  и  $10^6$  позволяют предположить хорошую селективность систем N-БФГА в смеси растворителей к ионам ванадия (V).

На рисунке 3 представлена электродная функция мембранных систем ванадий (V) – N-БФГА – ТБФ – гексанол (1:6); ванадий (V) – N-БФГА – хлороформ; ванадий (V) – N-БФГА – гексанол – хлороформ (1:2).



**Рисунок 3 – Электродная функция мембранных систем, содержащих хелат ванадия (V) с N-БФГА в различных растворителях**

**1 – три-н-бутилфосфат – гексанол (1:6); 2 – хлороформ;**

**3 – гексанол – хлороформ (1:2)**

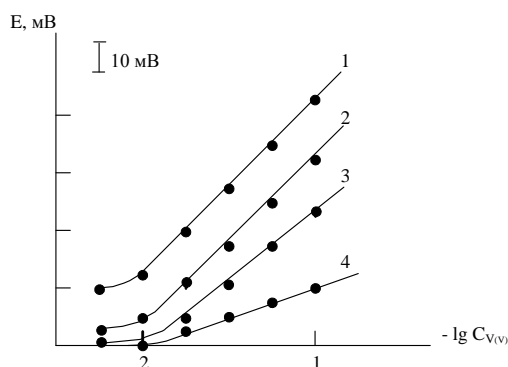
*Только, что приготовленных (кривые 1 – 3);*

*через 2 часа (кривая 4); через 5 часов (кривая 5). pH = 2,6; C\_{хелата} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}*

Из рисунка следует, что данные мембранные системы проявляют ванадиевую функцию в интервале концентраций  $1 \cdot 10^{-1}$  –  $5 \cdot 10^{-3}$  М. Крутизна электродной функции ( $27 \pm 1$  мВ) близка к нернстовской для двухзарядного иона. Однако потенциалы данных систем отличаются большой неустойчивостью. Дрейф потенциала за один час составляет  $\pm 5$  мВ для всех приготовленных жидких мембран. Изменение концентрации электродноактивного соединения в мембране от  $5 \cdot 10^{-2}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  М существенного влияния на характер функции не оказывает, предел обнаружения ванадия (V) при этом также не меняется. Время отклика жидкостных мембран составляет 4 – 6 минут.

Зависимость ЭДС цепи от концентрации ионов ванадия (V) мембранных систем ванадий (V) – БГК – ТБФ и ванадий (V) – БГК – гептанол – четыреххлористый углерод (3:2) показана на рисунке 4.

Концентрационный диапазон выполнения ванадиевой функции находится в пределах  $1 \cdot 10^{-1}$  –  $1 \cdot 10^{-2}$  М. Оптимальное содержание хелата в мембране составляет от  $1 \cdot 10^{-2}$  –  $5 \cdot 10^{-2}$  М. Через два часа наблюдается ухудшение электродных свойств жидкостных мембран, как на основе хелата ванадия (V) с БГК, так и N-БФГА с уменьшением углового коэффициента зависимости ЭДС от  $-\lg C_{V(V)}$  до 20 мВ. Через 5 часов угол наклона электродной функции составляет  $\alpha = 10$  мВ. Через сутки окраска жидкостной мембраны исчезла, потенциалы ее отличались еще большей неустойчивостью.



**Рисунок 4 – Электродная функция мембранных систем, содержащих хелат ванадия (V) с БГК в органических растворителях**  
 1 – три-н-бутилфосфат; 2 – гептанол – четыреххлористый углерод (3:2).  
 Мембраны только, что приготовлены (кривые 1 – 2);  
 через 2 часа (кривая 3), через 5 часов (кривая 4).  $pH = 2,0$ ;  $C_{хелата} = 5 \cdot 10^{-2}$  моль/л

Следовательно, большей устойчивостью из этих двух систем обладает экстракт комплексного соединения ванадия (V) с N-БФГА в смеси органических растворителей. Электродная ванадиевая функция проявляется в диапазоне концентраций  $1 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-3}$  М. Имеющиеся недостатки в работе жидкостной мембраны на основе данной системы, возможно будет устранить при использовании пластифицированной мембраны в ИСЭ. Однако, анализ полученных нами экспериментальных данных показывает, что с практической точки зрения, наибольший интерес представляет использование хелата ванадия (V) с 5,7-дибромоксихинолином в качестве электродноактивного компонента жидкостного ионоселективного электрода для оценки содержания ванадия (V). Время жизни жидкостного электрода составляет 1 месяц [1].

В работе [2] впервые показано, что хелат ванадия (V) с ДБО может быть использован в качестве электродноактивного вещества, а его раствор в смеси растворителей: гексанол – хлороформ (1:2), три-н-бутилфосфат – гексанол (1:6) может быть использован в качестве жидкой мембраны ионоселективного электрода на ванадий (V). Диапазон измеряемых концентраций составляет  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-3}$  М, время отклика жидкостной мембраны составляет 1 – 2 мин. На основе жидкостного ванадийселективного электрода был создан пластифицированный ИСЭ для определения ванадия (V) в сточных водах титано-магниевого производства [3].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 4102454/31-25 СССР. Состав мембраны жидкостного ионоселективного электрода для определения ванадия (V) / В.А. Лугинин, В.И. Комова, А.Л. Грекович, Т.И. Пальникова. – №1392481 А1; заявл. 30.07.86; опубл. 30.04.88.
2. Лугинин, В.А. Определение ионов ванадия (V) в растворе с помощью жидкостного ионоселективного электрода /В.А. Лугинин, В.И. Комова, А.Л. Грекович, Т.И. Пальникова //Вестник Ленинградского Университета. – Серия «Физика, Химия». Выпуск 1, №4. – 1987. – С.95-97.
3. Комова, В.И. Определение ванадия (V) в сточных водах титано-магниевого производства с помощью пленочного ионоселективного электрода /В.И. Комова //Известия ОрелГТУ. – Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» - №4-3/268(535). – 2007. – С. 137-138.

#### Комова Вера Ивановна

Кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия»  
 Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
 Тел. (4862)419892;  
 E-mail: chemistry@ostu.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:*

Орловский государственный технический университет  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 43-48-90  
www.ostu.ru  
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор О.Ю. Григорьева  
Компьютерная верстка О.Ю. Григорьева

Подписано в печать 21.05.2010 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 7,7.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.