

**ВЕСТНИК  
САРАТОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
2003**

**№ 1**

**Научно-технический  
журнал**

Издается с 2003 г.  
Выходит один раз в квартал  
Декабрь 2003 г.

<b>Главный редактор</b>	д.т.н., профессор Ю.В. Чеботаревский
<b>Зам. главного редактора</b>	д.э.н., профессор В.Р. Атоян
<b>Ответственный секретарь</b>	д.т.н., профессор А.А. Игнатъев

**Редакционный совет:** д.э.н. В.Р. Атоян (заместитель председателя), д.т.н. А.И. Волчихин, д.т.н. В.А. Голенков, д.и.н. В.А. Динес, д.х.н. В. Зеленский (Польша), д.т.н. В.А. Игнатъев, д.т.н. В.В. Калашников, д.ф.-м.н. Л.Ю. Коссович, д.т.н. И.А. Новаков, д.т.н. А.Ф. Резчиков, д.т.н. Ю.В. Чеботаревский (председатель), д.ф.-м.н. Ян Аврейцевич (Польша), д.э.н. Улли Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Энтони Мерсер (Великобритания), д.э.н. Эде Соузе Феррейра (Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов.

**Редакционная коллегия:** д.т.н. К.П. Андрейченко, д.т.н. А.И. Андриющенко, д.т.н. Ю.С. Архангельский, д.ф.н. А.С. Борщов, д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. Ю.Г. Ивашенко, д.т.н. Ю.Н. Климочкин, д.т.н. В.А. Коломейцев, д.т.н. А.В. Королев, д.т.н. В.И. Лысак, д.т.н. В.Н. Лясников, д.т.н. В.М. Седелкин, к.ф.-м.н. А.Ю. Слепухин, д.т.н. М.А. Щербаков.

Редактор О.А. Панина  
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой

Адрес редакции:  
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77  
Телефон: (845 2) 52 74 02  
E-mail: vestnik @ sstu. ru; vra @ sstu. ru  
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>  
Факс: (845 2) 50 67 40

Лицензия ИД № 06268 от 14.11.01  
Подписано в печать 15.12.03  
Формат 60×84 1/8 Бум. тип.  
Усл. печ. л. 20,46 Уч.-изд. л. 21,5  
Тираж 500 экз. Заказ 567  
Копипринтер СГТУ,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

ISBN 5-7433-1359-8

© Саратовский государственный  
технический университет, 2003

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

<b>Андрейченко Д.К., Андрейченко К.П., Петрова Т.Ю.</b> Динамическое моделирование неконсервативной дискретно-континуальной системы .....	6
<b>Архипова Н.В., Михайлова А.М., Серянов Ю.В.</b> Теория переходных электрохимических процессов в твердофазных системах с интерфазными слоями.....	16
<b>Ефимов А.В., Чеботаревский Ю.В., Павлов Д.Г.</b> Термоупругопластическое состояние тонкой круглой диэлектрической пластины при локальном нагреве нестационарным источником тепла .....	37
<b>Колпаков В.И.</b> Интерполяционный параболический сплайн для функции из класса $W^3L_\infty(M, a, b)$ , заданной $\delta$ -приближением в $C[a, b]$ .....	43
<b>Крысько В.А., Савельева Н.Е.</b> Стохастическая динамика замкнутых цилиндрических оболочек при неосесимметричном внешнем давлении .....	53

### НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

<b>Денисов А.С., Данилов И.К.</b> Исследование режима диагностирования кривошипно-шатунной группы дизельных двигателей по толщине масляного слоя .....	71
<b>Насад Т.Г.</b> Особенности формирования качества поверхности после высокоскоростной обработки с тепловым воздействием .....	75
<b>Трефилов М.А.</b> Влияние колебаний кузова транспортного средства на освещенность дороги .....	82

### НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

<b>Бекренев Н.В., Лясникова А.В., Трофимов Д.В.</b> Формирование покрытий плазменным напылением с ультразвуковым диспергированием пруткового материала .....	87
<b>Давиденко О.Ю., Решетников М.К.</b> Формообразование рабочих поверхностей деталей подшипника в процессе их совместной имитационной доработки.....	96
<b>Кособудский И.Д., Записс К.В., Ушаков Н.М., Подвигалкин В.Я.</b> Новые электропроводящие нанокompозитные материалы для электроники .....	108
<b>Яковлев А.В., Финаенов А.И., Яковлева Е.В., Забудьков С.Л.</b> Анодный синтез терморасширяющихся соединений графита в азотной кислоте .....	113

### ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

<b>Мельников Г.В., Лобачев М.И., Мельников А.Г.</b> Высокочувствительный импульсный флуориметр для экологического мониторинга окружающей среды .....	121
<b>Михайлова А.М., Никитина Л.В., Колоколова Е.В.</b> Электрохимический газоанализатор на основе протонпроводящих твердых электролитов .....	127
<b>Сивяков Б.К., Беляева Ю.А.</b> Теория спиральной замедляющей системы с азимутально-неоднородным экраном .....	132

### ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>Андрющенко А.И.</b> Современные проблемы теплоэнергетики и важнейшие пути их решения.....	139
--	-----

### ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

<b>Атоян В.Р., Казакова Н.В.</b> Интеллектуальный капитал университетских учебно-научно-инновационных комплексов и его роль в развитии инновационной экономики .....	143
<b>Захаров А.А.</b> Возникновение погрешностей при линейном преобразовании измерительных шкал.....	151
<b>Понукалин А.А.</b> О методологии познания .....	157
<b>Шевченко Н.И., Федюнина С.М.</b> Лингвистический учебно-научный центр как инновационная образовательная структура технического университета .....	166

## CONTENTS

### PROBLEMS OF NATURAL SCIENCES

---

- Andreychenko D.K., Andreychenko K.P., Petrova T.Yu.** Dynamical modelling of non-conservative discrete-continual system ..... 6
- Arkhipova N.V., Mikhailova A.M., Seryanov Yu.V.** The theory of transition electrochemical process in solidphase systems with interphase layers ..... 16
- Efimov A.V., Chebotarevsky Yu.V., Pavlov D.G.** Thermal elastoplastic state of the thin round dielectric plate at local heating by non-stationary heat source ..... 37
- Colpakov V.I.** Interpolating the parabolic spline for function  $W^3L_\infty(M, a, b)$ , set  $\delta$ -approach in  $C[a, b]$  ..... 43
- Krysko V.A., Savelyeva N.E.** Stochastic dynamics of closed cylindrical shells exposed to non-symmetrical external pressure ..... 53

### MACHINE RELIABILITY

---

- Denisov A.S., Danilov I.K.** Model diagnosing research of diesel engine cvark groups on thickness of an oil layer ..... 71
- Nasad T.G.** Peculiar properties of surface forming after high-speed machining with heat influence ..... 75
- Trefilov M.A.** The influence of the oscillations of a vehicle's body on the head lamp lighting ..... 82

### NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES

---

- Bekrenev N.Vu., Lyasnikova A.V., Trofimov D.V.** Formation of coverings by means of plasma spray with ultrasonic dispersion of core material ..... 87
- Davidenko O.Y., Reshetnikov M.K.** The formation of working surfaces of bearing details in the process of their joint imitating finishing ..... 96
- Kosobudsky I.D., Zapsis K.V., Ushakov N.M., Podvigalkin V.Ya.** New nanocomposite materials for electronics ..... 108
- Yakovlev A.V., Finayenov A.I., Yakovleva E.V., Zabud'kov S.L.** Anode synthesis of thermo expanding graphite compounds in nitrogen acid ..... 113

### ELECTRONICS AND INSTRUMENT MARKING

---

- Melnikov G.V., Lobachev M.I., Melnikov A.G.** High sensitive impulse fluorimetre for environmental ecological monitoring ..... 121
- Mikhailova A.M., Nikitina L.V., Kolokolova E.V.** The electrochemical gas-analyzer on the basic proton conductive of the solid electrodes ..... 127
- Siviyakov B.K., Belyaeva Ju.A.** The helical slow-wave structure theory with the azimuth inhomogeneous shield ..... 132

### POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

---

- Andryushchenko A.I.** Modern problems of power system and the major ways of their solution ..... 139

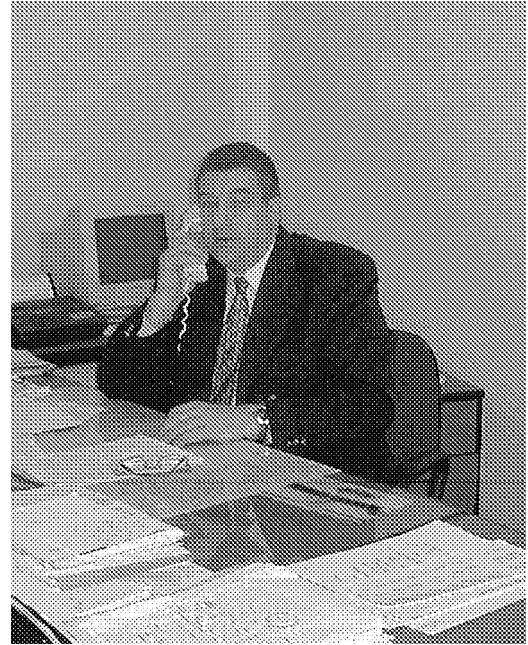
### HUMANITARIAN AND ECONOMICAL PROBLEMS OF MODERN SOCIETY

---

- Atoyan V.R., Kazakova N.V.** The intellectual capital of educational-research-innovative university and its role in the innovation economy development ..... 143
- Zakharov A.A.** Origin of inaccuracy under linear transformation of measuring scales ..... 151
- Ponukalin A.A.** Methodology of cognition ..... 158
- Shevchenko N.I., Fedyunina S.M.** Linguistic educational-scientific centre as an innovative educational structure of the technical university ..... 166

## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Возрождение предлагаемого Вашему вниманию периодического издания отнюдь не случайно, поскольку потребность в печатном органе, на страницах которого был бы представлен широкий спектр научных направлений, существующих в университете, назрела давно. Тем более, что «Вестник» принимает эстафету прежних наших изданий, ведь с 1936 по 1975 год публиковались «Труды», сначала Саратовского автомобильно-дорожного института, а после преобразования вуза – Саратовского политехнического института. Всего увидело свет 94 выпуска «Трудов», в каждом из которых представлены интереснейшие публикации ученых, имеющие большое научное и практическое значение. Кроме того, с 1956 по 1970 год регулярно выходил «Сборник научных сообщений» работников вуза, адресованный специалистам различного профиля, с конкретными рекомендациями по внедрению научных разработок в производство.



Прежде, чем Вы начнете свое знакомство с содержанием этого номера возобновленного периодического издания, давайте поздравим друг друга с тем, что долгожданное, затянувшееся на 30 лет, свидание с ним все-таки состоялось, и выразим уверенность, что отныне все его последующие «собратья» будут радовать нас своим регулярным появлением на многие грядущие десятилетия.

Сегодня трудно отыскать причины, да и стоит ли тратить время на то, чтобы выяснить – почему столько лет научная мысль лучших творческих умов нашего университета искала пристанище на страницах других изданий по всей России и за рубежом. Главное – мы возвращаем достойное место обитания этой мысли в стенах нашей Alma mater.

Давно пора научному сообществу увидеть в совокупности – какой могучий пульс науки бьется в стенах нашего университета, какой весомый научный потенциал сосредоточен здесь и какой широчайший спектр интересов всерьез и глубоко волнует наших ученых – от сугубо технических аспектов до чисто гуманитарных.

Хочу выразить уверенность, что наше издание призовет на свои страницы не только маститых, но и молодых, не только сотрудников нашего университета, но и всех ученых, желающих щедро поделиться тем, что обуревают их пытливые и беспокойные умы.

Любая новаторская мысль, идея и гипотеза, любой полезный опыт, любая крупица выстраданной и добытой истины, – все, что может научить, подсказать и подвигнуть других к поиску, дерзанию и новым открытиям – все это, я уверен, найдет благожелательный прием и достойное место на страницах нашего «Вестника».

И я говорю ему, как живому человеку: «Счастливого и плодотворного тебе пути! Будь искренним, интересным и очень ожидаемым для каждого любознательного читателя!».

Ректор  
Саратовского государственного  
технического университета,  
профессор

Ю.В. Чеботаревский

## ПРОБЛЕМЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

---

УДК 531.36

Д.К. Андрейченко, К.П. Андрейченко, Т.Ю. Петрова

### ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОНСЕРВАТИВНОЙ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*Известны исследования влияния диссипативных сил и сосредоточенных масс на устойчивость неконсервативных континуальных моделей с конечномерной аппроксимацией по первым собственным формам. В предлагаемой работе на примере дискретно-континуальной модели нагруженного следящей силой упруговязкого стержня с абсолютно жестким телом на конце проведено динамическое моделирование устойчивости и импульсных переходных функций системы на основе точного решения уравнений движения.*

D.K. Andreychenko, K.P. Andreychenko, T.Yu. Petrova

### DYNAMICAL MODELLING OF NON-CONSERVATIVE DISCRETE-CONTINUAL SYSTEM

*A study of dissipation power and concentrated masses influence on stability of non-conservative discrete-continual models with finite-dimensional first own forms approximation is being carried out. In this work on the example of discrete-continual models of laden watching power elastico-viscous shank with absolutely hard body on the end dynamic modeling of stability and pulsed connecting system functions on the basis of exact motion equations is being conducted.*

#### 1. Уравнения движения

Пусть упруговязкий прямолинейный однородный стержень длиной  $\ell$ , внутреннее трение в котором учитывается по Фойгту, консольно закреплен в неподвижном основании (рис. 1) и нагружен следящей силой  $P$ . На конце стержня закреплено в центре массы абсолютно жесткое тело с массой  $M$  и моментом инерции  $A$ . Линеаризованные в окрестности нулевого состояния  $Y(Z, T) = \Phi(T) = 0$  уравнения движения рассматриваемой дискретно-континуальной системы (ДКС) под действием малой силы  $F(T)$ ,  $T$  – время, имеют вид

$$M \frac{d^2 Y_1(T)}{dT^2} = N(T) + F(T) \quad , \quad A \frac{d^2 \Phi(T)}{dT^2} = B(T) \quad ,$$

$$\left(1 + h \frac{\partial}{\partial T}\right) EI \frac{\partial^4 Y(Z, T)}{\partial Z^4} + P \frac{\partial^2 Y(Z, T)}{\partial Z^2} + \rho \frac{\partial^2 Y(Z, T)}{\partial T^2} = 0 \quad ,$$

$$Y(0, T) = 0 \quad , \quad \frac{\partial Y(0, T)}{\partial Z} = 0 \quad , \quad Y(\ell, T) = Y_1(T) \quad , \quad \frac{\partial Y(\ell, T)}{\partial Z} = \Phi(T) \quad ,$$

$$N(T) = EI \left(1 + h \frac{\partial}{\partial T}\right) \frac{\partial^3 Y(\ell, T)}{\partial Z^3} \quad , \quad B(T) = -EI \left(1 + h \frac{\partial}{\partial T}\right) \frac{\partial^2 Y(\ell, T)}{\partial Z^2} \quad ,$$

$$T = 0: Y_1(0) = Y(Z, 0) = 0 \quad , \quad \Phi(0) = 0 \quad ,$$

где  $EI$  – жесткость сечения стержня при изгибе;  $\rho$  – погонная плотность стержня;  $h$  – коэффициент внутреннего трения по Фойгту.

Вводя безразмерные переменные и параметры

$$t = T \left(\rho \frac{\ell^4}{EI}\right)^{-1/2} \quad , \quad y = \frac{Y}{\delta} \quad , \quad y_1 = \frac{Y_1}{\delta} \quad , \quad z = \frac{Z}{\ell} \quad ,$$

$$\frac{\delta}{\ell} \ll 1 \quad , \quad \varphi = \frac{\ell}{\delta} \Phi \quad , \quad p = \frac{\ell^2}{EI} P \quad ,$$

$$f = \frac{\ell^3}{EI \delta} F \quad , \quad m = \frac{M}{\rho \ell} \quad , \quad a = \frac{A}{\rho \ell^3} \quad , \quad n = \frac{\ell^3}{EI \delta} N \quad ,$$

$$b = \frac{\ell^2}{EI \delta} B \quad , \quad \gamma = h \left(\rho \frac{\ell^4}{EI}\right)^{-1/2} \quad ,$$

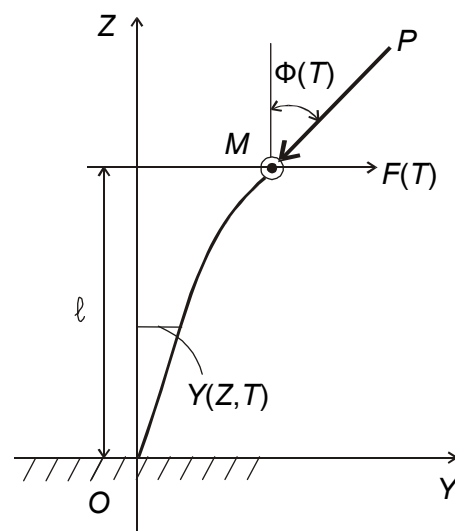


Рис. 1

представим уравнения движения линеаризованной ДКС в безразмерной форме

$$m \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} = n(t) + f(t) \quad , \quad a \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} = b(t) \quad ,$$

$$\left(1 + \gamma \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\partial^4 y(z, t)}{\partial z^4} + p \frac{\partial^2 y(z, t)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 y(z, t)}{\partial t^2} = 0 \quad ,$$

$$z = 0: y(0, t) = \frac{\partial y(0, t)}{\partial z} = 0 \quad , \quad z = 1: y(1, t) = y_1(t) \quad , \quad \frac{\partial y(1, t)}{\partial z} = \varphi(t) \quad , \quad (1.1)$$

$$n(t) = \left(1 + \gamma \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\partial^3 y(1, t)}{\partial z^3} \quad , \quad b(t) = -\left(1 + \gamma \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\partial^2 y(1, t)}{\partial z^2} \quad ,$$

$$t = 0: y_1(0) = \varphi(0) = y(z, 0) = 0 \quad .$$

## 2. Динамическая модель линеаризованной ДКС

Пусть функции  $f(t)$ ,  $y_1(t)$ ,  $\varphi(t)$ ,  $n(t)$ ,  $b(t)$ ,  $y(z,t)$  удовлетворяют условиям существования интегрального преобразования Лапласа по времени  $t$ . Тогда из соотношений (1.1) следуют уравнения линеаризованной ДКС в изображениях

$$m\lambda^2 y_1(\lambda) = n(\lambda) + f(\lambda), \quad a\lambda^2 \varphi(\lambda) = b(\lambda), \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial^4 y(z,\lambda)}{\partial z^4} + \beta(\lambda) \frac{\partial^2 y(z,\lambda)}{\partial z^2} - k^2(\lambda) y(z,\lambda) = 0, \quad (2.2)$$

$$\beta(\lambda) = \frac{p}{1 + \gamma\lambda}, \quad k^2(\lambda) = -\frac{\lambda^2}{1 + \gamma\lambda},$$

$$z = 0 : y(0, \lambda) = \frac{\partial y(0, \lambda)}{\partial z} = 0, \quad z = 1 : y(1, \lambda) = y_1(\lambda), \quad \frac{\partial y(1, \lambda)}{\partial z} = \varphi(\lambda), \quad (2.3)$$

$$n(\lambda) = (1 + \gamma\lambda) \frac{\partial^3 y(1, \lambda)}{\partial z^3}, \quad b(\lambda) = -(1 + \gamma\lambda) \frac{\partial^2 y(1, \lambda)}{\partial z^2}. \quad (2.4)$$

Здесь  $\lambda = \alpha + i\omega$  – произвольный комплексный параметр преобразования Лапласа;  $y_1(\lambda)$ ,  $\varphi(\lambda)$ ,  $n(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$ ,  $y(z,\lambda)$ ,  $f(\lambda)$  – изображения соответствующих оригиналов.

Общее решение однородного обыкновенного дифференциального уравнения (2.2) имеет вид

$$y(z, \lambda) = C_1 \sin_1 z + C_2 \cos r_1 z + C_3 \sinh r_2 z + C_4 \cosh r_2 z, \quad (2.5)$$

$$r_1^2(\lambda) = \frac{\beta(\lambda)}{2} + \left( \left( \frac{\beta(\lambda)}{2} \right)^2 + k^2(\lambda) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad r_2^2(\lambda) = -\frac{\beta(\lambda)}{2} + \left( \left( \frac{\beta(\lambda)}{2} \right)^2 + k^2(\lambda) \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Удовлетворяя граничным условиям (2.3), определяем постоянные интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ . Подставляя известное теперь  $y(z,\lambda)$  в (2.4) и далее в (2.1), получаем изображение сосредоточенных реакций системы, то есть параметров возмущенного движения абсолютно жесткого тела

$$y_1(\lambda) = W_1(\lambda) f(\lambda), \quad \varphi(\lambda) = W_2(\lambda) f(\lambda), \quad W_1(\lambda) = \frac{Q_1(\lambda)}{D(\lambda)}, \quad W_2(\lambda) = \frac{Q_2(\lambda)}{D(\lambda)}, \quad (2.6)$$

$$D(\lambda) = ma\lambda^4 + \left( a \frac{\xi_{11}}{\Delta} + m \frac{\xi_{12}}{\Delta} \right) \gamma \lambda^3 + \left( a \frac{\xi_{11}}{\Delta} + m \frac{\xi_{22}}{\Delta} + \frac{\xi_{11} \xi_{22} - \xi_{12} \xi_{21}}{\Delta^2} \gamma^2 \right) \lambda^2 + 2 \frac{\xi_{11} \xi_{22} - \xi_{12} \xi_{21}}{\Delta^2} \gamma \lambda + \frac{\xi_{11} \xi_{22} - \xi_{12} \xi_{21}}{\Delta^2},$$

$$Q_1(\lambda) = a\lambda^2 + \frac{\xi_{22}}{\Delta} \gamma \lambda + \frac{\xi_{22}}{\Delta}, \quad Q_2(\lambda) = -\frac{\xi_{21}}{\Delta} \gamma \lambda - \frac{\xi_{21}}{\Delta}, \quad \Delta = -v_{11}v_{22} - v_{12}v_{21} \neq 0,$$

$$\xi_{11} = -v_{22}(r_1^3 \cos r_1 + r_1 r_2^2 \cosh r_2) - v_{21}(-r_1^3 \sin r_1 + r_2^3 \sinh r_2),$$

$$\xi_{12} = v_{11}(-r_1^3 \sin r_1 + r_2^3 \sinh r_2) - v_{12}(r_1^3 \cos r_1 + r_1 r_2^2 \cosh r_2),$$

$$\xi_{21} = v_{22}(r_1^2 \sin r_1 + r_1 r_2 \sinh r_2) + v_{21}(r_1^2 \cos r_1 + r_2^2 \cosh r_2),$$

$$\xi_{22} = -v_{11}(r_1^2 \cos r_1 + r_2^2 \cosh r_2) + v_{12}(r_1^2 \sin r_1 + r_1 r_2 \sinh r_2),$$

$$v_{11} = \sin r_1 - \frac{r_1}{r_2} \sinh r_2, \quad v_{12} = \cos r_1 - \cosh r_2,$$

$$v_{21} = r_1 v_{12}, \quad v_{22} = r_1 \sin r_1 + r_2 \sinh r_2.$$

Здесь  $D(\lambda)$  – характеристический квазимногочлен;  $Q_1(\lambda)$  и  $Q_2(\lambda)$  – возмущающие квазимногочлены;  $W_1(\lambda)$  и  $W_2(\lambda)$  – сосредоточенные передаточные функции в форме квазирациональных дробей.

Вводя далее известные согласно (2.6) изображения сосредоточенных реакций  $y_1(\lambda)$  и  $\varphi_1(\lambda)$  в соотношения для постоянных интегрирования  $C_1, C_2, C_3, C_4$  и подставляя в решение (2.5), получаем изображение распределенной реакции системы, то есть изгибного движения стержня

$$y(z, \lambda) = W(z, \lambda) f(\lambda), \quad W(z, \lambda) = \frac{Q(z, \lambda)}{D(\lambda)}, \quad (2.7)$$

$$Q(z, \lambda) = \frac{a}{\Delta} [-\mu_1(z, \lambda)v_{22} - \mu_2(z, \lambda)v_{21}] \lambda^2 + \\ + \frac{1}{\Delta^2} [\mu_1(z, \lambda)(v_{12} \xi_{21} - v_{22} \xi_{22}) - \mu_2(z, \lambda)(v_{11} \xi_{21} + v_{21} \xi_{22})] (\gamma \lambda + 1),$$

$$\mu_1(z, \lambda) = \sin r_1 z - \frac{r_1}{r_2} \sinh r_2 z, \quad \mu_2(z, \lambda) = \cos r_1 z - \cosh r_2 z,$$

где  $Q(z, \lambda)$  – распределенный возмущающий квазимногочлен;  $W(z, \lambda)$  – распределенная передаточная функция.

Заметим, что сосредоточенные передаточные функции  $W_1(\lambda), W_2(\lambda)$  и распределенная передаточная функция  $W(z, \lambda)$  являются изображениями соответственно сосредоточенных по выходам  $y_1(\lambda), \varphi(\lambda)$  импульсных переходных функций  $q_1(t), q_2(t)$  и распределенной по выходу  $y(z, t)$  импульсной переходной функции  $q(z, t)$  линеаризованной ДКС, возмущенной функцией Дирака  $f(t) = \delta(t)$ . При этом  $Q(1, \lambda) = Q_1(\lambda), W(1, \lambda) = W_1(\lambda)$ .

Выражения (2.6), (2.7) определяют ДКС с динамической моделью стержня, где весь бесконечный спектр собственных частот и форм колебаний стержня учитывается через переменные коэффициенты  $\xi_{vj} \Delta^{-1}, (v, j = 1, 2), \mu_1(z, t)v_{22} \Delta^{-1}, \mu_2(z, t)v_{21} \Delta^{-1}, \mu_1(z, \lambda)(v_{12} \xi_{21} - v_{22} \xi_{22}) \Delta^{-2}, \mu_2(z, \lambda)(v_{11} \xi_{21} + v_{21} \xi_{22}) \Delta^{-2}$ .

### 3. Устойчивость и импульсные переходные функции динамической модели неконсервативной ДКС

Исследуем устойчивость динамической модели (2.6). Заметим, что функции  $\xi_{vj}(\lambda) \Delta(\lambda)^{-1}, (v, j = 1, 2)$  аналитичны по крайней мере на мнимой оси и в правой половине комплексной плоскости  $\lambda = \alpha + i\omega$ , при этом

$$\frac{\xi_{vj}(-i\omega)}{\Delta(-i\omega)} = \frac{\xi_{vj}(i\omega)}{\Delta(i\omega)}, \quad (v, j = 1, 2) \quad (3.1)$$

и существуют пределы

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{\xi_{vj}}{\Delta \lambda^{\beta_{vj}}} = b_{vj} \quad \text{при } |\lambda| \rightarrow \infty, \quad |\alpha| < \infty, \quad \omega \rightarrow \infty, \\ \beta_{11} = \frac{3}{4}, \quad b_{11} = \sqrt{2} e^{i \frac{3\pi}{8}} \gamma^{-\frac{3}{4}}, \quad \beta_{12} = \frac{1}{2}, \quad b_{12} = e^{i \frac{\pi}{8}} \gamma^{-\frac{1}{2}},$$



$$\beta_{21} = \frac{1}{2}, \quad b_{21} = e^{i\frac{5\pi}{4}} \gamma^{-\frac{1}{2}}, \quad \beta_{22} = \frac{1}{4}, \quad b_{22} = \sqrt{2} e^{i\frac{\pi}{8}} \gamma^{-\frac{1}{4}}. \quad (3.2)$$

В соответствии с условием (3.1) справедливы равенства

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} D(-i\omega) = \operatorname{Re} D(i\omega), \quad \operatorname{Im} D(-i\omega) = -\operatorname{Im} D(i\omega), \quad \operatorname{Re} Q_j(-i\omega) = \operatorname{Re} Q_j(i\omega), \\ \operatorname{Im} Q_j(-i\omega) = -\operatorname{Im} Q_j(i\omega), \quad (j=1,2). \end{aligned} \quad (3.3)$$

Согласно (3.2) существуют также действительные числа  $\chi$ ,  $\beta$  и  $\sigma$ , что

$$\begin{aligned} \lim_{|\lambda| \rightarrow \infty} \frac{D(\lambda)}{\lambda^{n+\chi}} = c_0, \quad \lim_{|\lambda| \rightarrow \infty} \frac{Q_1(\lambda)}{\lambda^{k+\beta}} = c_1, \quad \lim_{|\lambda| \rightarrow \infty} \frac{Q_2(\lambda)}{\lambda^{s+\sigma}} = c_2, \quad \text{при } |\lambda| \rightarrow \infty, \quad |\alpha| < \infty, \quad \omega \rightarrow \infty, \\ n + \chi > k + \beta + 1, \quad n + \chi > s + \sigma + 1, \quad |c_1| < \infty, \quad |c_2| < \infty, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где  $n, k, i$  – целые степени, а  $\chi, \beta, \sigma$  – приращение степеней квазимногочленов соответственно  $D(\lambda), Q_1(\lambda), Q_2(\lambda)$  при  $|\lambda| \rightarrow \infty$ .

Отметим случаи, в которых соотношения (3.4) выполняются

- 1) если  $a \neq 0, m \neq 0, \gamma \neq 0$ , то  $n=4, \chi=0, c_0=ma, k=2, \beta=0, c_1=a, s=1, \sigma=1/2, c_2=-b_{21}\gamma,$
- 2) если  $a=0, m \neq 0, \gamma \neq 0$ , то  $n=3, \chi=1/2, c_0=m\gamma b_{12}, k=1, \beta=1/4, c_1=b_{22}\gamma,$   
 $s=1, \sigma=1/2, c_2=-b_{21}\gamma,$
- 3) если  $a=0, m=0, \gamma \neq 0$ , то  $n=2, \chi=1, c_0=(b_{11}b_{22}-b_{12}b_{21})\gamma^2, k=1, \beta=1/4,$   
 $c_1=b_{22}\gamma, s=1, \sigma=1/2, c_2=-b_{21}\gamma.$

$$(3.5)$$

Таким образом, в случаях (3.5) соотношения (3.4), (3.3) выполняются и по известному определению [4,5] рассматриваемые квазирациональные дроби  $W_1(z, \lambda) = Q_1(z, \lambda)/D(\lambda), W_2(z, \lambda) = Q_2(z, \lambda)/D(\lambda)$  являются физически возможными. Кроме того, функции  $D(\lambda), Q_1(\lambda)$  и  $Q_2(\lambda)$  аналитичны на мнимой оси и в правой половине комплексной плоскости ( $\lambda$ ). Следовательно, в соответствии с теоремами [4,5] об устойчивости квазирациональных дробей динамическая модель (2.6) является асимптотически устойчивой, если характеристический квазимногочлен  $D(\lambda)$  устойчивый, то есть все его корни лежат слева от мнимой оси, на комплексной плоскости ( $\lambda$ ). Если хотя бы один корень квазимногочлена  $D(\lambda)$  лежит справа от мнимой оси комплексной плоскости ( $\lambda$ ), то динамическая модель (2.6) неустойчивая. Так как функция  $D(\lambda)$  аналитична на мнимой оси и в правой половине комплексной плоскости  $\lambda = \alpha + i\omega$ , то согласно (3.3), (3.4) выполняются условия

$$\forall \alpha \geq 0 : \lim_{|\lambda| \rightarrow \infty} \left( \frac{D(i\omega)}{\lambda^{n+\chi}} \right) = c_0 \neq 0,$$

$$\forall \omega \in (-\infty, \infty) : D(i\omega) = u(\omega) + iv(\omega) \neq 0, \quad u(-\omega) = u(\omega), \quad v(\omega) = -v(-\omega).$$

Тогда по теореме об устойчивости квазимногочлена [4] все корни квазимногочлена  $D(\lambda)$  будут расположены левее мнимой оси комплексной плоскости ( $\lambda$ ), если при монотонном возрастании  $\omega$  от 0 до  $\infty$  вектор  $D(i\omega)$  повернется на плоскости  $(u, iv)$  от положительной действительной полуоси в положительном направлении на угол  $(n + \chi)\frac{\pi}{2}$ , то есть получит приращение аргумента

$$\phi = \Delta_{0 \leq \omega < \infty} \arg D(i\omega) = (n + \chi)\frac{\pi}{2}. \quad (3.6)$$

Из доказательства [4] указанной теоремы следует, что в случае неустойчивого квазимногочлена  $D(\lambda)$  при расположении  $N$  его корней в правой полуплоскости ( $\lambda$ ) вектор  $D(i\omega)$  получит приращение аргумента

$$\phi = \Delta_{0 \leq \omega < \infty} \arg D(i\omega) = (n + \chi) \frac{\pi}{2} - N\pi . \quad (3.7)$$

Обратимся теперь к распределенной динамической модели (2.7). Как видно, в любой фиксированной точке  $z_j \in (0, 1]$  срединной линии стержня имеет место:  $y_j(\lambda) = W_j(\lambda) f(\lambda)$ ,  $W_j(\lambda) = Q_j(\lambda) / D(\lambda)$ ,  $Q_j(\lambda) = Q_j(z_j, \lambda)$ . Все рассуждения относительно устойчивости квазирациональных дробей  $W_1(\lambda)$  и  $W_2(\lambda)$  будут справедливы и для квазирациональных дробей  $W_j(\lambda)$ .

Следовательно, динамическая модель рассматриваемой линейризованной неконсервативной ДКС в случаях (3.5) является асимптотически устойчивой, если выполняется равенство (3.6) и все корни квазимногочлена  $D(\lambda)$  лежат на плоскости ( $\lambda$ ) слева от мнимой оси. Более того, расположение годографа вектора  $D(i\omega) = u(\omega) + iv(\omega)$  на плоскости ( $u, iv$ ) при  $0 \leq \omega < \infty$  в зависимости от возрастающей следящей силы  $p$  позволяет судить о границе области асимптотической устойчивости, которой соответствует критическое значение следящей силы  $p = p^*$ . При  $p > p^*$  система неустойчива, корни характеристического квазимногочлена  $D(\lambda)$  переходят в правую половину комплексной плоскости ( $\lambda$ ) и число  $N$  этих корней можно определить по соотношению (3.7).

Заметим, что в случае  $\gamma = 0$  условия (3.4) не выполняются и квазирациональные дроби  $W_1(\lambda)$  и  $W_2(\lambda)$  не являются физически возможными. Это согласуется с известным выводом [2] о том, что модель неконсервативной системы при  $\gamma = 0$  неадекватна и ей соответствует квазикритическая сила, отличная от истинной критической силы  $p^*$ , вычисляемой при  $\gamma \neq 0$ . Далее в работе приведены результаты анализа динамической модели (2.6) по передаточной функции  $W_1(\lambda) = Q_1(\lambda) / D(\lambda)$  в случаях (3.5) при  $\gamma \neq 0$ .

На рис. 2 приведены частотные годографы вектора  $D(i\omega)$ ,  $0 \leq \omega < \infty$  на плоскости ( $u, iv$ ) в зависимости от величины следящей силы  $p$ , для случая упруговязкого стержня с абсолютно жестким телом на конце,  $\gamma = 0, 1$ ,  $m = 1$ ,  $a = 0, 4$ ,  $n = 4$ ,  $\chi = 0$ . При  $p = 3, 13 < p^*$  (1) согласно (3.6) имеем  $\phi = 2\pi$  и система асимптотически устойчива. При  $p = p^* = 4, 13$  (2) линия годографа проходит через точку (0,0) и система находится на границе устойчивости. При  $p = 5, 13 > p^*$  (3) имеем  $\phi = 0$ , то есть согласно (3.7) два корня характеристического квазимногочлена  $D(\lambda)$  перешли в правую половину комплексной плоскости ( $\lambda$ ) и система стала неустойчивой. Аналогично для случая упруговязкого стержня с сосредоточенной массой на конце  $\gamma = 0, 1$ ,  $m = 1$ ,  $a = 0$ ,  $n = 3$ ,  $\chi = 0, 5$  показаны годографы вектора  $D(i\omega)$ ,  $0 \leq \omega < \infty$  асимптотически устойчивой при  $p = 5, 263 < p^* = 8, 263$   $\phi = \frac{7\pi}{4}$  (4) системы, далее системы на границе устойчивости при  $p = p^* = 8, 263$  (5) и неустойчи-

вой при  $p = 11, 263 > p^* = 8, 263$ ,  $\phi = -\frac{\pi}{4}$  (6) системы. В случае упруговязкого стержня без груза на конце  $\gamma = 0, 1$ ,  $m = 0$ ,  $a = 0$ ,  $n = 2$ ,  $\chi = 1$ , как видно по годографам  $D(i\omega)$ , при  $p = 10, 38 < p^* = 13, 64$ ,  $\phi = -\frac{3\pi}{2}$  (7) стержень асимптотически устойчив, при  $p = p^* = 13, 64$  (8) на границе устойчивости и

при  $p = 15, 38 > p^* = 13, 64$ ,  $\phi = -\frac{\pi}{2}$  (9) стержень неустойчив. Все рассмотренные выше годографы,  $D(i\omega)$  приведены в специальном масштабе  $u + iv = D(i\omega) (\text{Arsh } |D(i\omega)|) / |D(i\omega)|$ .

На рис. 3 построены линии границ областей устойчивости при различных коэффициентах внутреннего трения  $\gamma = 0, 01; 0, 1; 0, 2; 0, 3$  для стержня с сосредоточенной массой  $m$  на конце при  $a = 0$  (1) на плоскости параметров ( $m, p$ ).

Области устойчивости расположены ниже соответствующих линий. Как видно, увеличение массы  $m$  и уменьшение коэффициента внутреннего трения  $\gamma$  снижают значение критической следящей силы  $p^*$  и существенно уменьшают область устойчивости. Однако при

$\gamma=0,01$  область устойчивости достигает своего асимптотического наименьшего значения и при дальнейшем уменьшении  $\gamma$  до исчезающе малого значения  $\gamma=0,0001$  линия границы области устойчивости остается практически неизменной. Заметим, что при  $m=0$  и  $\gamma=0,0001$  критическая сила имеет значение  $p^*=10,96$ , которое на 17,5% превосходит критическую [3] силу  $p^*=9,328$ , вычисленную на основе приближенной модели с аппроксимацией по двум первым собственным формам.

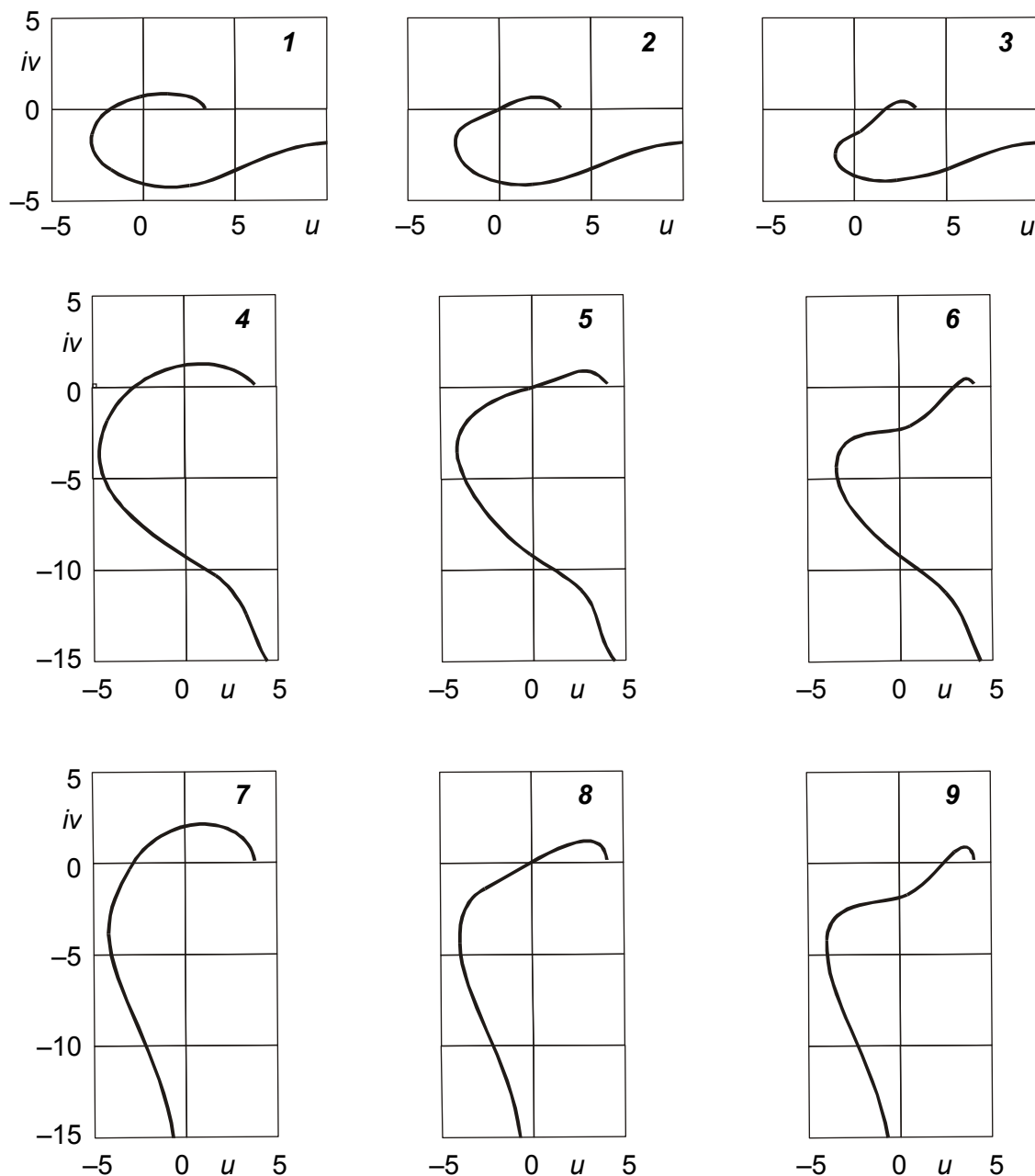


Рис. 2

Для стержня с закрепленным на конце абсолютно жестким телом массой  $m=1$  и моментом инерции  $a \in [0,1]$  на плоскости параметров  $(a, p)$  приведены (2) границы областей устойчивости при различных коэффициентах  $\gamma$ . Как видно, уменьшение  $\gamma$  и увеличение  $a$  су-

щественно уменьшают значение критической следящей силы. Например,  $p^*=3,7$  при  $m=1$ ,  $a=1$ .

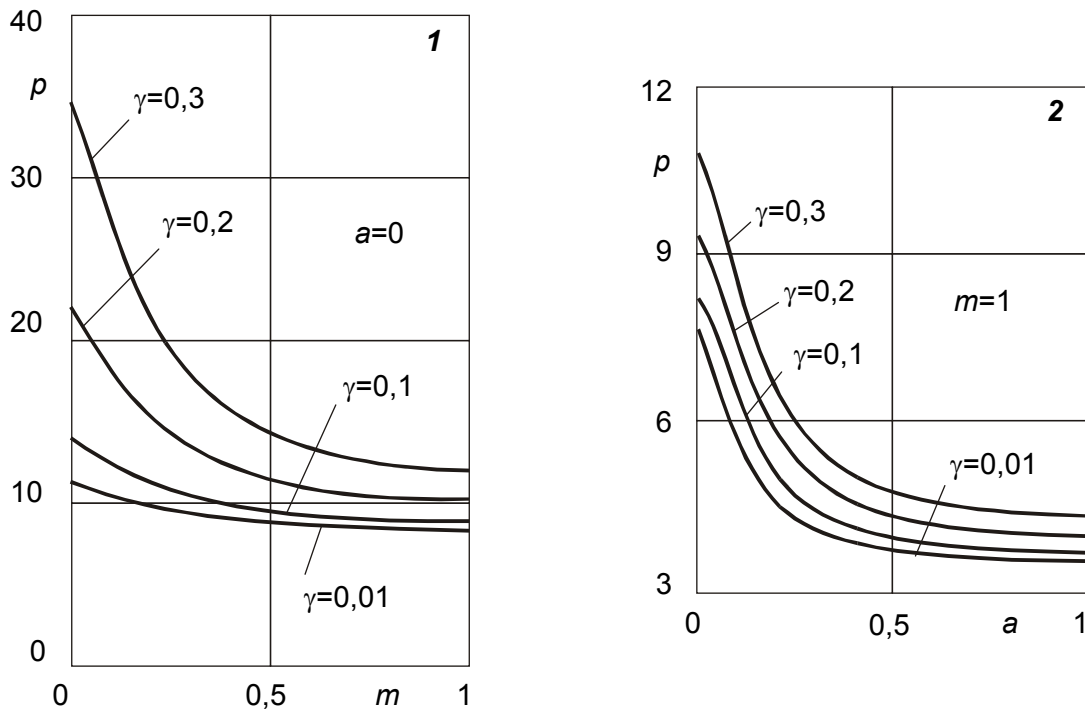


Рис. 3

Пусть  $f(t)=\delta(t)$  – функция Дирака. Тогда реакция ДКС по выходу  $y_1(t)$  на данное возмущение есть сосредоточенная импульсная переходная функция, которая была обозначена ранее через  $q_1(t)$ . Так как передаточная функция  $W_1(\lambda)$  есть изображение сосредоточенной импульсной переходной функции  $q_1(t)$  (интеграл Лапласа) с абсциссой абсолютной сходимости  $\alpha=\sigma$ , то используя интеграл Меллина, имеем

$$q_1(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\alpha_0-i\infty}^{\alpha_0+i\infty} W(\lambda) e^{\lambda t} d\lambda, \quad \alpha_0 > \sigma, \quad t \geq 0. \quad (3.8)$$

С помощью эффективного алгоритма [6] были вычислены сосредоточенные импульсные переходные функции  $q_1(t)$  в зависимости от коэффициента  $\gamma=0,0001; 0,01; 0,1$  внутреннего трения в стержне в случаях асимптотически устойчивой системы ( $p < p^*$ ) и системы на границе устойчивости ( $p = p^*$ ) при различных вариантах груза, а также без груза на конце стержня. На рис. 4 приведены вычисленные импульсные переходные функции. Для стержня без груза ( $m=a=0$ ) на конце стержня, при  $p=8$  в случаях  $\gamma=0,0001$  (1),  $\gamma=0,01$  (2),  $\gamma=0,1$  (3) импульсные переходные функции (первые три графика) асимптотически устойчивы. Увеличение коэффициента  $\gamma$  приводит к сглаживанию высокочастотных форм, уменьшению амплитуды колебаний и времени переходного процесса. При  $p=p^*=10,96$ ,  $\gamma=0,0001$  (4);  $p=p^*=10,96$ ,  $\gamma=0,01$  (5);  $p=p^*=13,63$ ,  $\gamma=0,1$  (6) (следующие три графика) на границе устойчивости импульсные переходные функции принимают форму незатухающих колебаний.

При  $\gamma=0,01$  амплитуда высокочастотных форм пренебрежимо мала и конец стержня колеблется на основной форме с амплитудой 300 и частотой 0,85. При  $\gamma=0,0001$  амплитуда

высокочастотных форм достигает величины 100 и, следовательно, амплитуда незатухающей импульсной переходной функции возрастает до величины 400.

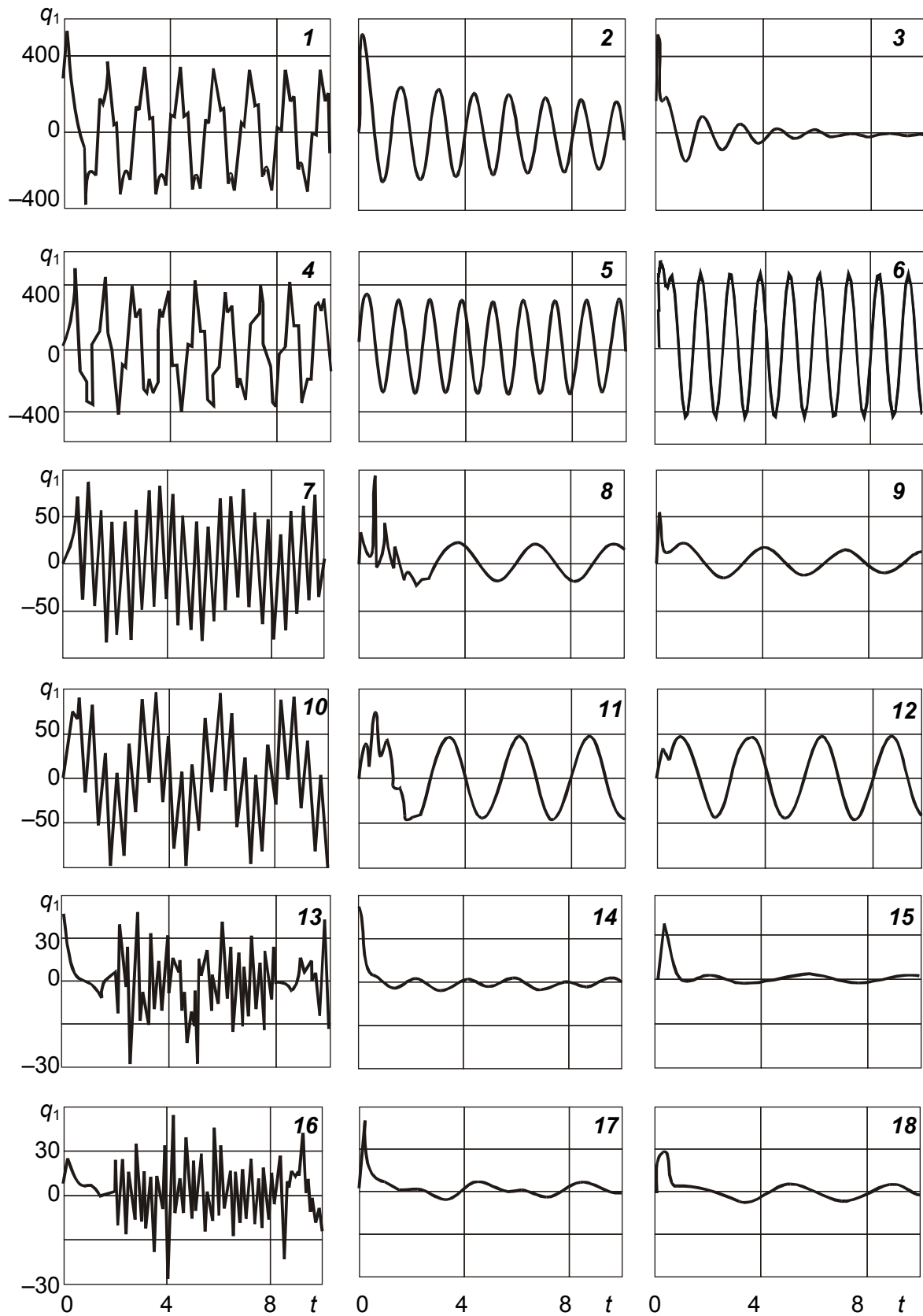


Рис. 4

Для стержня с сосредоточенной массой  $m=1$ ,  $a=0$  на конце приведены при  $p=6 \leq p^*$  для случаев  $\gamma=0,0001$  (7),  $\gamma=0,01$  (8),  $\gamma=0,1$  (9) асимптотически устойчивые импульсные переходные функции, а также импульсные переходные функции на границе устойчивости для случаев  $p=p^*=7,9$ ,  $\gamma=0,0001$  (10);  $p=p^*=7,9$ ,  $\gamma=0,01$  (11);  $p=p^*=8,26$ ,  $\gamma=0,1$  (12). Аналогично для стержня с абсолютно жестким телом  $m=1$ ,  $a=0,4$  на конце приведены при  $p=3 < p^*$  для случаев  $\gamma=0,0001$  (13),  $\gamma=0,01$  (14),  $\gamma=0,1$  (15) асимптотически устойчивые импульсные переходные функции, а также импульсные переходные функции для случаев  $p=p^*=4$ ,  $\gamma=0,0001$  (16);  $p=p^*=4$ ,  $\gamma=0,01$  (17);  $p=p^*=4,13$ ,  $\gamma=0,1$  (18) на границе устойчивости.

Из приведенных на рис. 4 графиков видно, что увеличение коэффициента внутреннего трения  $\gamma$  сглаживает высокочастотные формы колебаний, а увеличение следящей силы  $p$  приводит к некоторому увеличению частоты и амплитуды основной (нижней) формы колебаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. М.: Физматгиз, 1961. 339 с.
2. Болотин В.В., Гришко А.А., Петровский А.П. О влиянии демпфирующих сил на послекритическое поведение существенно непотенциальных систем // Известия РАН. МТТ. 1995. № 2. С.158-167.
3. Агафонов С.А. Стабилизация параметрическим возбуждением упруговязкого стержня, находящегося под действием следящей силы // Известия РАН. МТТ. 1996. № 2. С.138-141.
4. Андрейченко К.П., Андрейченко Д.К., Смарунь А.Б. Динамическое моделирование линейных дискретно-континуальных систем // ПММ. 2000. Т.64. Вып.2. С.183-195.
5. Андрейченко Д.К., Андрейченко К.П. К теории комбинированных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 2000. № 3. С.54-69.
6. Андрейченко Д.К. Эффективный алгоритм численного обращения интегрального преобразования Лапласа // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2000. Т.40. № 7. С.1030-1044.

**Андрейченко Дмитрий Константинович** –

доктор технических наук, доцент кафедры «Механика и прикладная информатика»  
Саратовского государственного технического университета

**Андрейченко Константин Петрович** –

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Прикладная математика и теория навигационных приборов»  
Саратовского государственного технического университета

**Петрова Татьяна Юрьевна** –

аспирант кафедры «Прикладная математика и теория навигационных приборов»  
Саратовского государственного технического университета.

УДК 541.135

Н.В. Архипова, А.М. Михайлова, Ю.В. Серянов

**ТЕОРИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ТВЕРДОФАЗНЫХ СИСТЕМАХ С ИНТЕРФАЗНЫМИ СЛОЯМИ**

*Представлена теория переходных электрохимических процессов при гальваностатическом, потенциостатическом, потенциодинамическом включении границы электродов с ТЭЛ при образовании сплошных зернисто-пористых и монослойных интерфаз.*

N.V. Arkhipova, A.M. Mikhailova, Yu.V. Seryanov

**THE THEORY OF TRANSITION ELECTROCHEMICAL PROCESS  
IN SOLIDPHASE SYSTEMS WITH INTERPHASE LAYERS**

*The theory of transition electrochemical process with galvanicstatic, potentiostatic, potentiodynamic inclusion of electrode end with solid electrolyte to form continuous grain-porous and monolayer interphase is represented in this work.*

Достаточно часто на контактах твердых электролитов с электродами возникают переходные слои, отличающиеся по своим электрофизическим свойствам от объема твердого электролита [1]. Образование таких слоев может лимитировать кинетику анодных и катодных процессов, причем наиболее вероятно их зернистая структура, ядра которой растут при контроле диффузией или электрохимической реакцией. Тем самым, если функциональные электрохимические характеристики твердоэлектролитного прибора сосредоточены в пределах переходного слоя, то можно констатировать топоэлектрохимический принцип работы этого устройства. Топоэлектрохимические реакции являются малоизученными, хотя именно такой механизм можно считать установленным для процессов химического осаждения металлов [2] и их фосфатирования [3, 4]. Наиболее вероятно, что преобладание топокинетических закономерностей в этих случаях определяется большей эффективностью сферической диффузии к растущим ядрам новых фаз по сравнению с линейной диффузией к обрабатываемой поверхности [5]. Ярким проявлением топокинетического эффекта в жидкофазных электролитах служит рост «усов» и «дендритов» при гальваническом осаждении металлов на плотностях катодных токов, превышающих предельные плотности токов линейной диффузии, когда необходимый ионный поток обеспечивается диффузией разряжающихся катионов металлов к полусферическим вершинкам растущих новообразований [6, 7] и т. д.

Очевидно, что подобные представления можно распространить и на рост переходного слоя в твердом электролите. Для краткости изложения при обозначении переходного слоя мы будем использовать аббревиатуру *SEI Solid Electrolyte Interphase* [8].

Кроме этого, условимся называть процессы, протекающие с замедленным переносом заряда – *E*-процессами, замедленной диффузией – *D*-процессами, замедленной химической реакцией – *C*-процессами и замедленной адсорбцией – *A*-процессами.

**1. Переходные процессы при гальваностатическом включении (хронопотенциометрия)****1.1. *E*-хронопотенциометрия**

В этом случае задаваемая импульсным гальваностатом плотность тока является «кинетической» и обозначается как  $i_E$ . Очевидно, что она не зависит от структуры и толщины *SEI* и для простейшей электрохимической реакции типа [9, 10]:



$$A + z\bar{e} \rightleftharpoons B \quad (1)$$

плотность «кинетического» тока выражается через плотность тока обмена  $i_0$ , перенапряжения  $\eta$  и эффективные коэффициенты переноса  $\alpha^*$  и  $\beta^*$  анодного и катодного процессов:

$$i_e = i_0 \left( e^{\frac{\alpha^* F \eta}{RT}} - e^{-\frac{\beta^* F \eta}{RT}} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha^* = (z-y)/v - 1 + \alpha$ ,  $\beta^* = y/v + \beta$ ,  $\alpha + \beta = 1$  – коэффициенты переноса,  $\alpha^* + \beta^* = z/v$ ,  $y \leq z$  – число быстрых равновесных стадий одноэлектронного переноса, предшествующих замедленной стадии;  $v$  – число повторений замедленной стадии (стехиометрическое число Гориути).

Если считать, что сопротивление и емкость твердого электролита (ТЭЛ) сосредоточены в пределах  $SEI$ , то постоянная времени заряда составит  $\tau_{SEI} = R_{SEI} \cdot C_{SEI}$ , сам заряд описывается обычным уравнением:

$$\eta(t) = (\eta - i_E R_{SEI}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{SEI}}} \right), \quad (3)$$

где  $t$  – время заряда;  $\eta$  – установившееся перенапряжение;  $i_E R_{SEI}$  – омическое перенапряжение. Последнее может быть элиминировано с помощью применения специальной электронной приставки или, при известном  $R_{SEI}$ , расчетным путем.

При очень малых временах величина  $i_E R_{SEI}$  может быть зафиксирована по высоте начального броска  $\eta(t)$ , который не просвечивается на экране электронно-лучевого осциллографа (рис. 1).

При малых временах  $t \ll \tau_{SEI}$  получается линейный рост  $\eta(t)$  с  $t$ :

$$\eta(t) = \eta \frac{t}{\tau_{SEI}}, \quad (4)$$

откуда по угловому коэффициенту наклона можно определить емкость переходного слоя:

$$C_{SEI} = \frac{\eta}{R_{SEI}} \left( \frac{d\eta(t)}{d\tau} \right)_{\tau \rightarrow 0}^{-1}. \quad (5)$$

Если переходный слой изначально отсутствовал на контакте электрода с ТЭЛ, то по  $E$ -хронопотенциогаммам можно найти сопротивление ТЭЛ  $R_{el}$ , емкость двойного электрического слоя (ДЭС)  $C_{del}$  (или емкость области пространственного заряда  $C_{sc}$ ) и фарадеевское сопротивление межфазной границы  $R_F$  по соотношениям:

$$C_{del} = \frac{h}{R_{el}} \left( \frac{d\eta(t)}{d\tau} \right)_{\tau \rightarrow 0}^{-1}, \quad (6)$$

$$R_F = \left. \frac{d\eta}{di_E} \right|_{\eta \rightarrow 0} = \frac{vRT}{i_0 zF}. \quad (7)$$

Следует отметить, что из-за применения осциллографической съемки  $E$ -хронопотенциогаммам точность  $RC$ -измерений невысока и обычно составляет величину порядка 10%.

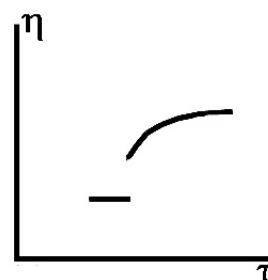


Рис. 1. Типичная  $E$ -хронопотенциограмма при импульсном гальваностатическом включении. Начальный скачок  $\eta$  равен  $i_E R_{SEI}$  или  $i_E R_{el}$

## 1.2. ED-хронопотенциометрия

В этом случае задаваемая импульсным гальваностатом плотность тока отвечает условиям смешанной активационно-диффузионной кинетики и обозначается как  $i_{ED}$ . Она будет зависеть от структуры и толщины  $SEI$  и для электрохимической реакции типа (1) можно рассмотреть два характерных случая.

1. Переходный слой имеет сплошную структуру и достаточно большую толщину  $L \gg \sqrt{D_A t}$ , где  $D_A$  – коэффициент твердофазной диффузии электроактивного компонента  $A$  через  $SEI$ .

Диффузия  $A$  к плоской межфазной границе является при этом линейной и массоперенос описывается II законом Фика:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (8)$$

с начальным условием:

$$C_A(x, 0) = C_A^0, \quad (9)$$

граничным условием I рода

$$C_A(\infty, t) = C_A^0 \quad (10)$$

и граничным условием II рода

$$\frac{i_{ED}}{zF} = -D_A \left. \frac{\partial C_A(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (11)$$

выражающим I закон Фика. Здесь  $x$  – координата, нормальная к поверхности плоского электрода;  $C_A^0$  – объемная концентрация  $A$ .

Решение (8)-(11) может быть записано формулой Занда [9]:

$$C_A(x, t) = C_A^0 - \frac{i_{ED}}{zF} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi D_A}} \int_0^{\tau} \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4D_A t}} dt. \quad (12)$$

Для наших целей достаточно положить  $x=0$  и  $C_A(0, t) = C_A^S(t)$ , после чего из (12) получается:

$$C_A^S(t) = C_A^0 - \frac{2}{\sqrt{\pi D_A}} \cdot \frac{i_{ED}}{zF} \sqrt{t}. \quad (13)$$

Отсюда следует существование некоторого переходного времени  $t=\tau$ , при котором концентрация электроактивного реагента на поверхности электрода обращается в нуль и при  $C_A^S(\tau) = 0$  имеем уравнение Занда-Караогланова:

$$i_{ED} \sqrt{\tau} = \frac{zF}{2} \sqrt{\pi D_A} C_A^0. \quad (14)$$

По мере достижения переходного времени диффузное перенапряжение:

$$\eta_D = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_A^S(t)}{C_A^0} = \frac{RT}{zF} \ln \left( 1 - \sqrt{\frac{t}{\tau}} \right) \quad (15)$$

увеличивается вплоть до реализации следующего электродного процесса на контакте электрода с  $SEI$ , поэтому графически  $\tau$  находят из ED-хронопотенциограмм по методам Делахей, Рейнмуса и Куваны, причем наиболее устойчивые и воспроизводимые результаты дает эмпирический метод Куваны (рис. 2).

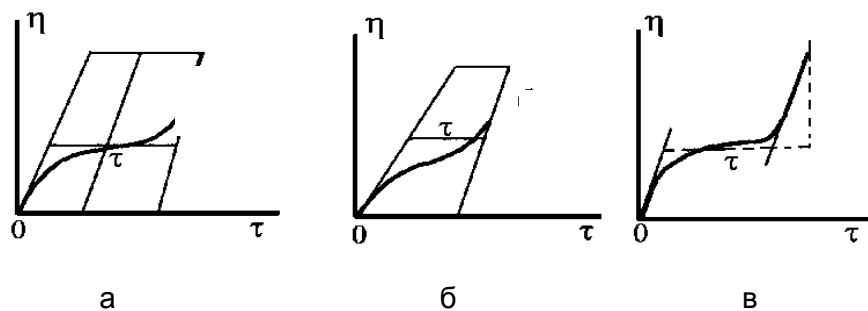


Рис. 2. Графическое определение переходного времени из ED-хронопотенциограмм по Делахею (а), Рейнмусу (б) и Куване (в)

Впрочем, после перевода экспериментальных данных в цифровую форму компьютерное определение  $\tau$  из  $\eta$ - $\tau$  кривых не представляет особых затруднений, поскольку при  $t=\tau$  меняет знак первая производная  $d\eta/dt$  и обращается в нуль вторая производная  $d^2\eta/dt^2=0$ .

После нахождения переходных времен  $\tau$  при разных  $i_{ED}$  можно произвести построение в координатах Занда-Караогланова  $i_{ED}\sqrt{\tau} - i_{ED}$ , которое по соотношению (14) должно дать при смешанном ED-контроле прямую линию, параллельную оси абсцисс (рис. 3).

При известных  $z$  и  $C_A^0$  коэффициент диффузии электроактивного реагента  $A$  через SEI вычисляется по соотношению:

$$D_A = \frac{4}{\pi} \left( \frac{i_{ED} \sqrt{\tau}}{z F C_A^0} \right)^2 \quad (16)$$

2. Переходный слой имеет зернистую структуру и толщину  $L$ , определяемую из топокинетического уравнения Ерофеева-Аврами [11]:

$$L = L_\infty \left( 1 - e^{-\gamma t^n} \right), \quad (17)$$

где  $L_\infty$  – стационарная толщина SEI,  $\gamma = nK^n$ ,  $n > 0$  и

$$K = B e^{-\frac{A}{RT}}, \quad (18)$$

$B$  и  $A$  – аррениусовская предэкспонента и энергия активации реакции роста зерен SEI.

В гальваностатических условиях можно записать следующее выражение для кинетики роста SEI:

$$L = \frac{M_{SEI}}{\rho_{SEI} z F} i_{ED} t, \quad (19)$$

где  $M_{SEI}$  и  $\rho_{SEI}$  – молекулярная масса и плотность вещества SEI.

При небольших  $i_{ED}$  в области линейности ВАХ на основании соотношений (2) и (7) при  $\eta \ll v RT / (zF)$  можно записать:

$$i_{ED} = \frac{z F i_0}{v R T} \eta = R_F^{-1} \eta. \quad (20)$$

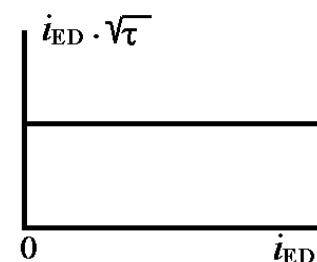


Рис. 3. Обработка ED-хронопотенциограмм в координатах Занда-Караогланова

Отсюда получаем:

$$L = \frac{M_{SEI} \eta t}{\rho_{SEI} z F R_F} . \quad (21)$$

При этом скорость гальваностатического формирования  $SEI$  равна:

$$j = \frac{dL}{dt} = \frac{M_{SEI} \eta}{\rho_{SEI} z F R_F} . \quad (22)$$

С другой стороны, дифференцируя уравнение (17) по времени, имеем:

$$j = \frac{dL}{dt} = n \gamma L_\infty t^{n-1} e^{-\gamma t^n} \quad (23)$$

и после приравнивания скоростей линейного роста  $SEI$  по (22) и (23) получаем:

$$\eta = \frac{n \gamma L_\infty \rho_{SEI} z F R_F}{M_{SEI}} t^{n-1} e^{-\gamma t^n} . \quad (24)$$

Отсюда видно, что зависимость  $\eta-t$  для роста зернистого  $SEI$  при малых  $ED$ -перенапряжениях немонотонна и имеет максимум, координаты которого находятся из условия  $d\eta/dt=0$ :

$$t_{\max} = (n-1)^{1/n} B^{-1} e^{\frac{A}{RT}} , \quad (25)$$

$$\eta_{\max} = n^2 (n-1)^{\frac{n-1}{n}} e^{-n(n-1)} \frac{\rho_{SEI} z F L_\infty R_F}{M_{SEI}} B^{\frac{A}{R}} . \quad (26)$$

При достаточно больших перенапряжениях  $\eta \gg RT/(zF)$ , когда влиянием обратного процесса, например, катодного, можно пренебречь на основании соотношения (2) для простой электрохимической реакции (1) имеем:

$$i_{ED} = i_0 e^{\frac{\alpha^* F \eta}{RT}} . \quad (27)$$

Скорость роста зернистого  $SEI$  может быть определена аналогично вышеуказанному, в виде:

$$j = \frac{i_0 M_{SEI}}{\rho_{SEI} z F} e^{\frac{\alpha^* F \eta}{RT}} = n \gamma L_\infty t^{n-1} e^{-\gamma t^n} , \quad (28)$$

что приводит к следующему выражению  $ED$ -перенапряжения:

$$\eta = \frac{RT}{\alpha \cdot F} \ln \frac{n \gamma L_\infty \rho_{SEI} z F}{i_0 M_{SEI}} + (n-1) \frac{RT}{\alpha \cdot F} \ln t - \frac{RT}{\alpha \cdot F} \gamma t^n . \quad (29)$$

Вычисляя производную  $d\eta/dt$  и приравнивания ее к нулю, получаем необходимые координаты максимума зависимости  $\eta-t$ :

$$t_{\max} = (n-1)^{1/n} n^{-2/n} B^{-1} e^{\frac{A}{RT}} , \quad (30)$$

$$\eta_{\max} = \frac{RT}{\alpha \cdot F} \ln \frac{n^{2/n} (n-1)^{1-1/n} L_\infty \rho_{SEI} z F}{i_0 B M_{SEI}} + \frac{A}{RT} . \quad (31)$$

Достаточно часто в электрохимии ТЭЛ ВАХ описываются с помощью модели инъекционных токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), которую можно свести к простой формуле [12]:

$$i_{ED} = \frac{\sigma_i \eta}{L} \left( 1 + \xi \frac{\eta}{\eta_0} \right), \quad (32)$$

где  $\sigma_i$  – ионная проводимость SEI;  $\eta_0$  – характеристическое перенапряжение, определяемое свойствами SEI, и  $\xi \approx 1$ .

В линейной области ВАХ справедливо:

$$i_{ED} = 2\sigma_i \eta / L \quad (33)$$

и в гальваностатических условиях:

$$L^2 = 2\sigma_i \eta t \quad (34)$$

Для зернистой структуры SEI можно применить топокинетическое уравнение Ерофеева-Аврами (17) и записать следующее выражение ED-перенапряжения по модели ТОПЗ:

$$\eta = \frac{L_\infty^2 (1 - e^{-\gamma t^n})}{2\sigma_i t} \quad (35)$$

Вычисляя производную  $d\eta/dt$  и приравнивая ее к нулю, находим трансцендентное уравнение:

$$2\gamma t_{\max}^n e^{-\gamma t_{\max}^n} = 1 - e^{-\gamma t_{\max}^n}, \quad (36)$$

численное решение которого позволяет определить время достижения максимума зависимости  $\eta-t$  как функцию  $n$  и  $\gamma$  или  $n$ ,  $B$  и  $A$ . Максимальное перенапряжение также будет зависеть от параметров топокинетической реакции:

$$\eta_{\max} = \frac{L_\infty^2 (1 - e^{-\gamma t_{\max}^n})}{2\sigma_i t_{\max}} \quad (37)$$

На квадратичном участке ВАХ в модели ТОПЗ следует записать:

$$i_{ED} = \frac{\xi \sigma_i \eta^2}{\eta_0 L} \quad (38)$$

и в гальваностатических условиях:

$$L^2 = \frac{\xi \sigma_i t}{\eta_0} \eta^2 \quad (39)$$

Для роста зернистого SEI по топокинетическому механизму можно выразить  $\eta$  следующим образом:

$$\eta = \sqrt{\frac{\eta_0}{\xi \sigma_i t}} L_\infty (1 - e^{-\gamma t^n}) \quad (40)$$

Вычисляя производную  $d\eta/dt$  и приравнивая ее к нулю, получаем трансцендентное уравнение:

$$2\gamma t_{\max}^n = 1 - e^{-\gamma t_{\max}^n}, \quad (41)$$

численное решение которого позволяет определить время достижения максимума зависимости  $\eta-t$  как функцию  $n$  и  $\gamma$  или  $n, B, A$ . Максимальное перенапряжение на квадратичном участке ВАХ в рамках модели ТОПЗ также будет зависеть от параметров топокинетической реакции:

$$\eta_{\max} = \sqrt{\frac{\eta_0}{\xi \sigma_i t_{\max}}} L_{\infty} \left(1 - e^{-\gamma t_{\max}^n}\right). \quad (42)$$

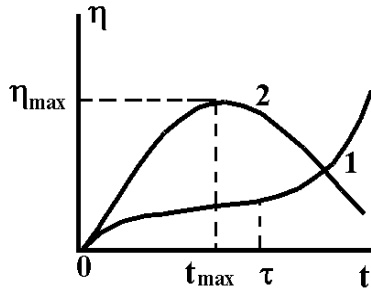


Рис. 4. ED-хронопотенциограммы для формирования сплошного (1) и зернистого (2) SEI слоев

Итак, мы видим, что ED-хронопотенциограммы  $\eta-t$  при образовании зернистого SEI по топокинетическому механизму имеют экстремальную форму в отличие от S-образной формы ED-хронопотенциограмм при формировании сплошного SEI с участием линейной диффузии электроактивного реагента (рис. 4).

Отсюда видно, что ТЭЛ приборы, работающие на зернистых SEI, должны функционировать в более устойчивых и быстрых гальваностатических режимах, чем приборы на сплошных SEI. В связи с этим возникает проблема определения  $t_{\max}$ , важная для заряда ХИТ, которую не везде можно решить аналитически.

Пусть  $\varepsilon = L/L_{\infty} < 1$  – некоторый безразмерный подгоночный параметр. На основании (17) мы можем записать:

$$\varepsilon = e^{-\gamma t_{\varepsilon}^n} \quad (43)$$

или

$$t_{\varepsilon} = -\left(\frac{\ln \varepsilon}{\gamma}\right)^{1/n} = -\left(\frac{\ln \varepsilon}{n}\right)^{1/n} B^{-1} e^{\frac{A}{RT}}. \quad (44)$$

Очевидно, что всегда можно задать такую величину  $\varepsilon$ , которая способна обеспечить  $t_{\varepsilon} = t_{\max}$  и поэтому:

$$t_{\max} = -\left(\frac{\ln \varepsilon}{n}\right)^{1/n} B^{-1} e^{\frac{A}{RT}}. \quad (45)$$

Тем самым, проблема взаимосвязи между  $t_{\max}$  и параметрами топохимической реакции может быть решена с помощью выбора подгоночного параметра  $\varepsilon$ .

Логарифмируя (45), получаем:

$$\ln t_{\max} = \ln \left[ -\left(\frac{\ln \varepsilon}{n}\right)^{1/n} \right] - \ln B + \frac{A}{RT}. \quad (46)$$

Отсюда следует, что, производя эксперименты при различных температурах, можно определить энергию активации – по угловому коэффициенту прямолинейной зависимости  $\ln t_{\max} - T^{-1}$

$$A = R \frac{\partial \ln t_{\max}}{\partial T^{-1}} \quad (47)$$

и логарифм аррениусовской предэкспоненты топокинетической реакции – по отрезку, отсекаемому на оси ординат

$$\ln B = \ln \left[ -\left(\frac{\ln \varepsilon}{n}\right)^{1/n} \right] - \ln t_{\max} \Big|_{T=\infty}. \quad (48)$$

## 2. Переходные процессы при потенциостатическом включении (хроноамперометрия)

### 2.1. E-хроноамперометрия

В этом случае задаваемое импульсным потенциостатом перенапряжение  $\eta$  располагается в «кинетической» области, где для простой реакции (1), контролируемой замедленным переносом заряда, стационарная плотность тока  $i=i_E$  подчиняется уравнению (2).

Релаксация тока  $i(t)$  определяется омическим сопротивлением и емкостью  $SEI$ , а также временем отработки потенциостата  $t_0$ .

Типичная осциллограмма  $i(t)$  переходного процесса, получаемая в таких условиях, показана на рис. 5.

При  $t \geq t_0$  релаксация тока описывается законом экспоненциального спада:

$$i(t) = i_E + [i(0) - i_E] e^{-\frac{t}{R_{SEI} C_{SEI} + t_0}} \quad (49)$$

Если переходный слой изначально отсутствовал на контакте электрода с ТЭЛ, то релаксация тока определяется сопротивлением электролита  $R_{el}$  и емкостью ДЭС  $C_{del}$ :

$$i(t) = i_E + [i(0) - i_E] e^{-\frac{t}{R_{el} C_{del} + t_0}} \quad (50)$$

Из-за больших времен отработки серийных потенциостатов  $t_0=10-150$  мкс хроноамперометрическое определение релаксационных параметров практически невозможно.

### 2.2. ED-хроноамперометрия

Плотность тока смешанной активационно-диффузионной кинетики  $i_{ED}$  будет зависеть от структуры и толщины  $SEI$  и для электрохимической реакции (1) следует рассмотреть два характерных случая.

1. Переходный слой имеет сплошную структуру и толщину  $L$ , значительно превышающую диффузионные длины реагентов  $A$  и  $B$ , равные  $\sqrt{D_A t}$  и  $\sqrt{D_B t}$ , соответственно.

В этом варианте потенциостатической ED-хроноамперометрии перенос  $A$  и  $B$  описывается II законом Фика в виде:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2}, \quad (51)$$

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = D_B \frac{\partial^2 C_B}{\partial x^2} \quad (52)$$

с начальными условиями:

$$C_A(x, 0) = C_A^0 \quad \text{и} \quad C_B(x, 0) = C_B^0, \quad (53)$$

граничными условиями I рода

$$C_A(\infty, t) = C_A^o \quad \text{и} \quad C_B(\infty, t) = C_B^o \quad (54)$$

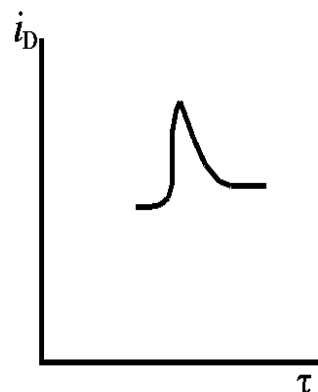


Рис. 5. Типичная E-хроноамперограмма при импульсном потенциостатическом включении. Максимум  $i$  при  $t=t_0$  равен  $i(0)$ , а установившееся значение  $i$  равно «кинетической» плотности тока  $i_E$

и граничными условиями II рода

$$\frac{i_{ED}}{zF} = -D_A \frac{\partial C_A(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = D_B \frac{\partial C_B(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} , \quad (55)$$

выражающими I закон Фика.

При этом плотность тока  $i_{ED}$  должна подчиняться уравнению смешанной кинетики в виде:

$$i_{ED} = i_0 \left[ \frac{C_B(0,t)}{C_B^0} e^{\frac{\alpha \cdot F\eta}{RT}} - \frac{C_A(0,t)}{C_A^0} e^{-\frac{\beta \cdot F\eta}{RT}} \right] . \quad (56)$$

Если ввести обозначение:

$$\lambda = \frac{i_0}{zF} \left( \frac{1}{C_B^0 \sqrt{D_B}} e^{\frac{\alpha \cdot F\eta}{RT}} + \frac{1}{C_A^0 \sqrt{D_A}} e^{-\frac{\beta \cdot F\eta}{RT}} \right) , \quad (57)$$

то решение (51)-(57) записывается в форме уравнения Камбара-Тачи [10]:

$$i_{ED} = i_E e^{\lambda^2 t} \operatorname{erfc}(\lambda \sqrt{t}) , \quad (58)$$

где  $i_E$  – «кинетическая плотность» тока, отвечающая соотношению (2) и  $\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y)$  - функция, дополнительная к функции ошибок  $\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-\mu^2} d\mu$ .

При  $y = \lambda \sqrt{t} \ll 1$  можно использовать известную аппроксимацию функции ошибок  $\operatorname{erf}(y) = 2/\sqrt{\pi} y$ , после чего из (58) получается:

$$i_{ED} = i_E (1 + \lambda^2 t) \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \lambda \sqrt{t} \right) = i_E \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \lambda \sqrt{t} \right) , \quad (59)$$

поскольку член  $\lambda^2 t \ll \lambda \sqrt{t}$  оказывается при этом членом второго порядка малости.

Отсюда следует, что величина «кинетической» плотности тока  $i_E$  может быть определена из начальных участков  $ED$ -хроноамперограмм  $i-t$  построением в координатах  $i-\sqrt{t}$  – по отрезку, отсекаемому соответствующей экстраполированной прямой на оси ординат, а значение  $\lambda$  – по угловому коэффициенту прямой:

$$\lambda = -\frac{\sqrt{\pi}}{2i_E} \frac{di_{ED}}{d\sqrt{t}} . \quad (60)$$

Анализ больших времен показывает, что при  $\lambda \sqrt{t} \gg 1$   $\operatorname{erfc}(\lambda \sqrt{t}) = 0$ , поскольку интеграл Эйлера-Лапласа [13]:

$$\int_0^{\infty} e^{-\mu^2} d\mu = \frac{\sqrt{\pi}}{2} . \quad (61)$$

Поэтому соотношение Камбара-Тачи (58) дает неопределенность вида  $\infty \cdot 0$ . Раскрыв ее, Геришер и Фильштих получили:

$$i_{ED} = \frac{i_E}{\sqrt{\pi} \lambda \sqrt{t}} . \quad (62)$$

Зависимость  $i_{ED} - 1/\sqrt{t}$  должна экстраполироваться в начало координат, что доказывает преобладание диффузионного перенапряжения при больших временах съемки



*ED*-хроноамперограмм. При известном  $i_E$  величина  $\lambda$  может быть найдена по угловому коэффициенту прямой:

$$\lambda = \frac{i_E}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{d i_{ED}}{d 1/\sqrt{t}} \right)^{-1} . \quad (63)$$

Интересно отметить, что уравнение Геришера-Фильштиха (62), переписанное в форме:

$$i_{ED} \sqrt{t} = \frac{i_E}{\sqrt{\pi} \lambda} , \quad (64)$$

весьма напоминает уравнение Занда-Караогланова (14), поскольку и то и другое отвечают условиям обеднения электродной поверхности электроактивными реагентами.

Принципы обработки *ED* хроноамперограмм показаны на рис. 6.

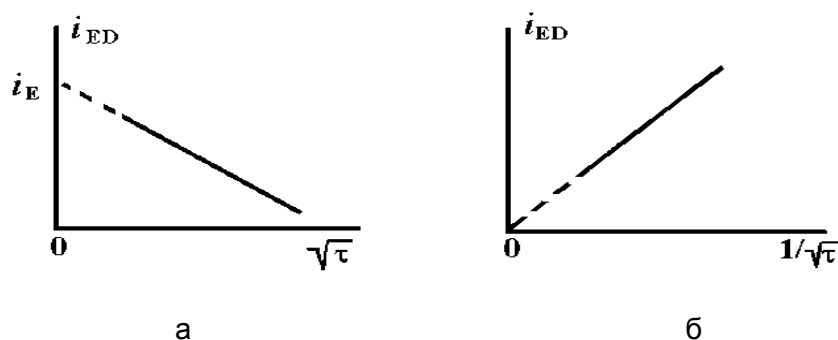


Рис. 6. Обработка потенциостатических *ED*-хроноамперограмм при малых (а) и больших (б) временах

2. Переходный слой имеет зернистую структуру и толщину  $L$ , определяемую из топokinетического уравнения Ерофеева – Авраами (17).

В потенциостатических условиях можно записать следующее выражение для скорости роста *SEI*:

$$j = \frac{i_{ED} M_{SEI}}{\rho_{SEI} z F} = n \gamma L_{\infty} t^{n-1} e^{-\gamma t} , \quad (65)$$

откуда видно, что

$$i_{ED} = \frac{n \gamma \rho_{SEI} z F L_{\infty}}{M_{SEI}} t^{n-1} e^{-\gamma t^n} . \quad (66)$$

Зависимость плотности тока от времени немонотонна и имеет максимум, координаты которого находятся из условия

$$d i_{ED} / dt = 0$$

$$t_{\max} = (n-1)^{1/n} B^{-1} e^{\frac{A}{RT}} , \quad (67)$$

$$i_{\max} = n^2 (n-1)^{\frac{n-1}{n}} e^{-n(n-1)} \frac{\rho_{SEI} z F L_{\infty}}{M_{SEI}} B e^{\frac{A}{RT}} . \quad (68)$$

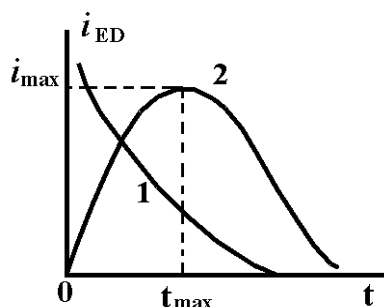


Рис. 7.  $ED$ -хроноамперограммы  $i_{ED}-t$  для формирования сплошного (1) и зернистого (2)  $SEI$  слоев

Итак, вместо монотонно спадающей со временем зависимости  $i_{ED}-t$ , характерной для поведения сплошной пленки  $SEI$  в потенциостатическом включении и обусловленной влиянием замедленной линейной диффузии электроактивных реагентов и продуктов для зернистой пленки  $SEI$ , формируемой по топокинетическому механизму, мы получили экстремальные  $ED$ -хроноамперограммы, вероятнее всего, отвечающие переходу от сферической к линейной диффузии электроактивных компонентов по мере завершения роста пленки (рис. 7).

Отсюда видно, что ТЭЛ приборы, работающие на зернистых  $SEI$ , должны функционировать в более долговременных и устойчивых потенциостатических режимах, хотя по результатам теоретического анализа они и не способны быстро отдавать большие токи.

Значения форм-фактора  $n$  топокинетических кривых в различных процессах

№	Рост ядер контролируется диффузией	$N$
1.	Осаждение ядер на дислокациях	$<0,5$
2.	Ядра имеют форму пластинок, размер которых мал по сравнению с разделяющим их пространством	1
3.	Ядра любой формы растут из заметного начального объема	$<1,5$
4.	Ядра любой формы растут из малого начального объема при нулевой скорости образования	1,5
5.	Ядра любой формы растут из малого начального объема при уменьшающейся скорости образования	1,5-2,5
6.	Ядра любой формы растут из малого начального объема с постоянной скоростью образования	2,5
7.	Ядра любой формы растут из малого начального объема с возрастающей скоростью образования	$>2,5$
	Рост ядер контролируется реакцией	
8.	Образование ядер происходит на ребрах кристаллов после насыщения	1
9.	Ядра образуются с уменьшающейся скоростью	3-4
10.	Ядра образуются с постоянной скоростью	4
11.	Ядра образуются с возрастающей скоростью	$>4$

Прологарифмировав (67), получаем:

$$\ln t_{\max} = 1/n \ln(n-1) - \ln B + \frac{A}{RT} \quad (69)$$

Отсюда следует, что, производя хроноамперометрические эксперименты на зернистых  $SEI$  при различных температурах, можно определять энергию активации – по угловому коэффициенту прямых  $\ln t_{\max}-T^{-1}$

$$A = R \frac{\partial \ln t_{\max}}{\partial T^{-1}} \quad (70)$$

и логарифм аррениусовской предэкспоненты топокинетической реакции – по отрезку, отсекаемому на оси ординат

$$\ln B = 1/n \ln(n-1) - \ln t_{\max} \Big|_{T=\infty} . \quad (71)$$

Из последнего выражения, равно как и из всего изложенного выше материала по электрохимическому поведению зернистых пленок *SEI*, видна важность знания форм-фактора топокинетических кривых *n*. В связи с этим, приведем необходимые сведения по величинам *n*, наблюдаемым в различных топокинетических процессах [6].

Следует заметить, что когда ядра *SEI* образуются под контролем реакции при  $n \geq 3$ , то это свидетельствует о реализации *ECD* электрохимического процесса с замедленной последующей химической стадией.

### 3. Переходные процессы при потенциодинамическом включении

#### 3.1. Хроновольтамперометрия

Потенциодинамические режимы применяют почти исключительно в исследовательских целях. Информация, получаемая с их помощью, носит скорее качественный характер [14, 15, 16].

Плотность тока  $i_{ED}$  должна зависеть от структуры и толщины *SEI* и для простой электрохимической реакции (1) следует рассмотреть два характерных случая.

1. Переходный слой имеет сплошную структуру и толщину *L*, значительно превышающую диффузионные длины реагентов *A* и *B*. В этом варианте диффузию можно считать полубесконечной и она описывается дифференциальными уравнениями II закона Фика (51) и (52) с начальными условиями (53), граничными условиями I рода (54) и граничными условиями II рода (55).

Если *V* – скорость линейной развертки перенапряжения,  $\eta_0$  – его начальное и  $\eta = \eta_0 \pm Vt$  – текущее значение, то для обратимого протекания реакции (1) должно выполняться граничное условие смешанной *ED*-кинетики в виде:

$$\frac{C_A(0,t)}{C_B(0,t)} = e^{\frac{zF\eta}{RT}} e^{-\frac{zFVt}{RT}} , \quad (72)$$

соответствующем снятию катодной потенциодинамической кривой (ПДК).

Если ввести обозначение  $a = zFV/(RT)$ , то решение краевой задачи (51)-(55) с граничными условиями (72) приобретает форму уравнения Рэндлса-Шевчика [9, 16]:

$$i_{ED} = zF C_A^0 \sqrt{\pi D_A a} f(at) , \quad (73)$$

где

$$f(at) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \sqrt{n} \exp\left[-\frac{n zF}{RT} (\eta - \eta_{1/2})\right] ;$$

$\eta$  – перенапряжение полувольты.

Специальная функция  $f(at)$  табулирована и имеет вид кривой с максимумом (рис. 8), координаты которого находятся из соотношений:

$$i_{\max} = 0,447 zF C_A^0 \sqrt{\frac{zF D_A V}{RT}} , \quad (74)$$

$$\eta_{\max} = \eta_{1/2} - 1,11 \frac{RT}{zF} , \quad (75)$$

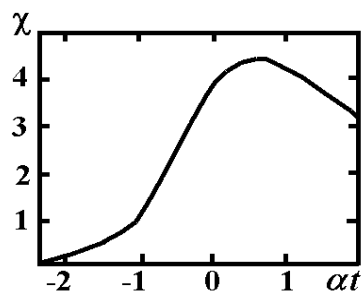


Рис. 8. График функции  $f(\alpha t)$

где вышеупомянутое перенапряжение полуволны отвечает формуле

$$i_{ED} = (\eta_{1/2}) = 0,852 i_{\max} . \quad (76)$$

Из экспериментально измеренных  $i_{\max}$  и  $\eta_{\max}$  на основании (74)-(76) можно вычислять число электронов  $z$ , потребляемых в обратимой реакции (1) и неизвестный коэффициент диффузии  $D_A$  электроактивного реагента.

Если реакция (1) протекает необратимо с эффективным коэффициентом переноса  $\beta^*$ , то при  $B = \beta^* F V / (RT)$  уравнение  $ED$ -хроновольтамперограммы приобретает вид:

$$i_{ED} = z F C_A^0 \sqrt{\pi D_A B} \Psi(Bt) , \quad (77)$$

где  $\Psi(Bt) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \sqrt{\frac{\pi}{(n-1)!}} \exp \left[ -\frac{n\beta^* F}{RT} \left( \eta + \frac{RT}{\beta^* F} \ln \sqrt{\frac{\pi D_A B}{k_k}} \right) \right]$  – табулированная функция;

$k_k$  – константа скорости катодной реакции. Специальная функция  $\Psi(Bt)$  также представляет собой кривую с максимумом, положение которого сильно зависит от эффективного коэффициента переноса катодной реакции  $\beta^*$  (рис. 9) и координаты максимума могут быть представлены следующими выражениями:

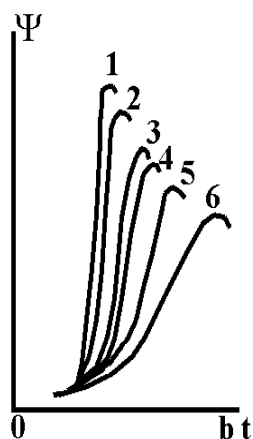


Рис. 9. График функции  $\Psi(b t)$  при  $\beta^*$ :  
1 – 1,0; 2 – 0,8; 3 – 0,6;  
4 – 0,5; 5 – 0,4; 6 – 0,3

$$i_{\max} = 0,496 z F C_A^0 \sqrt{\frac{\beta^* F D_A V}{RT}} , \quad (78)$$

$$\eta_{\max} = \frac{RT}{\beta^* F} \ln k_k - \frac{RT}{\beta^* F} \left( \ln \sqrt{\frac{\beta^* F D_A V}{RT}} + 0,780 \right) . \quad (79)$$

Итак, если для обратимой реакции (1)  $i_{\max} \sim V^{1/2}$  и  $E_{\max} = \text{const}(V)$ , то для необратимой реакции  $i_{\max} \sim V^{1/2}$   $E_{\max} \sim \ln V$ , что позволяет вполне надежно разделять обратимость и необратимость  $ED$ -кинетики электрохимических реакций, протекающих в сплошном слое  $SEI$ . Однако следует иметь в виду, что зависимости  $i_{\max} \sim V^{1/2}$  и  $E_{\max} \sim \ln V$  являются «слабыми» и с тем же успехом экспериментальные значения параметров пиков ПДК могут спрямляться и в других «слабых» координатах, например, в  $i_{\max} \sim V^{1/2}$   $E_{\max} \sim \ln V$  и характерных для омического контроля. Поэтому, целесообразно для необратимых  $ED$ -реакций при различных  $C_A^0$  на основании соотношения:

$$i_{\max} = 0,227 z F k_k C_A^0 e^{-\frac{\beta^* F \eta_{\max}}{RT}} \quad (80)$$

производить построение в «тафелевских» координатах  $\ln i_{\max} - \eta_{\max}$  и вычислять константу скорости  $k_k$  - из отрезка, отсекаемого на оси ординат при  $\eta_{\max} = 0$ :

$$\ln k_k = \frac{4,405}{z F C_A^0} \ln i_{\max} \Big|_{\eta_{\max}=0} \quad (81)$$

и эффективный коэффициент переноса  $\beta^*$  – из углового коэффициента прямых:

$$\beta^* = -\frac{RT}{F} \cdot \frac{d \ln i_{\max}}{d \eta_{\max}} \quad (82)$$

Слишком малые значения  $k_k$  и  $\beta^*$  могут служить указанием на вклад омических и пассивационных ограничений  $ED$ -кинетики.

Если в слое сплошного  $SEI$  присутствуют несколько электроактивных компонентов, то получаются последовательные максимумы  $ED$ -хронвольтамперограмм. Плотность максимального тока последующей электрохимической реакции при этом необходимо отсчитывать не от нуля, а от пересечения нормали к точке последующего максимума с экстраполированной линией спада плотности тока после предыдущего максимума (рис.10, а), которую можно рассчитать из (73) или (77).

При больших  $V$  возможны и искажения  $ED$ -хронвольтамперограмм емкостными токами, пропорциональными  $V$ . Возникающие емкостные токи необходимо вычитать из экспериментально измеренных (рис. 10, б), равно, как и омическую составляющую перенапряжения.

Точность определения параметров  $ED$ -хронвольтамперограмм из-за их искажений в лучшем случае составляет не менее 10%.

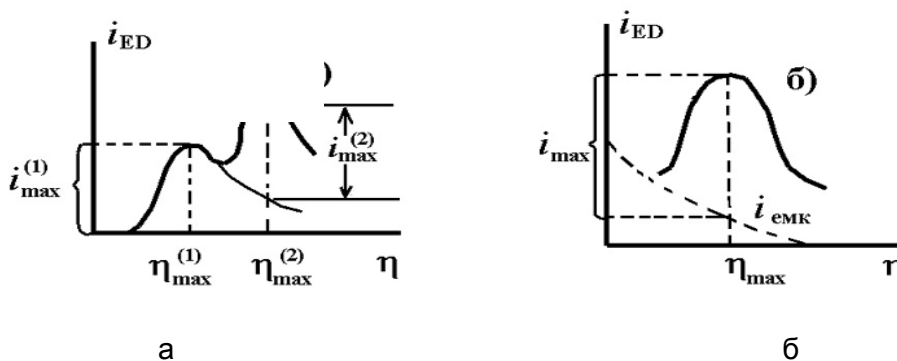


Рис. 10. Учет реакционных (а) и емкостных (б) искажений  $ED$ -хронвольтамперограмм

2. Переходный слой имеет зернистую структуру и толщину  $L$ , определяемую из топокинетического уравнения Ерофеева-Аврами (17).

В потенциодинамических условиях можно записать следующее выражение для скорости роста  $SEI$ :

$$j = \frac{i_{ED} M_{SEI}}{\rho_{SEI} z F} = n \gamma L_{\infty} \left( \frac{\eta}{V} \right)^{n-1} e^{-\gamma \left( \frac{\eta}{V} \right)^n} \quad (83)$$

откуда следует, что

$$i_{ED} = \frac{n \gamma \rho_{SEI} z F L_{\infty}}{M_{SEI}} \left( \frac{\eta}{V} \right)^{n-1} e^{-\gamma \left( \frac{\eta}{V} \right)^n} \quad (84)$$

Зависимость плотности тока от перенапряжения немонотонна и имеет максимум, координаты которого можно найти из условия  $d i_{ED} / dt=0$ :

$$\eta_{\max} = (n-1)^n B^{-1} e^{\frac{A}{RT}} V \quad (85)$$

$$i_{\max} = n^2 (n-1)^{\frac{n-1}{n}} e^{-n(n-1)} B e^{\frac{A}{RT}} \quad (86)$$

Тем самым, модель зернистого *SEI*, растущего по топокинетическому механизму и лимитирующего *ED*-кинетику электрохимических реакций на границе ТЭЛ/электрод, отвечает  $i_{\max} = \text{const}(V)$  и  $\eta_{\max} \sim V$ , то есть предусматривает спрямляемость данных в хорошо различимых от других случаев «сильных» координатах (рис. 11).

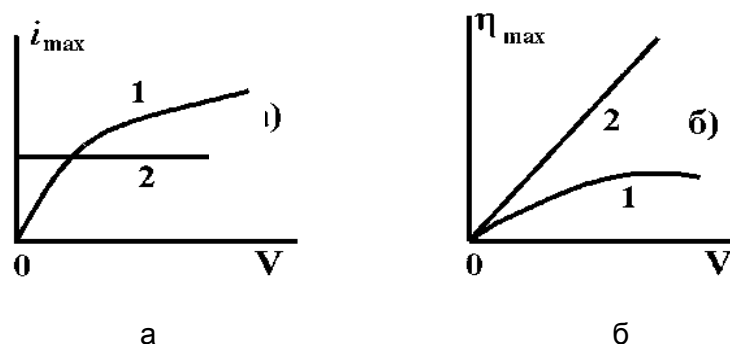


Рис. 11. Сопоставление зависимостей  $i_{\max}-V$  (а) и  $\eta_{\max}-V$  (б) для протекания *ED*-реакции в сплошном (1) и зернистом (2) *SEI*

### 3.2. ECAD-хроновольтамперометрия с пассивацией

Рассмотрим кинетическую схему анодного процесса на границе электрода с ТЭЛ, согласно которой наряду с основной токообразующей реакцией



протекает параллельная анодная реакция



в результате которой на поверхности раздела фаз формируется монослой пассивирующего продукта  $D_{ads}$  при степени заполнения поверхности  $\theta \leq 1$ . Примем также, что диффузионные ограничения отсутствуют и плотность тока обмена  $i_{01}$  реакции (87) намного превышает плотность тока обмена  $i_{02}$  реакции (88).

Для равномерно-однородной поверхности электрода и блокировочного механизма монослойной пассивации можно записать [17-19]:

$$i_1 = (1 - \Theta) i_{01} e^{\frac{\alpha_1^* F \eta}{RT}}, \quad (89)$$

$$i_2 = (1 - \Theta) i_{02} e^{\frac{\alpha_2^* F \eta}{RT}}, \quad (90)$$

где  $\alpha_1^*$  и  $\alpha_2^*$  – эффективные коэффициенты переноса реакций (87) и (88).

Дифференциальное уравнение распространения пассивирующего монослоя по анодной поверхности имеет вид:

$$k \frac{d\Theta}{dt} = i_2 = (1 - \Theta) i_{02} e^{\frac{\alpha_2^* F \eta}{RT}}, \quad (91)$$

где  $k$  – электросорбционная емкость монослоя (для тщательно полированных металлических поверхностей  $k \approx 10^{-4}$  Кл/см<sup>2</sup>).

Начальное условие

$$\Theta(t=0) = \Theta_0, \quad (92)$$

где  $\theta_0$  – исходная степень заполнения анодной поверхности пассивирующим монослоем при перенапряжении  $\eta_0$  начала съемки  $EA$ -хронвольтамперограммы рассматриваемого типа.

При  $\eta = \eta_0 + Vt$  решение уравнения (91) с начальным условием (92) имеет вид:

$$1 - \Theta = (1 - \Theta_0) \exp \left[ - \frac{i_{02} RT}{k \alpha_2^* F V} \exp \left( \frac{\alpha_2^* F \eta}{RT} \right) \right]. \quad (93)$$

Плотность анодного потенциодинамического тока при  $i_{01} \gg i_{02}$  равна  $i_{EA} = i_1$  и, подставляя  $1 - \theta$  из (93) в (89), получаем:

$$i_{EA} = (1 - \Theta_0) i_{01} \exp \left( \frac{\alpha_1^* F \eta}{RT} \right) \exp \left[ - \frac{i_{02} RT}{k \alpha_2^* F V} \exp \left( \frac{\alpha_2^* F \eta}{RT} \right) \right]. \quad (94)$$

В максимуме АПДК  $di_{EA}/d\eta = 0$  и после дифференцирования (94) по  $\eta$  получаем:

$$i_{02} = \exp \left( \frac{\alpha_2^* F \eta_{\max}}{RT} \right) = k \frac{\alpha_1^* F V}{RT} \quad (95)$$

или

$$\eta_{\max} = \frac{RT}{\alpha_2^* F} \ln \left( \frac{k \alpha_1^* F V}{i_{02} RT} \right). \quad (96)$$

После подстановки  $\eta_{\max}$  из (90) в (94) имеем:

$$i_{\max} = (1 - \Theta_0) i_{01} \left( \frac{k \alpha_1^* F V}{i_{02} RT} \right)^{\alpha_2^*/\alpha_1^*} \exp \left( - \frac{\alpha_1^*}{\alpha_2^*} \right). \quad (97)$$

Итак, в рассматриваемом случае электросорбционной пассивации по  $EA$ -механизму параметры максимумов АПДК зависят от скорости развертки перенапряжения по закономерностям  $i_{\max} \sim V^{\alpha_1^*/\alpha_2^*}$  и  $\eta_{\max} \sim \ln V$ .

При  $\alpha_1^*/\alpha_2^* = 0,5$  эти закономерности неотличимы от варианта необратимой реакции, контролируемой диффузией электроактивного реагента из ТЭЛ или толстого слоя  $SEI$ .

Рассмотрим еще один случай монослойной пассивации [17] границы электрода с ТЭЛ, отвечающей кинетической схеме:



Здесь неэлектроактивный компонент  $C$  медленно диффундирует из ТЭЛ к поверхности анода, где химически реагирует с продуктом основной токообразующей реакции  $A$ , образуя адсорбированный пассивирующий монослой  $D_{ads}$ . Доля тока, идущего на формирование пассивирующего монослоя, при этом пренебрежимо мала и продукт  $A$  выделяется в большом избытке по сравнению со стехиометрией пассивирующей химической реакции.

Скорость реакции (99), выраженная в электрических единицах, может быть записана следующим образом:

$$i_c = \frac{k_c C_c^p \delta_v i_1}{z F D_c}, \quad (100)$$

где  $k_c$  – константа скорости реакции пассивации;  $C_c$  и  $D_c$  – концентрация и коэффициент диффузии неэлектроактивного реагента  $C$  в объеме ТЭЛ;  $p$  – стехиометрический коэффициент

ент;  $\delta_v$  – толщина нестационарного диффузионного слоя в потенциодинамических условиях;  $i_1 = i_{ЕСАД}$  – плотность анодного потенциодинамического тока.

Величина  $\delta_v$  рассчитывается из соотношения:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{D_c RT}{\alpha_1^* F V}} \quad (101)$$

и, вводя обозначение:

$$K = \frac{k_c C_c^p}{z F D_c}, \quad (102)$$

получаем дифференциальное уравнение распространения пассивирующего монослоя по поверхности анода в условиях снятия АПДК:

$$K \frac{d\Theta}{dt} = i_1 K \sqrt{\frac{D_c RT}{\alpha_1^* F V}} \quad (103)$$

с начальным условием  $\theta(t=0) = \theta_0$ .

Решение этого уравнения при  $i_1$ , определяемом из (89), можно записать следующим образом:

$$\ln \frac{1 - \Theta_0}{1 - \Theta} = \frac{i_{01} K}{k} \sqrt{D_c \left( \frac{RT}{\alpha_1^* F V} \right)^3} e^{\frac{\alpha_1^* F \eta_0}{RT}} \left( e^{\frac{\alpha_1^* F V t}{RT}} - 1 \right). \quad (104)$$

При  $\alpha_1^* F V t / (RT) \gg 1$  и  $\eta = \eta_0 + V t$  получаем следующее уравнение для плотности тока АПДК:

$$i_{ЕСАД} = (1 - \Theta_0) \cdot \exp\left(\frac{\alpha_1^* F \eta}{RT}\right) \exp\left[-\frac{i_{01} K}{k} \sqrt{D_c \left( \frac{RT}{\alpha_1^* F V} \right)^3} \exp\left(\frac{\alpha_1^* F \eta}{RT}\right)\right]. \quad (105)$$

Приравнивая производную  $di_{ЕСАД} / d\eta$  к нулю и подставляя вместо  $K$  его значение по (102), имеем перенапряжение максимума АПДК в виде:

$$\eta_{\max} = \frac{RT}{\alpha_1^* F} \ln \left[ \frac{k z F}{k_c i_{01} C_c^p} \sqrt{D_c \left( \frac{\alpha_1^* F V}{RT} \right)^3} \right]. \quad (106)$$

Подстановка  $\eta_{\max}$  из (106) в (105) дает следующее выражение для плотности тока в максимуме АПДК:

$$i_{\max} = 0,368(1 - \Theta_0) \frac{k z F}{k_c i_{01} C_c^p} \sqrt{D_c \left( \frac{\alpha_1^* F V}{RT} \right)^3}. \quad (107)$$

Тем самым, в этом варианте электросорбционной пассивации по ЕСАД-механизму параметры максимумов АПДК зависят от скорости развертки перенапряжения по закономерностям  $i_{\max} \sim V^{3/2}$  и  $\eta_{\max} \sim \ln V$ .

В заключение этого подраздела можно отметить, что снятие АПДК в сочетании с изменением перенапряжения  $\eta_0$  позволяет определить стационарную изотерму электросорбции пассивирующего монослоя независимо от механизма его формирования.

Действительно, из аналитической формы выражений (97) и (107) следует:

$$\Theta_0 = \Theta(\eta_0) = 1 - \frac{i_{\max}}{i_{\max}^0}, \quad (108)$$

где  $i_{\max}^0$  – наибольшая плотность тока в максимуме АПДК при  $\eta=0$   $\Theta_0 = \Theta(\eta_0)$ .



Поэтому, воспользовавшись программой многоимпульсного потенциодинамического метода (МИП), изображенной на рис. 12, можно после стационарных выдержек системы при  $\eta=0$ ,  $\eta_{01}$ ,  $\eta_{02}$ ,  $\eta_{03}$ , ... (рис. 12, а), измерять плотности токов максимумов АПДК  $i_{\max}^0$ ,  $i_{\max}^1$ ,  $i_{\max}^2$ ,  $i_{\max}^3$  (рис. 12, б), рассчитывать стационарные степени заполнения поверхности анода пассивирующим монослоем по соотношению (108),  $\Theta=0$ ,  $\Theta_{01}$ ,  $\Theta_{02}$ ,  $\Theta_{03}$ , ..., определяя тем самым стационарную изотерму электросорбции пассивирующего монослоя  $\Theta(\eta_0)$ . Программа МИП-метода легко реализуется автоматически с помощью потенциостата и программатора ПР-8 [20, 21].

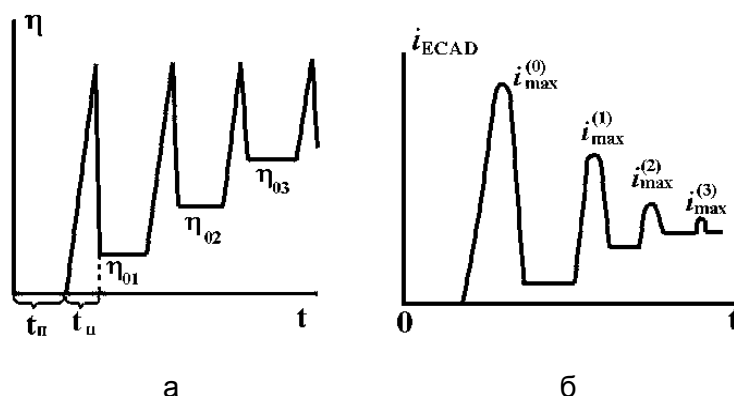


Рис. 12. Программа изменения перенапряжения (а) и эпюра токового отклика (б) в МИП-методе при  $t_{\pi} \gg t_a$ . Пояснения в тексте

### 3.3. ЕСА-хроновольтамперометрия с омической пассивацией

Пусть на границе электрода с ТЭЛ формируется пористый SEI с толщиной  $L$  и пониженной проводимостью в порах  $\sigma_{II}$ . Если на поверхности электрода наряду с основной токообразующей реакцией



идет параллельный пассивационный процесс:



с образованием пассивирующего монослоя по степени заполнения  $\Theta \leq 1$  и пренебрежимо малым отбором тока из внешней цепи, то сопротивление ТЭЛ в порах выражается так:

$$R_{II} = \frac{L}{\sigma_{II} A_0 (1 - \Theta)} \quad (111)$$

и при омическом контроле уравнение ВАХ системы имеет вид:

$$I = \frac{\eta}{R_{ТЭЛ} + \frac{L}{\sigma_{II} A_0 (1 - \Theta)}}, \quad (112)$$

где  $I$  – сила тока;  $A_0$  – общая площадь электродной поверхности;  $R_{ТЭЛ}$  – сопротивление электролита в ячейке.

При  $\eta = \eta_i + Vt$  величины  $I$  и  $\Theta$  будут являться функциями времени и можно записать:

$$I = \frac{\rho_{SEI} z F L A_0}{M_{SEI}} \frac{d\Theta}{dt}. \quad (113)$$

Здесь  $\eta_i$  – перенапряжение инициации образования пассивирующего монослоя  $C_{ads}$ ,  $\rho_{SEI}$  и  $M_{SEI}$  – плотность и молекулярная масса  $SEI$ ,  $L$  не возрастает существенным образом за время съемки АПДК.

Комбинируя уравнения (112)-(113), получаем:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{M_{SEI}(\eta_i + Vt)}{\rho_{SEI} z F L A_0 \left[ R_{TЭЛ} + \frac{L}{\sigma_{II} A_0 (1-\Theta)} \right]} . \quad (114)$$

Вычислим вторую производную  $d^2\Theta/dt^2$ :

$$\begin{aligned} \frac{d^2\Theta}{dt^2} = & \frac{1}{(z F \rho_{SEI} L)^2 \left[ R_{TЭЛ} + \frac{L}{\sigma_{II} A_0 (1-\Theta)} \right]} \left\{ M_{SEI} \rho_{SEI} z F L V \left[ R_{TЭЛ} + \frac{L}{\sigma_{II} A_0 (1-\Theta)} \right] - \right. \\ & \left. - M_{SEI}(\eta_i + Vt) \frac{\rho_{SEI} z F L^2}{A_0 (1-\Theta)^2} \frac{d\Theta}{dt} \right\} . \quad (115) \end{aligned}$$

ЕСА-хроновольтамперограммы рассматриваемого типа должны иметь максимум при  $d^2\Theta/dt^2 = 0$ , а это возможно при условии:

$$R_{TЭЛ} + \frac{L}{\sigma_{II} A_0 (1-\Theta_{max})} = \frac{\eta_{max} L}{A_0 (1-\Theta_{max})} \frac{d\Theta}{dt} , \quad (116)$$

где  $\Theta_{max}$  – заполнение поверхности в максимуме АПДК пассивирующим монослоем  $C_{ads}$ .

На основании (112) мы можем записать:

$$\frac{\eta_{max}}{I_{max}} = R_{TЭЛ} + \frac{L}{\sigma_{II} A_0 (1-\Theta_{max})} \quad (117)$$

и комбинируя уравнения (113), (116) и (117), при  $i_{max} = I_{max}/A_0$  получаем окончательно:

$$i_{max} = (1-\Theta_{max}) \sqrt{\frac{\rho_{SEI} z F \sigma_{II} V}{A_0 M_{SEI}}} , \quad (118)$$

$$\eta_{max} = (1-\Theta_{max}) \left[ R_{TЭЛ} + \frac{L}{\sigma_{II} A_0 (1-\Theta_{max})} \right] \sqrt{\frac{\sigma_{II} A_0 M_{SEI}}{\rho_{SEI} z F L^2}} . \quad (119)$$

Итак, в этом варианте омически затрудненной пассивации по ЕСА-механизму параметры максимумов АПДК при  $\Theta_{max} = \text{const}(V)$  зависят от скорости развертки перенапряжения по закономерностям  $i_{max} \sim V^{1/2}$  и  $\eta_{max} \sim V^{1/2}$ .

Если монослойная пассивация поверхности  $C_{ads}$  отсутствует и  $R_n \gg R_{TЭЛ}$ , то при  $\Theta_{max} = 0$  соотношения (118) и (119) переписываются следующим образом:

$$i_{max} = \sqrt{\frac{\rho_{SEI} z F \sigma_{II} V}{A_0 M_{SEI}}} , \quad (120)$$

$$\eta_{max} = \sqrt{\frac{M_{SEI} V}{\rho_{SEI} \sigma_{II} A_0 z F}} . \quad (121)$$

Этот случай, также характеризуемый закономерностями  $i_{max} \sim V^{1/2}$  и  $\eta_{max} \sim V^{1/2}$ , отвечает формированию высокоомного зернистого  $SEI$ , например, по топокинетическому механизму

роста ядер из некоторого начального объема при  $n < 2$  (см. таблицу), с большим омическим сопротивлением ТЭЛ в межзеренном пространстве, которое играет роль распределенной системы пор. При этом разделение чисто омического и омически-пассивационного контроля *ECA*-хроновольтамперограмм в рамках только потенциодинамического метода представляется невозможным и к решению этой проблемы необходимо применять другие методы исследования.

Между  $i_{\max}$  и  $\eta_{\max}$  при омически-пассивационном контроле должна соблюдаться линейная зависимость, на основании которой можно различать этот вариант *ECA*-хроновольтамперометрии от *ED*-хроновольтамперометрии с необратимой реакцией, которая характеризуется линейностью зависимости  $\eta_{\max} - \ln i_{\max}$ .

Для чисто омического контроля *ECA*-хроновольтамперограмм можно разделить уравнение (120) на уравнение (121) и получить в результате выражение проводимости ТЭЛ в порах *SEI*:

$$\sigma_{II} = \frac{M_{SEI}}{\rho_{SEI} z F} \frac{i_{\max}}{\eta_{\max}} = \frac{L}{A_0} \frac{i_{\max}}{\eta_{\max}} . \quad (122)$$

Из этих же данных рассчитывается и толщина  $L$  слоя пористой интерфазы:

$$L = \sigma_{II} A_0 \frac{\eta_{\max}}{i_{\max}} . \quad (123)$$

Следует отметить, что все результаты, полученные на примере АПДК, можно отнести и к КПДК, приняв соответствующие изменения в кинетических схемах и сделав необходимые переобозначения переменных параметров.

### Заключение

В результате теоретического анализа удалось установить:

1. Импульсная гальваностатическая и потенциодинамическая релаксация в реакциях, контролируемых замедленным переносом заряда, протекает по экспоненциальным законам заряда и разряда резистивно-емкостных элементов межфазной границы, представляющих собой либо сопротивление и емкость переходной интерфазы, либо при ее отсутствии – фарадеевское сопротивление и емкость ДЭС. Установившиеся значения кинетических перенапряжений и плотностей тока не зависят от структуры и толщины переходной интерфазы. Величины резистивно-емкостных релаксационных параметров могут быть приближенно измерены импульсным гальваностатическим методом с погрешностью более 10%.

2. Импульсная гальваностатическая и потенциодинамическая релаксация в реакциях, контролируемых смешанной активационно-диффузионной кинетикой при переносе электроактивных компонентов в сплошных переходных интерфазах с толщиной превышающих диффузионные длины реагентов и продуктов, то есть, в приближении полубесконечной диффузии, протекает по известным теоретическим законам монотонного временного роста перенапряжения (гальваностатическое включение), спада (потенциостатическое включение) и перехода через максимум плотности тока (потенциодинамическое включение). Анализ этих закономерностей позволяет определять кинетические параметры переноса заряда и вещества через экспериментально определяемые величины.

3. Импульсная гальваностатическая и потенциодинамическая релаксация в реакциях, контролируемых смешанной активационно-диффузионной кинетикой при переносе электроактивных компонентов в зернистых переходных интерфазах, образуемых по топокинетическому механизму, протекает по немонотонным временным зависимостям с максимумами. Анализ температурной зависимости экстремальных времен позволяет найти кинетические параметры топохимической реакции формирования зернистой интерфазы.

4. Потенциодинамическая релаксация в реакциях, контролируемых смешанной кинетикой с образованием пассивирующих монослоев на равномерно-однородных электродных и зернистых пористых интерфазных поверхностях, протекает по немонотонным временным зависимостям параметров максимумов, определяемым скоростью развертки потенциала по различным слабым и сильным законам. Предложены способы определения стационарной изотермы электросорбции пассивирующего монослоя и внутрипористой проводимости ТЭЛ, а также толщины пористой интерфазы при чисто омическом контроле ПДК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова А.М. Электродные процессы в твердых электролитах: Дис. ... докт. хим. наук. Свердловск, 1989. 615 с.
2. Исследование процесса переноса заряда при формировании распределенных структур / А.И. Карпов, В.В. Симаков, В.В. Топоров и др. // Современные технологии в образовании и науке: Материалы докл. конф. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. С.58-60.
3. Серянов Ю.В. Анодное растворение кобальта и его сплава с железом в фосфатных растворах: Дис. ... канд. хим. наук. Саратов, 1985. 210 с.
4. Ультразвуковое фосфатирование постоянных магнитов сплава Fe-Nd-B / И.Д. Кособудский, Ю.В. Серянов, Л.В. Никитина, Н.М. Трепак // Защита металлов. 1999. Т.35. № 6. С.668-670.
5. Топокинетический механизм процессов ультразвукового фосфатирования магнитов из сплава Fe-Nd-B / И.Д. Кособудский, Ю.В. Серянов, Л.В. Никитина и др. // Неорганические материалы. 2000. Т.36. № 6. С.875-879.
6. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции. М.: Химия, 1978. 358 с.
7. Электрохимическая обработка металлов / Ю.В. Серянов, Л.А. Фоменко, Т.Н. Соколова и др.: Учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 1998. 124 с.
8. Ионный транспорт в пассивирующих слоях на литиевом электроде / Е.С. Нимон, А.В. Чуриков, А.А. Сенотов и др. // Докл. АН СССР, 1998. Т.304. № 5. С.1180-1184.
9. Феттер К. Электрохимическая кинетика / Пер. с англ.; Под ред. Я.М. Колотыркина. М.: Химия, 1967. 856 с.
10. Галюс З. Теоретические основы электрохимического анализа / Пер. с польск.; Под ред. Б.Л. Каплана. М.: Мир, 1974. 552 с.
11. Ерофеев П. Кинетика гетерогенных процессов. М.: Мир, 1976. 194 с.
12. Чуриков А.В., Львов А.Л., Нимон Е.С. Модель ионного транспорта в пассивирующих пленках на литиевом электроде // Электрохимия. 1998. Т.34. № 7. С.669-671.
13. Справочник по специальным функциям / Под ред. М.А. Абрамовица, И.С. Титан. М.: Наука, 1979. 832 с.
14. Брайнина Х.З. Инверсионная вольтамперометрия твердых фаз. М.: Химия, 1972. 192 с.
15. Выдра Ф., Штулик К., Юлакова Э. Инверсионная вольтамперометрия / Пер. с чешск.; Под ред. Б.Л. Каплана. М.: Мир, 1980. 278 с.
16. Calandra A.J, de Tacconi N.R., Pereiro R. Potentiodynamic current/potential relations for film formation under chmic control // Electrochem Acta. 1974. V.19. № 6. P.901-905.
17. Колотыркин Я.М., Попов Ю.А. Обобщенная монослойная модель процесса первичной пассивации металлического электрода в фосфатном растворе // Электрохимия. 1973. Т.11. № 3. С.406-411.
18. Колотыркин Я.М., Попов Ю.А., Ларионович Г.М. Кинетика первичной пассивации железа в растворах фосфатов // Электрохимия. 1972. Т.8. № 7. С.3-7.
19. Колотыркин Я.М., Попов Ю.А., Васильев А.А. К вопросу о механизме пассивации железного электрода в растворах фосфатов // Электрохимия. 1993. Т.29. № 12. С.1855-1857.

20. Черненко В.И., Литовченко К.И., Папанова И.И. Прогрессивные импульсные и переменного-токовые режимы электролиза. Киев: Наукова думка, 1986. 176 с.

21. Агладзе Т.П., Сушкова О.О., Сасаки Х. Исследование кинетики элементарных стадий реакции ионизации никеля импульсным потенциостатическим методом // Электрохимия. 1980. Т.16. № 10. С. 1459-1466.

**Архипова Наталия Викторовна** –

кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия»  
Саратовского государственного технического университета

**Михайлова Антонина Михайловна** –

доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химия»  
Саратовского государственного технического университета

**Серянов Юрий Владимирович** –

доктор химических наук, профессор кафедры  
«Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки»  
Саратовского государственного технического университета.

УДК 539.7

**А.В. Ефимов, Ю.В. Чеботаревский, Д.Г. Павлов**

**ТЕРМОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ  
ТОНКОЙ КРУГЛОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ  
ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ НЕСТАЦИОНАРНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА**

*На основе теории течения с использованием метода конечных элементов рассматривается термоупругопластическое состояние тонкой диэлектрической пластины нагреваемой локальным нестационарным внутренним источником тепла. Предложенный в данной работе подход к решению задачи позволил обнаружить в процессе нагружения эффект разделения пластической зоны на части с разным характером пластического течения.*

**A.V. Efimov, Yu.V. Chebotarevsky, D.G. Pavlov**

**THERMAL ELASTOPLASTIC STATE OF THE THIN ROUND DIELECTRIC PLATE  
AT LOCAL HEATING BY NON-STATIONARY HEAT SOURCE**

*In this work thermal elastoplastic state of the thin dielectric plate heated by local non-stationary inner heat source is shown by final elements method on the basis of flow theory.*

*The approach we are offering in this work, allows to reveal in the process of loading the effect of the plastic zone division into parts with the different character of plastic flow.*

При создании современных приборов в качестве конструктивных элементов используются хрупкие диэлектрики. Их особенность состоит в том, что, оставаясь хрупкими при нормальной температуре, они могут испытывать макропластические деформации в зонах высокотемпературного нагрева.

В данной работе рассмотрим термоупругопластическое состояние тонкой диэлектрической пластины радиуса  $R$ , нагреваемой локальным нормально распределенным нестационарным внутренним источником тепла с центром нагрева, смещенным относительно центра пластины. Определение температурного поля такой пластины, при условии, что на ее верхней и нижней поверхностях осуществляется теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона, рассматривалось в работе [2]. В ней же проведено исследование термоупругопластического состояния пластины на базе теории малых упругопластических деформаций с применением принципа возможных изменений напряженного состояния в процессе нагружения (нагрева). В данной работе на основе теории течения с использованием метода конечных элементов рассматриваются как процесс нагружения, так и процесс разгрузки. Проводится сравнительный анализ результатов, полученных с применением обеих теорий. Делается вывод о том, что использование теории течения и метода конечных элементов позволяет получить без применения каких-либо искусственных приемов более общие качественные результаты.

На основании решения задачи теплопроводности [2] температурное поле аппроксимируем следующей функцией:

$$\theta = t e^{-t} e^{-k(r^2 + L^2 - 2rL \cos(\varphi - \varphi_0))}, \quad (1)$$

где  $(L, \varphi_0)$  – координаты центра нагрева в полярной системе координат с началом координат в центре пластины;  $t$  – время нагрева пластины;  $k$  – коэффициент сосредоточенности источника.

При записи физических уравнений будем рассматривать материал пластины как идеально упругий, при значениях температуры  $\theta < \theta_{nl}$ , и как идеально упругопластический при  $\theta \geq \theta_{nl}$ , где  $\theta_{nl}$  – определенная для данного материала температура, по достижении которой он может испытывать макропластические деформации. При этом воспользуемся зависимостью между компонентами тензоров приращения напряжений и деформаций теории течения Прандтля-Рейсса [3]:

$$d\sigma_{ij} = D \left( d\varepsilon_{ij} - \alpha \delta_{ij} d\theta - \lambda^* \frac{df}{d\sigma_{ij}} \right) \quad (i, j = r, \varphi). \quad (2)$$

Здесь

$$D = \begin{pmatrix} \frac{4\mu^2 + 4\mu\lambda}{2\mu + \lambda} & \frac{2\mu\lambda}{2\mu + \lambda} & 0 \\ \frac{2\mu\lambda}{2\mu + \lambda} & \frac{4\mu^2 + 4\mu\lambda}{2\mu + \lambda} & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix}.$$

– матрица коэффициентов упругости;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения;  $\delta_{rr} = \delta_{\varphi\varphi} = 1$ ,  $\delta_{r\varphi} = \delta_{\varphi r} = 0$ , а множитель  $\lambda^* = 0$  при упругом поведении материала и в

процессе разгрузки ( $f < 0$ ),  $\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$ ,  $\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$  – параметры Ламе.

Специфику поведения хрупких неметаллических материалов при нагреве учтем при задании поверхности текучести уравнением

$$f = \sigma_u^2 - (\sigma_0^*(\theta))^2 = 0, \quad (3)$$

где

$$\sigma_0^*(\theta) = \begin{cases} \infty & \text{при } \theta < \theta_{nl}, \\ \sigma_0 & \text{при } \theta \geq \theta_{nl}; \end{cases}$$

$\sigma_u$  – интенсивность напряжений, а  $\sigma_0$  – предел текучести материала.

При заданном температурном поле решение рассматриваемой термоупругопластической задачи сводится к определению компонент тензоров напряжений  $\sigma_{ij}$  и деформаций  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j=r, \varphi$ ) и составляющих вектора перемещения  $u$  и  $v$  из уравнений равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{r \partial \varphi} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_\varphi}{r \partial \varphi} + 2 \frac{\tau_{r\varphi}}{r} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

геометрических соотношений

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r}, \quad \gamma_{r\varphi} = \frac{\partial u}{r \partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \quad (5)$$

и физических уравнений, учитывающих специфику поведения хрупких неметаллических материалов (2), при соответствующих граничных условиях.

Решение поставленной задачи с применением стандартных конечно-элементных комплексов на основе теории течения было сведено к минимизации функционала Лагранжа, из условия стационарности которого следует:

$$\int_S (\sigma_{rr} \delta \varepsilon_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} \delta \varepsilon_{\varphi\varphi} + 2 \sigma_{r\varphi} \delta \varepsilon_{r\varphi}) dS = 0, \quad (6)$$

где  $S$  – площадь поверхности пластины.

При этом учитывалось, что пластина не имеет смещения как жесткое целое  $u(0,0)=v(0,0)=0$ ,  $v(R,0)=0$  и ее контур свободен от внешней нагрузки  $\sigma_{rr}=\sigma_{r\varphi}=0$ .

Для подтверждения достоверности получаемых результатов было проведено тестирование программы расчета на базе аналитического решения [4] осесимметричной задачи о термоупругопластическом состоянии хрупкой диэлектрической пластины, нагреваемой сосредоточенным источником тепла.

С использованием построенного алгоритма расчета было проведено исследование напряженно-деформируемого состояния пластины при следующих значениях параметров:  $R=10^{-3}$  м,  $k=10^6 \div 10^9$  м,  $L=(0,3 \div 1) \cdot 10^{-3}$  м,  $t=(0,3 \div 1) \cdot 10^{-4}$  с,  $E=3,6 \cdot 10^{11}$  н/м<sup>2</sup>,  $\nu=0,3$ .

Сравнительный анализ результатов расчета на основе теории течения с данными, полученными в работе [2] на базе деформационной теории, показал, что в процессе нагружения при расположении центра источника тепла в областях, достаточно далеких от края пластины, и при значениях коэффициента его сосредоточенности  $k \geq 10^8$  м<sup>-2</sup> (независимо от расположения центра нагрева) имеет место их хорошее как количественное, так и качественное совпадение. При смещении центра нагрева к краю пластины и уменьшении коэффициента сосредоточенности источника тепла наблюдается не только количественное несовпадение результатов, но и качественное изменение картины поведения напряжений. Причем при всех рассмотренных режимах теплового воздействия касательные напряжения по абсолютной величине оказались пренебрежимо малыми по сравнению с нормальными.

Ниже в качестве примера на рис. 1-3 показаны графики поведения интенсивности  $\sigma_u$  (штрихпунктирные линии) и нормальных напряжений  $\sigma_r$  (пунктирные линии) и  $\sigma_\varphi$  (сплошные линии) по радиусу пластины при  $\varphi=0$  в моменты времени:  $t=0,3 \cdot 10^{-4}$  с,  $t=0,6 \cdot 10^{-4}$  с,  $t=10^{-4}$  с.

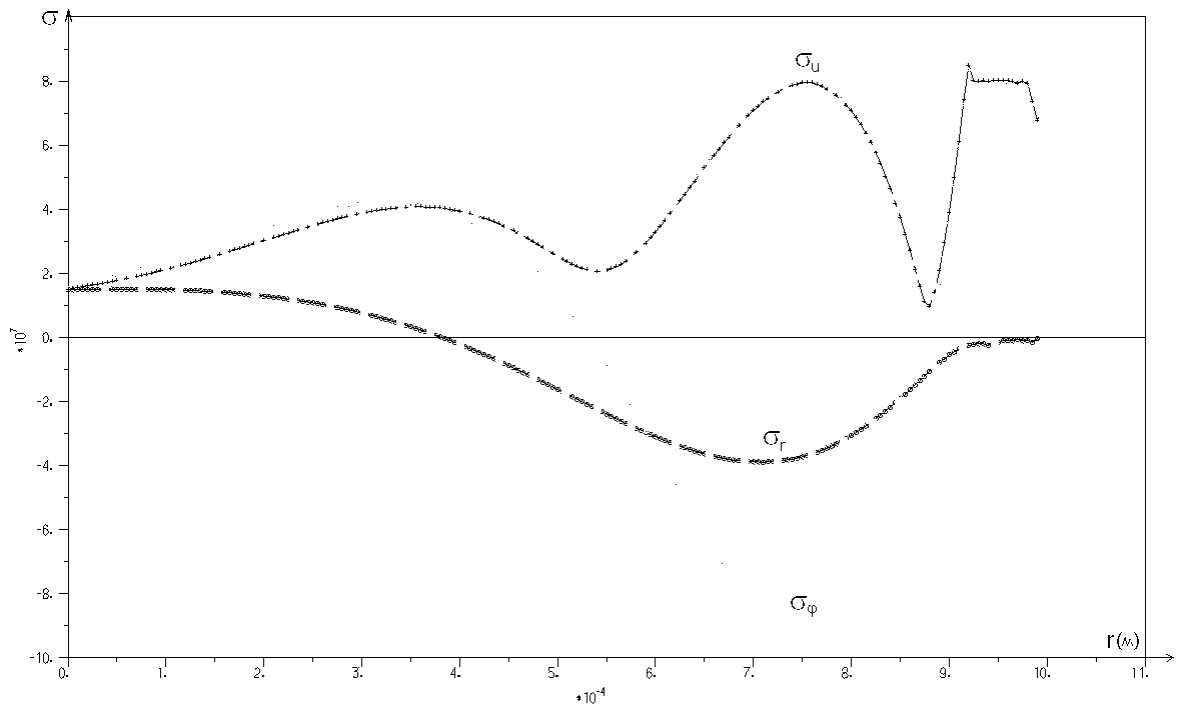


Рис. 1

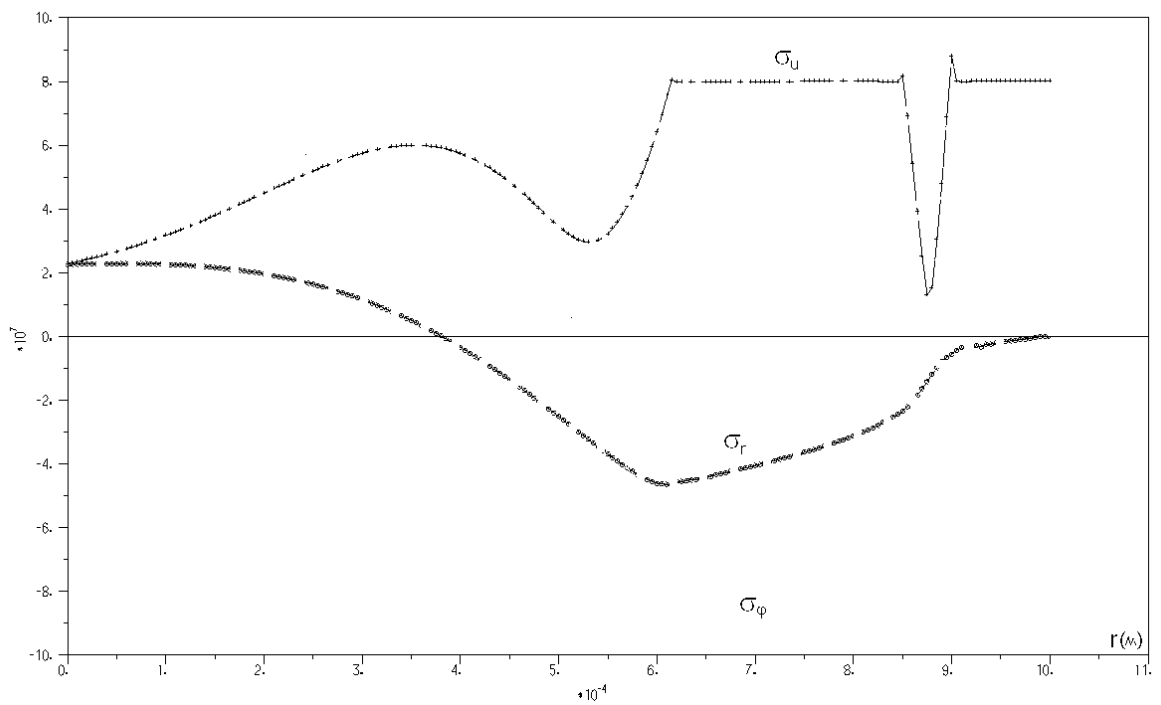


Рис. 2



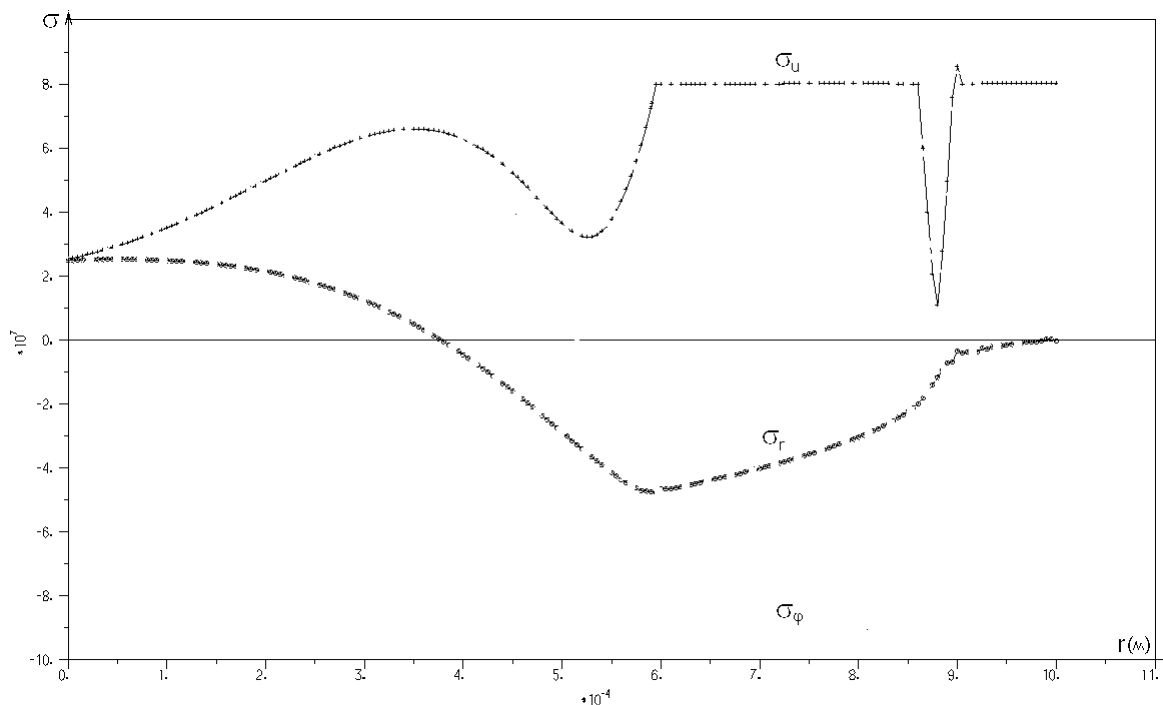


Рис. 3

В соответствии с принятым условием текучести (3) индикатором, позволяющим различать области пластины с упругим и пластическим характером поведения материала, является интенсивность напряжений  $\sigma_u$ . Анализируя график её поведения на рис. 1, приходим к выводу, что к моменту времени  $t=0,3 \cdot 10^{-4}$  с в пластине возникает зона пластических деформаций, выходящая на её край. Причем эта зона значительно меньше того пространства, в пределах которого выполняется необходимое для возникновения пластических деформаций температурное условие  $\theta \geq \theta_{пл}$ . Это объясняется низким уровнем предшествующего термоупругонапряженного состояния пластины, недостаточным для появления пластических деформаций. К моменту времени  $t=0,6 \cdot 10^{-4}$  с зона пластических деформаций разделяется на две части (краевую и внутреннюю) с различным характером пластического течения. К моменту окончания теплового воздействия источника  $t=10^{-4}$  с происходит дальнейшее увеличение размеров обеих зон.

Поскольку касательное напряжение  $\sigma_{r\phi}$  пренебрежимо мало по сравнению с нормальными  $\sigma_r$  и  $\sigma_\phi$ , приближенно можно считать главные напряжения равными  $\sigma_1 \approx \sigma_{rr}$ ,  $\sigma_2 \approx \sigma_{\phi\phi}$ ,  $\sigma_3 \approx \sigma_{zz} = 0$ , и условие текучести (3) преобразовать к виду:

$$\sigma_{rr}^2 + \sigma_{\phi\phi}^2 - \sigma_r \sigma_\phi = \sigma_0^2 \quad (7)$$

Проводя аналогию с условием текучести Треска, с геометрической точки зрения соотношение (7) можно рассматривать как уравнение эллипса, описанного вокруг шестиугольника Треска (рис. 4).

Судя по характеру поведения напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\phi$  и интенсивности  $\sigma_u$ , в пределах краевой части пластической зоны реализуется режим пластического течения, соответствующий дуге эллипса Губера-Мизеса, заключенной между вершинами А и В шестиугольника Треска. Это позволяет считать, что здесь имеет место режим, подобный логарифмическому, в случае использования условия текучести Треска.

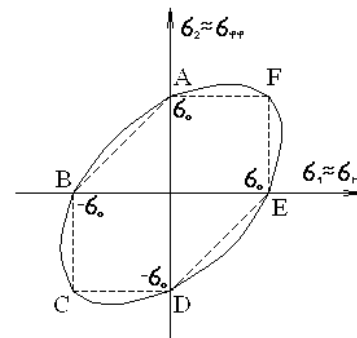


Рис. 4

Во внутренней части пластической зоны реализуется режим, отвечающий дуге эллипса Губера-Мизеса, заключенной между вершинами С и D, то есть аналогичный режиму типа  $1/r$  в случае условия текучести Треска.

При расположении центра источника достаточно далеко от края ( $L \leq 0,6 \cdot 10^{-3}$  м) разделения пластической зоны на 2 части не происходит. На рис. 5 в качестве примера показан график поведения напряжений для указанных выше параметров,  $L=0,4 \cdot 10^{-3}$  м и  $t=10^{-4}$  с.

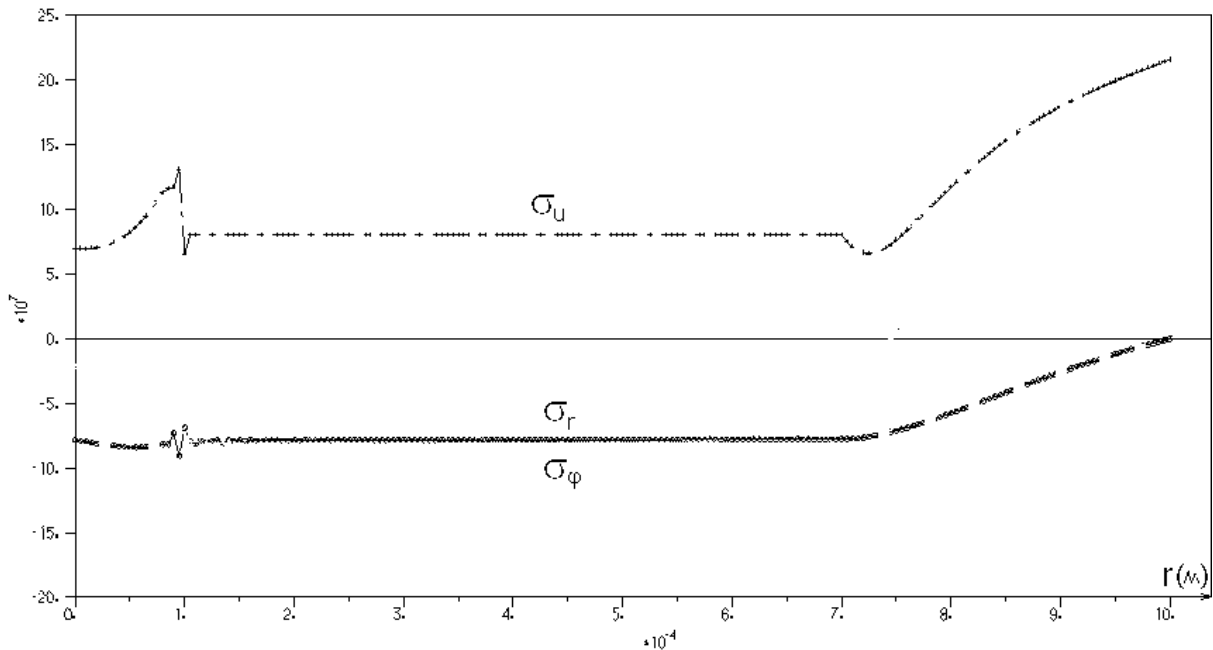


Рис. 5

Анализируя характер поведения интенсивности напряжений на этом рисунке, легко увидеть, что при данных параметрах пластическая зона занимает всю область, в которой возможно появление пластических деформаций, и в ней реализуется режим пластического течения, отвечающий точке С ( $\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = -\sigma_0$ ) на эллипсе Губера-Мизеса. То есть здесь имеет место совпадение результатов при использовании любого из указанных выше условий текучести.

Таким образом, предложенный в данной работе подход к решению задачи позволил обнаружить в процессе нагружения «краевой эффект» разделения пластической зоны на части с разным характером пластического течения. Кроме того, данный подход в отличие от способа решения, применяемого в [3], дает возможность исследовать напряженно-деформируемое состояние пластины в процессе разгрузки и определить остаточные напряжения без применения каких-либо дополнительных искусственных приемов. Анализ процесса разгрузки в силу ограниченности объема данной статьи здесь не приводится и будет дан в отдельной работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов / Под общ. ред. В.И. Мяченкова. М.: Машиностроение, 1989. 520 с.
2. Павлов Д.Г. Температурные поля и напряженно-деформированное состояние круглых пластин при нестационарном локальном нагреве источником тепла: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 1990. 18 с.

3. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды: Учебник. 3-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1990. 310 с.

4. Чеботаревский Ю.В. Напряженное состояние бесконечной пластины при воздействии импульсного нормально распределенного источника тепла // Задачи прикладной теории упругости: Межвуз. науч. сб. Саратов: СПИ, 1985. С.118-122.

5. Павлов Д.Г., Харламова И.Ю., Чеботаревский Ю.В. К решению задачи термопластичности о нагреве тонкой кольцевой пластины локальным источником тепла // Прочность и устойчивость элементов конструкций в агрессивных средах: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1990. С.56-58.

**Ефимов Алексей Владимирович** –  
аспирант кафедры «Теоретическая механика»  
Саратовского государственного технического университета

**Чеботаревский Юрий Викторович** –  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика»  
Саратовского государственного технического университета

**Павлов Дмитрий Геннадьевич** –  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика»  
Саратовского государственного технического университета

УДК 517.5:518

**В.И. Колпаков**

### **ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЙ ПАРАБОЛИЧЕСКИЙ СПЛАЙН ДЛЯ ФУНКЦИИ ИЗ КЛАССА $W^3L_\infty(M, a, b)$ , ЗАДАННОЙ $\delta$ -ПРИБЛИЖЕНИЕМ В $C[a, b]$**

*Предложен метод построения оптимального по порядку оператора – интерполяционного параболического сплайна для функции класса  $W^3L_\infty(M, a, b)$ , заданной  $\delta$ -приближением в  $C[a, b]$ , с помощью которого одновременно восстанавливаются функция и ее производные. Доказано, что шаг интерполяции является постоянным, зависящим от уровня погрешности задания входных данных  $\delta$  и константы, определяющей класс –  $M$ . Проведен вычислительный эксперимент, показавший эффективность метода.*

**V.I. Colpakov**

### **INTERPOLATING THE PARABOLIC SPLINE FOR FUNCTION $W^3L_\infty(M, a, b)$ , SET $\delta$ -APPROACH IN $C[a, b]$**

*The presented method of constructing the optimum order operator interpolating which is defined through parabolic spline for the function of  $W^3L_\infty(M, a, b)$*

*type  $\delta$ -approximation in  $C[a, b]$  simultaneously restores function and its derivatives. It is proved that the interpolation pitch is the constant, depending on the error level of input data and the  $M$ -class determining constant. The computing experiment which has shown efficiency of a method is carried out.*

### Постановка задачи

Пусть функция  $f(x) \in W^3 L_\infty(M, a, b) = \left\{ f(x) \in C[a, b] : \|f^{(3)}\|_{L_\infty[a, b]} \leq M \right\}$  задана своим  $\delta$ -приближением  $f_\delta(x) \in C[a, b] : \|f_\delta - f\|_{C[a, b]} \leq \delta, 0 < \delta \leq \delta_0$ , где  $\delta$  – уровень погрешности входных данных  $f_\delta$ ,  $M$  – заданная величина,  $\delta_0 = \left( \frac{(b-a)^3}{3} \right) \frac{M}{3}$ .

Пусть заданы два множества узлов:

$$\Delta_1 \{ a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b \}, x_i = x_0 + ih, i = \overline{0, n}, h = \frac{b-a}{n};$$

$$\Delta_2 = \{ \bar{x}_i = (x_{i-1} + x_i)/2, i = \overline{1, n} \}, \bar{x}_0 = a, \bar{x}_{n+1} = b, n \geq 2, n \geq N.$$

1) Требуется по заданным  $\delta$ -приближениям  $f_\delta \in C[a, b]$  построить интерполяционный сплайн  $S_2(f_\delta, x), x \in [a, b]$ , чтобы имели место соотношения:

а)  $S_2(f_\delta, x) \in P_2, x \in (\bar{x}_i, \bar{x}_{i+1}), i = \overline{0, n}$ ;

б)  $S_2(f_\delta, x) \in C^1[a, b] \left( S_2^{(k)}(f_\delta, \bar{x}_i + 0) = S_2^{(k)}(f_\delta, \bar{x}_i - 0), i = \overline{1, n}, k = 0, 1 \right)$ ;

в)  $S_2(f_\delta, x_i) = f_\delta(x_i), i = \overline{0, n}$ .

Данная постановка задачи является новой (см. [1] гл.1, п.7, с.40).

Введем величину  $\Delta_k(\delta) = \sup_{f \in M_\delta^3} \|S_2^{(k)}(f_\delta) - f^{(k)}\|_I$  – погрешность восстановления  $k$ -й производной с помощью оператора

$S_2^{(k)}(f_\delta, x) = \frac{d^k}{dx^k} S_2(f_\delta, x), x \in [a, b]$ , где  $I = C[a, b], k = 0, 1, I = L_\infty[a, b], k = 2, M_\delta^3 = \left\{ W^3 L_\infty(M, a, b) \cup f_\delta \in C[a, b] : \|f_\delta - f\|_{C[a, b]} \leq \delta \right\}, 0 < \delta \leq \delta_0$ .

2) Найти такое согласование между параметрами  $\delta, M, h$  (см. [2]), чтобы имели место неравенства  $c_{0k} \Omega_k(\delta) \leq \Delta_k(\delta) \leq c_{1k} \Omega_k(\delta), k = 0, 1, 2$ ,

где 
$$\Omega_k(\delta) = \inf_{R_k \in L(C \rightarrow C)} \sup_{f \in M_\delta^3} \|R_k f_\delta - f^{(k)}\|_{C[a, b]}$$
 –

максимальная погрешность восстановления  $k$ -й производной функции с помощью линейных ограниченных операторов  $R_k \in L(C \rightarrow C)$  на множестве  $W_\delta^3$ . Таким образом, операторы  $S_2(f_\delta, x), x \in [a, b]$  должны быть оптимальными по порядку операторами одновременного восстановления функции вместе с производными,  $c_{0k}, c_{1k}$  – константы.

### 1. Построение интерполяционного сплайна $S_2(f_\delta, x), x \in [a, b]$

Пусть  $S_2^{(1)}(f_\delta, \bar{x}_i) = m_{i, \delta}, i = \overline{0, n+1}$  – моменты сплайна, определенные в узлах сплайна  $\Delta_2, y_{i, \delta} = f_\delta(x_i), i = \overline{0, n}$  – значения функции  $f_\delta(x)$ , заданные в узлах интерполяции  $\Delta_1$ , тогда:

$$S_{\delta}^{(2)}(f_{\delta}, x) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{m_{1,\delta} - m_{0,\delta}}{h/2}, \bar{x}_0 \leq x \leq \bar{x}_1; \frac{m_{i+1,\delta} - m_{i,\delta}}{h}, \bar{x}_i < x \leq \bar{x}_{i+1}, i = \overline{0, n-1}; \\ \frac{m_{n+1,\delta} - m_{n,\delta}}{h/2}, \bar{x}_n \leq x \leq \bar{x}_{n+1} \end{array} \right\},$$

то есть  $S_2^{(2)}(f_{\delta}, x)$  является кусочно-постоянной функцией на  $[a, b]$ .

Интегрируя  $S_2^{(2)}(f_{\delta}, x)$  от  $\bar{x}_i$  до  $x \in [\bar{x}_i, \bar{x}_{i+1}]$ ,  $i = \overline{0, n}$ , получим  $S_2^{(1)}(f_{\delta}, x) = \left\{ m_{i,\delta} + \frac{m_{i+1,\delta} - m_{i,\delta}}{\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i} (x - \bar{x}_i), x \in [\bar{x}_i, \bar{x}_{i+1}], i = \overline{0, n} \right\}$ , то есть  $S_2^{(1)}(f_{\delta}, x)$  является кусочно-линейной функцией на  $[a, b]$ .

Интегрируя  $S_2^{(1)}(f_{\delta}, x)$  от  $\bar{x}_i$  до  $x \in [\bar{x}_i, \bar{x}_{i+1}]$ ,  $i = \overline{0, n}$  (то есть слева направо), получим

$$S_2^+(f_{\delta}, x) = \left\{ \begin{array}{l} y_{0,\delta} + m_{0,\delta}(x - \bar{x}_0) + \frac{m_{1,\delta} - m_{0,\delta}}{\bar{x}_1 - \bar{x}_0} \frac{(x - \bar{x}_0)^2}{2}, \bar{x}_0 \leq x \leq \bar{x}_1; \\ S_2^+(f_{\delta}, \bar{x}_i) + m_{i,\delta}(x - \bar{x}_i) + \frac{m_{i+1,\delta} - m_{i,\delta}}{\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i} \frac{(x - \bar{x}_i)^2}{2}, \bar{x}_i \leq x \leq \bar{x}_{i+1}, i = \overline{1, n} \end{array} \right\},$$

где  $S_2^+(f_{\delta}, \bar{x}_i) = y_{i,\delta} - m_{i,\delta} \frac{3h}{8} - m_{i+1,\delta}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , то есть  $S_2^+(f_{\delta}, x)$  является кусочно-параболической функцией на  $[a, b]$ . При построении  $S_2^+(f_{\delta}, x)$  мы интегрировали  $S_2^{(1)}(f_{\delta}, x)$  слева направо, теперь проделаем это же справа налево только для  $x \in [\bar{x}_i, \bar{x}_{i+1}]$ , то есть проинтегрируем от  $x \in [\bar{x}_i, \bar{x}_{i+1}]$  до  $\bar{x}_{i+1}$ ,  $i = \overline{1, n-1}$ , тогда получим

$$S_2^-(f_{\delta}, x) = \left\{ \begin{array}{l} S_2^+(f_{\delta}, x), \bar{x}_0 \leq x \leq \bar{x}_1; S_2^-(f_{\delta}, \bar{x}_{i+1}) - m_{i,\delta}(\bar{x}_{i+1} - x) - \\ - \frac{m_{i+1,\delta} - m_{i,\delta}}{2} h + \frac{m_{i+1,\delta} - m_{i,\delta}}{\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i} \frac{(x - \bar{x}_i)^2}{2} \end{array} \right\},$$

где  $S_2^-(f_{\delta}, \bar{x}_{i+1}) = y_{i,\delta} + m_{i,\delta} \frac{h}{8} + m_{i+1,\delta} \frac{3h}{8}$ ,  $\bar{x}_i \leq x \leq \bar{x}_{i+1}$ ,  $i = \overline{1, n-1}$ ;  $S_2^-(f_{\delta}, x)$ ,  $\bar{x}_n \leq x \leq \bar{x}_{n+1}$ .

**Теорема 1.**  $S_2^+(f_{\delta}, x) = S_2^-(f_{\delta}, x)$ ,  $x \in [a, b]$ .

**Определение 1.**  $S_2(f_{\delta}, x) = \frac{1}{2}(S_2^+(f_{\delta}, x) + S_2^-(f_{\delta}, x))$ ,  $x \in [a, b]$ .

Построим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для определения моментов  $\{m_{i,\delta}\}$ ,  $i = \overline{0, n}$ . Для этого воспользуемся свойством «b» сплайна  $S_2(f_{\delta}, x)$ . Так как по теореме 1  $S_2^+(f_{\delta}, x) = S_2^-(f_{\delta}, x)$ ,  $x \in [a, b]$ , поэтому для вывода СЛАУ для моментов можно взять любой из них. Пусть  $i=0$ , тогда

$$\begin{aligned} S_2^+(f_{\delta}, \bar{x}_1 - 0) &= S_2^-(f_{\delta}, \bar{x}_1 + 0) \Rightarrow y_{0,\delta} + m_{0,\delta} \frac{h}{2} + \frac{m_{1,\delta} - m_{0,\delta}}{h/2} \frac{(h/2)^2}{2} = \\ &= S_2^-(f_{\delta}, \bar{x}_1) + m_{1,\delta} h + \frac{m_{2,\delta} - m_{1,\delta}}{h} \frac{h^2}{2} \Rightarrow y_{0,\delta} + m_{0,\delta} \frac{h}{2} + (m_{1,\delta} - m_{0,\delta}) \frac{h}{4} = y_{1,\delta} - m_{1,\delta} \frac{h}{2} - (m_{2,\delta} - m_{1,\delta}) \frac{h}{8}, \end{aligned}$$

после приведения подобных членов, получим первое уравнение:

$$i = 0 \quad 2m_{0,\delta} + 5m_{1,\delta} + m_{2,\delta} = 8 \frac{y_{1,\delta} - y_{0,\delta}}{h}.$$

Теперь рассмотрим случай  $i, i = \overline{2, n-1}$ , тогда имеем  $S_2(f_\delta, \bar{x}_i - 0) = S_2(f_\delta, \bar{x}_i + 0)$ , откуда получаем

$$y_{i-1,\delta} - \frac{3h}{8}m_{i-1,\delta} - \frac{h}{8}m_{i,\delta} + m_{i-1,\delta}h + \frac{m_{i,\delta} - m_{i-1,\delta}}{h} \frac{h^2}{2} = y_{i,\delta} - m_{i,\delta} \frac{3h}{8} - m_{i+1,\delta} \frac{h}{8} \Rightarrow$$

$$m_{i-1,\delta} + 6m_{i,\delta} + m_{i+1,\delta} = 8 \frac{y_{i,\delta} - y_{i-1,\delta}}{h}.$$

Аналогично для  $i = n + 1$

$$m_{n-1,\delta} + 5m_{n,\delta} + 2m_{n+1,\delta} = 8 \frac{y_{n,\delta} - y_{n-1,\delta}}{h}.$$

Таким образом, имеем

$$\begin{aligned} i = 0 \quad & 2m_{0,\delta} + 5m_{1,\delta} + m_{2,\delta} = 8 \frac{y_{1,\delta} - y_{0,\delta}}{h}; \\ i = \overline{2, n-1} \quad & m_{i-1,\delta} + 6m_{i,\delta} + m_{i+1,\delta} = 8 \frac{y_{i,\delta} - y_{i-1,\delta}}{h}; \\ i = n + 1 \quad & m_{n-1,\delta} + 5m_{n,\delta} + m_{n+1,\delta} = 8 \frac{y_{n,\delta} - y_{n-1,\delta}}{h}. \end{aligned} \quad (1)$$

СЛАУ (1) содержит  $n$  уравнений, а неизвестных  $n+2$ , поэтому она дополняется следующими уравнениями  $i = 1 \quad m_{1,\delta} = \frac{y_{1,\delta} - y_{0,\delta}}{h}$ ,  $i = n \quad m_{n,\delta} = \frac{y_{n,\delta} - y_{n-1,\delta}}{h}$ , где  $h$  – пока свободный параметр. В построенной СЛАУ (1) правые части представляют значения оптимального оператора восстановления первой производной функции внутри отрезка  $[\bar{x}_1, \bar{x}_n] \subset [a, b]$

$$R_h(f_\delta, \bar{x}_i) = \frac{f_\delta\left(x_i + \frac{h}{2}\right) - f_\delta\left(x_i - \frac{h}{2}\right)}{h} \quad \text{при } h = h^* = 2\alpha^* = 2\left(\frac{3\delta}{M}\right)^{1/3} \quad \text{в точках } x = \bar{x}_i, i = \overline{1, n} \quad (\text{см. [2]})$$

гл. 6) и являются постоянными для всех  $x \in [\bar{x}_1, \bar{x}_n] \subset [a, b]$ .

Теперь СЛАУ для определения моментов имеет вид:

$$i = 0 \quad m_{0,\delta}^* = \frac{1}{2}(3m_{1,\delta}^* - m_{2,\delta}^*) = w_{0,\delta}, \quad i = 1 \quad m_{1,\delta}^* = R_{h^*}(f_\delta, \bar{x}_1) = w_{1,\delta}$$

$$i = 2 \quad 6m_{2,\delta} + m_{3,\delta} = 8R_{h^*}(f_\delta, \bar{x}_2) - m_{1,\delta}^* = w_{2,\delta},$$

$$i = \overline{3, n-2} \quad m_{i-1,\delta} + 6m_{i,\delta} + m_{i+1,\delta} = 8R_{h^*}(f_\delta, \bar{x}_i) = w_{i,\delta}, \quad (2)$$

$$i = n-1 \quad m_{n-2,\delta} + 6m_{n-1,\delta} = 8R_{h^*}(f_\delta, \bar{x}_{n-1}) - m_{n,\delta}^* = w_{n-1,\delta}, \quad i = n \quad m_{n,\delta}^* = R_{h^*}(f_\delta, \bar{x}_n) = w_{n,\delta},$$

$$i = n+1 \quad m_{n+1,\delta} = \frac{1}{2}(3m_{n,\delta}^* - m_{n-1,\delta}^*) = w_{n+1,\delta}.$$

Пусть  $m_\delta = (m_{2,\delta}, m_{3,\delta}, \dots, m_{n-1,\delta})$ ,  $w_\delta = (w_{2,\delta}, w_{3,\delta}, \dots, w_{n-1,\delta})$ ,

$$A = \begin{pmatrix} 6 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 6 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 6 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 6 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 6 \end{pmatrix}.$$

Матрица  $A$  имеет доминирующую главную диагональ и поэтому существует обратная матрица  $A^{-1}$ , оценка которой имеет вид:

$$\|A^{-1}\| \leq \left\{ \min_i \left( |a_{ii}| - \sum_{i \neq j} |a_{ij}| \right) \right\}^{-1} = \frac{1}{4} \text{ и не зависит от размерности матрицы, и } m_\delta = A^{-1}w_\delta.$$

### 2. Представление погрешностей моментов

Пусть  $f_\delta = f + \delta\omega$ ,  $u_{i,\delta} = m_{i,\delta}^* - f^{(1)}(\bar{x}_i)$ ,  $i = \overline{0, n+1}$ ,  $\varepsilon_i = \omega(x_i) - \omega(x_{i-1})$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,

$$f^{(1)} = (f^{(1)}(\bar{x}_2), f^{(1)}(\bar{x}_3), \dots, f^{(1)}(\bar{x}_{n-1})), \quad z_\delta = (z_{2,\delta}, z_{3,\delta}, \dots, z_{n-1,\delta}).$$

**Теорема 2.** На классе  $W_\delta^3$  для  $h=h^*$  справедливы равенства:

$$1) u_{0,\delta} = \frac{1}{2} \left( 3 \frac{\delta}{h^*} \varepsilon_1 - u_{2,\delta} \right) + \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_2} K_0(t) f^{(3)}(t) dt = z_{0,\delta},$$

где

$$K_0(t) = \left( \frac{3}{4h^*} (t - \bar{x}_0)^2 - (t - \bar{x}_0), \right.$$

$$\left. \bar{x}_0 \leq t \leq \bar{x}_1; \frac{3}{4h^*} (x_1 - t)^2 - \frac{1}{2} (\bar{x}_2 - t), \bar{x}_1 \leq t \leq x_1; -\frac{1}{2} (\bar{x}_2 - t), x_1 \leq t \leq \bar{x}_2 \right);$$

$$2) u_{1,\delta} = \frac{\delta}{h^*} \varepsilon_1 + \int_{\bar{x}_0}^{x_1} K_1(t) f^{(3)}(t) dt = z_{1,\delta},$$

где  $K_1(t) = \left( \frac{1}{2h^*} (t - \bar{x}_0)^2, \bar{x}_0 \leq t \leq \bar{x}_1; \frac{1}{2h^*} (x_1 - t)^2, \bar{x}_1 \leq t \leq x_1 \right).$

$$A(m_\delta - f^{(1)}) = Au_\delta = z_\delta, \quad u_\delta = (u_{2,\delta}, u_{3,\delta}, \dots, u_{n-1,\delta}) \Rightarrow u_\delta = A^{-1}z_\delta;$$

$$3) z_{2,\delta} = \frac{\delta}{h^*} (8\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_3} K_2(t) f^{(3)}(t) dt, \quad K_2(t) = \left( -\frac{1}{2h^*} (t - \bar{x}_0)^2, \bar{x}_0 \leq t \leq \bar{x}_1; \right.$$

$$\left. -\frac{1}{2h^*} (t - x_1)^2 - (t - \bar{x}_1), \bar{x}_1 \leq t \leq x_1; \frac{4}{h^*} (t - x_1)^2 - (t - \bar{x}_1), x_1 \leq t \leq \bar{x}_2; \frac{4}{h^*} (t - x_2)^2 + \right. \\ \left. + (t - \bar{x}_3), \bar{x}_2 \leq t \leq x_2; t - \bar{x}_3, x_2 \leq t \leq \bar{x}_3 \right);$$

$$4) z_{i,\delta} = 8 \frac{\delta}{h^*} \varepsilon_i + \int_{\bar{x}_{i-1}}^{\bar{x}_{i+1}} K_i(t) f^{(3)}(t) dt, \quad i = \overline{3, n-2}, \quad K_i(t) = \left( -(t - \bar{x}_i), \bar{x}_{i-1} \leq t \leq x_{i-1}; \right.$$

$$\left. \frac{1}{2h^*} (t - x_{i-1})^2 - (t - \bar{x}_{i-1}), x_{i-1} \leq t \leq \bar{x}_i; \frac{1}{2h^*} (t - x_i)^2 + (t - \bar{x}_{i+1}), \bar{x}_i \leq t \leq x_i; \right.$$

$$\left. t - \bar{x}_{i+1}, x_i \leq t \leq \bar{x}_{i+1} \right);$$

$$5) z_{n-1,\delta} = \frac{\delta}{h^*} (8\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n) + \int_{\bar{x}_{n-2}}^{\bar{x}_{n+1}} K_{n-1}(t) f^{(3)}(t) dt, K_{n-1}(t) = -(t - \bar{x}_{n-2}), \bar{x}_{n-2} \leq t \leq x_{n-2};$$

$$\frac{4}{h^*} (t - x_{n-1})^2 + (t - \bar{x}_n), \bar{x}_{n-1} \leq t \leq \bar{x}_{n-1}; \quad -\frac{1}{2h^*} (t - x_{n-1})^2 - (t - \bar{x}_n), \bar{x}_{n-1} \leq t \leq x_{n-1};$$

$$-\frac{1}{2h^*} (t - x_n)^2, \bar{x}_n \leq t \leq \bar{x}_{n+1});$$

$$6) u_{n,\delta} = \frac{\delta}{h^*} \varepsilon_n + \int_{x_{n-1}}^{x_n} K_n(t) f^{(3)}(t) dt = z_{n,\delta}, \quad K_n(t) = \left( \frac{1}{2h^*} (t - x_{n-1})^2, x_{n-1} \leq t \leq \bar{x}_n; \right.$$

$$\left. K_n(t) = \left( \frac{1}{2h^*} (t - x_{n-1})^2, x_{n-1} \leq t \leq \bar{x}_n; \quad \frac{1}{2h^*} (\bar{x}_n \leq t \leq x_n) \right),$$

$$7) u_{n+1,\delta} = \frac{1}{2} \left( 3 \frac{\delta}{h^*} \varepsilon_n - u_{n-1,\delta} \right) + \int_{\bar{x}_{n-1}}^{\bar{x}_{n+1}} K_{n+1}(t) f^{(3)}(t) dt, K_{n+1}(t) = \left( -\frac{1}{2} (t - \bar{x}_{n-1}), \bar{x}_{n-1} \leq t \leq x_{n-1}; \right.$$

$$\left. \frac{3}{4h^*} (x_{n-1} - t)^2 - \frac{1}{2} (t - \bar{x}_{n-1}), x_{n-1} \leq t \leq \bar{x}_n; \quad \frac{3}{4h^*} (t - x_n)^2 + (\bar{x}_{n+1} - t), \bar{x}_n \leq t \leq \bar{x}_{n+1}). \right.$$

**Доказательство.** Представления для погрешностей моментов получим из системы (3) путем прибавления к обеим частям системы (3) соответствующего количества значений производной точной функции для получения выражений погрешностей моментов в точках  $\bar{x}_0, \bar{x}_1, \bar{x}_n, \bar{x}_{n+1}$ . Далее, сворачивая точные значения функции и ее производной по формуле Ньютона-Лейбница, интегрируя по частям до третьей производной и приводя подобные члены, получим утверждение теоремы для  $\bar{x}_0, \bar{x}_1, \bar{x}_n, \bar{x}_{n+1}$ . Для  $i = \overline{2, n-1}$  имеем  $\mathbf{m}_{i,\delta} - \mathbf{f}'(\bar{x}_i) = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{z}_{i,\delta}$ , т.е. для получения представления погрешности для  $i = \overline{2, n-1}$  достаточно получить представления для  $z_{i,\delta}, i = \overline{2, n-1}$ , которые выводятся аналогично.

### 3. Представление погрешности для сплайна и его производных

**Теорема 3.** На классе  $W_\delta^3$  имеют место равенства

$$1) S_2^{(2)}(f_\delta, x) - f^{(2)}(x) = \frac{1}{\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i} \left( u_{i+1,\delta} - u_{i,\delta} + \int_{\bar{x}_i}^{\bar{x}_{i+1}} T_i(x, t) f^{(3)}(t) dt \right),$$

где  $i = 0, \bar{x}_0 \leq x \leq \bar{x}_1; i = \overline{1, n-1}, \bar{x}_i < x \leq \bar{x}_{i+1}; i = n, \bar{x}_n \leq x \leq \bar{x}_{n+1}; T_i(x, t) = -(t - \bar{x}_i), \bar{x}_i \leq t \leq x; \bar{x}_{i+1} - t, x \leq t \leq \bar{x}_{i+1}, i = \overline{0, n};$

$$2) S_2^{(1)}(f_\delta, x) - f^{(1)}(x) = \frac{1}{\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i} \left( (\bar{x}_{i+1} - x) u_{i,\delta} + (x - \bar{x}_i) u_{i+1} + \int_{\bar{x}_i}^{\bar{x}_{i+1}} W_i(x, t) f^{(3)}(t) dt \right),$$

$x \in [a, b], W_i(x, t) = ((\bar{x}_{i+1} - x)(t - \bar{x}_i), \bar{x}_i \leq t \leq x; (x - \bar{x}_i)(\bar{x}_{i+1} - t), x \leq t \leq \bar{x}_{i+1}), i = \overline{0, n};$

$$3) S_2(f_\delta, x) - f(x) = \left( \delta \omega(x_0) + \frac{x - \bar{x}_0}{h^*} ((x_1 - x) u_{0,\delta} + (x - \bar{x}_0) u_{1,\delta}) + \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_1} U_0(x, t) f^{(3)}(t) dt, \right.$$

$$\left. x \in [\bar{x}_0, \bar{x}_1], U_0(x, t) = \left( -\frac{(x-t)^2}{2} + \frac{(x-\bar{x}_0)^2}{h^*} (\bar{x}_1 - t), \bar{x}_0 \leq t \leq x; \frac{(x-\bar{x}_0)^2}{h^*} (\bar{x}_1 - t), \right. \right.$$



$$\begin{aligned}
 & x \leq t \leq \bar{x}_1); \quad \frac{1}{2} \left( (S_2^+(f_\delta, x) - f(x)) + (S_2^-(f_\delta, x) - f(x)) \right), \quad \bar{x}_i \leq x \leq \bar{x}_{i+1}, \quad i = \overline{1, n-1}, \\
 & S_2^+(f_\delta, x) - f(x) = S_2^+(f_\delta, \bar{x}_i + 0) - f(\bar{x}_i) + \frac{x - \bar{x}_i}{h^*} \left( (\bar{x}_i + 2h^* - x)u_{i+1,\delta} + (x - \bar{x}_i)u_{i+1,\delta} \right) + \\
 & + \int_{\bar{x}_i}^{\bar{x}_i} U_i(x, t) f^{(3)}(t) dt, \quad U_i(x, t) = \left( -\frac{1}{2}(x-t)^2 + \frac{(x - \bar{x}_i)^2}{2h^*}(\bar{x}_{i+1} - t), \quad \bar{x}_i \leq t \leq x, \right. \\
 & * u_{i+1,\delta} - (x - \bar{x}_{i+1})u_{i,\delta} \left. \right) + \int_{\bar{x}_i}^{\bar{x}_{i+1}} V_i(x, t) f^{(3)}(t) dt, \quad V_i(x, t) = \left( -\frac{(x - \bar{x}_{i+1})^2}{2h^*}(t - \bar{x}_i), \quad \bar{x}_i \leq t \leq x; \right. \\
 & \left. \frac{(x - \bar{x}_i)^2}{2h^*}(\bar{x}_{i+1} - t), \quad x \leq t \leq \bar{x}_{i+1} \right), \quad S_2^+(f_\delta, \bar{x}_i + 0) - f(\bar{x}_i) = \delta \omega(x_i) - \frac{h^*}{8} (3u_{i,\delta} + u_{i+1,\delta}) - \\
 & - \int_{\bar{x}_i}^{\bar{x}_{i+1}} U_i(\bar{x}_i, t) f^{(3)}(t) dt, \quad S_2^-(f_\delta, x) - f(x) = S_2^-(f_\delta, \bar{x}_{i+1} - 0) - f(\bar{x}_{i+1}) + \frac{x - \bar{x}_{i+1}}{2h^*} \left( (2h^* - \bar{x}_{i+1} + x) \right. \\
 & * u_{i+1,\delta} - (x - \bar{x}_{i+1})u_{i,\delta} \left. \right) + \int_{\bar{x}_i}^{\bar{x}_{i+1}} V_i(x, t) f^{(3)}(t) dt, \quad V_i(x, t) = \left( -\frac{(x - \bar{x}_{i+1})^2}{2h^*}(t - \bar{x}_i), \quad \bar{x}_i \leq t \leq x; \right. \\
 & \left. \frac{1}{2}(t - x)^2 - \frac{(x - \bar{x}_{i+1})}{2h^*}(t - \bar{x}_i), \quad x \leq t \leq \bar{x}_{i+1} \right), \quad S_2^-(f_\delta, \bar{x}_{i+1} - 0) - f(\bar{x}_{i+1}) = \delta \omega(x_i) + \\
 & + \frac{h^*}{8} (u_{i,\delta} + 3u_{i+1,\delta}) - \int_{\bar{x}_i}^{\bar{x}_{i+1}} V_i(\bar{x}_{i+1}, t) f^{(3)}(t) dt; \\
 & \delta \omega(x_n) + \frac{\bar{x}_{n+1} - x}{h^*} \left( (x - \bar{x}_{n-1})u_{n+1,\delta} + (\bar{x}_{n+1} - x)u_{n,\delta} \right) + \int_{\bar{x}_n}^{\bar{x}_{n+1}} U_n(x, t) f^{(3)}(t) dt, \\
 & \bar{x}_n \leq x \leq \bar{x}_{n+1}, \quad U_n(x, t) = \left( \frac{1}{2}(x-t)^2 - \frac{(\bar{x}_{n+1} - x)^2}{h^*}(t - \bar{x}_n), \quad \bar{x}_n \leq t \leq x; \right. \\
 & \left. -\frac{(\bar{x}_{n+1} - x)^2}{h^*}(t - \bar{x}_n), \quad x \leq t \leq \bar{x}_{n+1} \right).
 \end{aligned}$$

**Доказательство.** Взяв определение  $S_2^{(k)}(f_\delta, x)$ ,  $k = 0, 1, 2$ , вычтем производную  $f^{(k)}(x)$ ,  $k=0, 1, 2$ , из обеих частей равенства, затем в правой части добавим и вычтем значения первой производной в соответствующих точках для получения погрешностей моментов. Далее, точные значения производной свернем по формуле Ньютона-Лейбница, проинтегрируем по частям до третьей производной, приведем подобные члены и получим утверждение теоремы.

#### 4. Оценки погрешности для моментов, сплайна и его производных

В силу симметричности СЛАУ (3) погрешности для моментов сплайна тоже имеют симметрию, тогда достаточно оценить погрешности моментов для  $i = 0, 1, 2, 3, n-2$ . Остальные оценки погрешности моментов выводятся по симметрии.

**Теорема 4.** Справедливы оценки: первая при  $h = h^* = 2\alpha^*$ ,  $0 < \delta \leq \delta_0$ , вторая при  $\delta=0$

$$\sup_{f \in M_\delta^3} \max_{2 \leq i \leq n-1} |z_{i,\delta}| \leq \begin{cases} \delta \neq 0, E_i \Omega_1(\delta) \\ \delta = 0, F_i M h^2 \end{cases},$$

где  $E_2 = E_{n-1} = \frac{35}{6}$ ,  $F_2 = F_{n-1} = \frac{17}{24}$ ,  $E_i = \frac{35}{9}$ ,  $F_i = \frac{19}{24}$ ,  $i = \overline{3, n-2}$ .

**Доказательство.** Утверждения теоремы легко получаются из представления  $z_{i,\delta}$  (см. теорему 2).

**Теорема 5.** Справедливы оценки: первая при  $h = h^* = 2\alpha^*$ ,  $0 < \delta \leq \delta_0$ , вторая при  $\delta=0$

$$\sup_{f \in M_\delta^3} \max_{0 \leq i \leq n+1} |m_{i,\delta} - f'(\bar{x}_i)| \leq \begin{cases} \delta \neq 0, C_i \Omega_1(\delta) \\ \delta = 0, D_i M h^2 \end{cases},$$

где  $C_0 = C_{n+1} = \frac{119}{72}$ ,  $D_0 = D_{n+1} = \frac{79}{192}$ ,  $C_1 = C_n = \frac{3^{\frac{2}{3}}}{2}$ ,  $D_1 = D_n = \frac{1}{24}$ ,

$$C_2 = \frac{35}{36}, D_2 = \frac{17}{24}, C_i = \frac{35}{36}, D_i = \frac{19}{24}, i = \overline{3, n-2}.$$

**Доказательство.** Пусть  $i=1$ , тогда из представления погрешности момента сплайна для  $i=1$  имеем

$$|m_{1,\delta} - f'(\bar{x}_1)| \leq \frac{\delta}{h} |\varepsilon_1| + \left| \int_{\bar{x}_0}^{x_1} K(t) f^{(3)}(t) dt \right| = |z_{1,\delta}| \leq \frac{2\delta}{h} + \|K_1\|_{L_\infty[\bar{x}_0, x_1] \rightarrow R} M,$$

так как  $|\varepsilon_1| \leq 2$ , а  $\int_{\bar{x}_0}^{x_1} K_1(t) f^{(3)}(t) dt$  представляет собой линейный функционал  $K_1$ , действующий

из  $L_\infty[\bar{x}_0, x_1]$  в  $R = (-\infty, \infty)$ . Тогда  $\|K_1\|_{L_\infty[\bar{x}_0, x_1] \rightarrow R} = \frac{1}{24} \left( \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_1} (t - \bar{x}_0)^2 dt + \int_{\bar{x}_1}^x (x_1 - t)^2 dt \right) = \frac{h^2}{24}$ .

Далее, полагая  $h=2\alpha^*$  и учитывая, что правая часть не зависит от  $f$ , получим утверждение теоремы для  $i=1$ . Аналогично доказываются и остальные утверждения теоремы.

**Теорема 6.** Справедливы оценки: первая при  $h = h^* = 2\alpha^*$ ,  $0 < \delta \leq \delta_0$ , вторая при  $\delta=0$

$$\sup_{M_\delta^3} \max_{\bar{x}_i \leq x \leq \bar{x}_{i+1}} |S_2^{(k)}(f_\delta, x) - f^{(k)}(x)| \leq \begin{cases} \delta \neq 0, A_{i,k} \Omega_k(\delta) \\ \delta = 0, B_{i,k} M h^{3-k} \end{cases} \quad i = \overline{0, n}, k = 0, 1, 2.$$

где  $A_{0,2} = A_{n,2} = \frac{167}{96}$ ,  $B_{0,2} = B_{n,2} = \frac{111}{96}$ ,  $A_{0,1} = A_{n,1} = \frac{191}{72}$ ,  $B_{0,1} = B_{n,1} = \frac{135}{192}$ ,

$$A_{0,0} = A_{n,0} = \frac{183}{32}, B_{0,0} = B_{n,0} = \frac{95}{768}, A_{i,2} = \frac{83}{96}, B_{i,2} = \frac{31}{24}, A_{i,1} = \frac{47}{36}, B_{i,1} = \frac{11}{12},$$

$$A_{i,0} = \frac{53}{8}, B_{i,0} = \frac{37}{192}, i = \overline{1, n}.$$

**Доказательство.** Справедливость утверждений теоремы доказывается так же, как и в теореме 5.

**Теорема 7.** Справедливы оценки: первая при  $h = h^* = 2\alpha^*$ ,  $0 < \delta \leq \delta_0$ , вторая при  $\delta=0$

$$\sup_{M_\delta^3} \text{vraisup}_{a \leq x \leq b} |S_2''(f_\delta, x) - f''(x)| \leq \begin{cases} \delta \neq 0, A_2 \Omega_2(\delta) \\ \delta = 0, B_2 M h \end{cases},$$

где  $A_2 = \frac{167}{96}$ ,  $B_2 = \frac{111}{96}$ ,

$$\sup_{M\delta^{\frac{1}{3}}} \max_{a \leq x \leq b} |S_2^{(k)}(f_\delta, x) - f^{(k)}(x)| \leq \begin{cases} \delta \neq 0, A_k \Omega_k(\delta) \\ \delta = 0, B_k M h^{3-k} \end{cases} \quad k = 0, 1, 2,$$

где  $A_1 = \frac{191}{73}$ ,  $B_1 = \frac{135}{192}$ ,  $A_0 = \frac{183}{32}$ ,  $B_0 = \frac{95}{768}$ ,  $\Omega_k(\delta) = e_k M^{\frac{k}{3}} \delta^{1-\frac{k}{3}}$ ,  $e_0 = 1$ ,  $e_1 = \frac{5}{2}$ ,  $e_2 = 2 * 3^{\frac{1}{3}}$ .

**Доказательство.** Справедливость утверждений теоремы вытекает из теоремы 6.

### Результаты вычислительного эксперимента

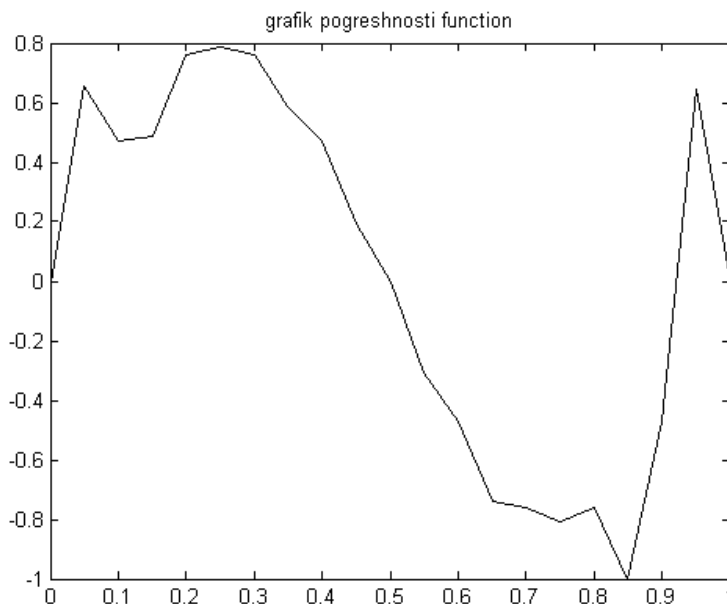


Рис. 1

Проведен вычислительный эксперимент в системе MATLAB 6.1 для функции  $f_\delta(x) = \exp(x) + \delta \sin(2\pi x)$ ,  $x \in [0, 1]$  и получены следующие результаты:

- 1)  $\delta = 1.1326e - 007$ ,  $n = 100$ ,  $ms0 = 1.1576e - 007$ ,  $ms1 = 6.9584e - 005$ ,  $ms2 = 0.0231$ ;
- 2)  $\delta = 9.0609e - 007$ ,  $n = 50$ ,  $ms0 = 9.0874e - 007$ ,  $ms1 = 2.7384e - 005$ ,  $ms2 = 0.0460$ ;
- 3)  $\delta = 1.1326e - 004$ ,  $n = 10$ ,  $ms0 = 1.1275e - 004$ ,  $ms1 = 0.0059$ ,  $ms2 = 0.2196$ ;

где  $msk = \max_{x_i = a + ih, i = \overline{0, nk}} |S_2^{(k)}(f_\delta, x_i) - f^{(k)}(x_i)|$ ,  $k = 0, 1, 2$ .

- 1)  $n0 = 200$ , 2)  $n1 = 100$ , 3)  $n1 = 20$ ,  $h = 2\alpha^*$ ,  $\alpha^* = \left(\frac{3\delta}{M}\right)^{\frac{1}{3}}$ ,  $A_{k, nk} = msk / nsk$ ,  $k = 0, 1, 2$ .

Точные оценки:

- 1)  $\delta = 1.1326e - 007$ ,  $ns0 = \delta$ ,  $ns1 = 1.0194e - 004$ ,  $ns2 = 0.0272$ ;
- 2)  $\delta = 9.0609e - 007$ ,  $n = 50$ ,  $ns0 = \delta$ ,  $ns1 = 4.0774e - 004$ ,  $ns2 = 0.0544$ ;
- 3)  $\delta = 1.1326e - 004$ ,  $n = 10$ ,  $ns0 = \delta$ ,  $ns1 = 0.0102$ ,  $ns2 = 0.2718$ ;

Точные оценки взяты из [2].

Результаты вычислительного эксперимента показали, что оценки эксперимента либо меньше, либо близки к точным оценкам на всем отрезке.

Таким образом, построенный интерполяционный параболический сплайн для функции, заданной  $\delta$ -приближением в  $C[a, b]$ , является эффективным средством восстановления функции класса  $W^3L_\infty(M, a, b)$  вместе с производными, заданной  $\delta$ -приближением в  $C[a, b]$ .

Для случая 3)  $\delta = 1.1326e - 004$ ,  $n = 10$ ,  $ms0 = 1.1275e - 004$ ,  $ms1 = 0.0059$ ,  $ms2 = 0.2196$  построены графики погрешностей: функции (рис. 1), первой производной функции (рис. 2) и второй производной функции (рис. 3), которые показывают поведение погрешности на отрезке  $[a, b]$ .

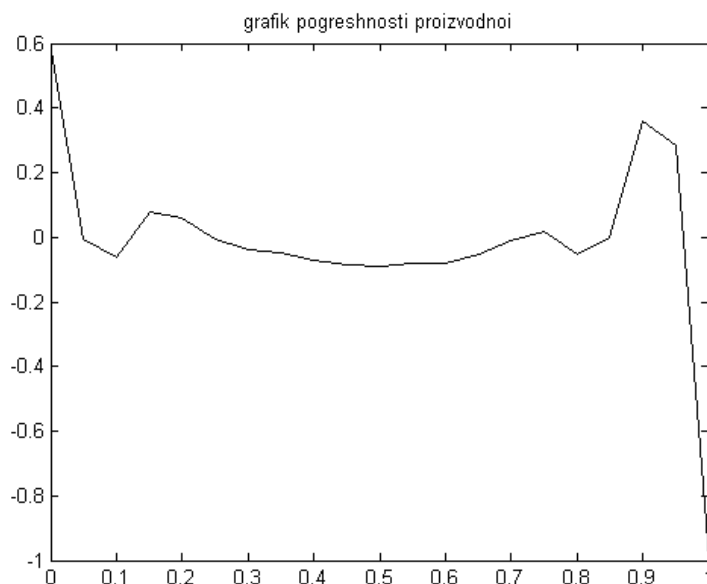


Рис. 2



Рис. 3

$$A_{0,200} = 1.02, A_{1,200} = 0.682, A_{2,200} = 0.849; A_{0,100} = 1.001, A_{1,100} = 0.067, A_{2,100} = 0.845;$$

$$A_{0,20} = 0.995, A_{1,20} = 0.578, A_{2,20} = 0.807.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Завьялов Ю.С., Леус В.А., Скороспелов Ю.С. Сплаины в инженерной геометрии. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
2. Колпакова Э.В., Колпаков В.И. Восстановление математических объектов по неполно заданной информации. Саратов: СГТУ, 1995. 136 с.

**Колпаков Виктор Иванович** –  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Прикладная математика и теория навигационных приборов»  
Саратовского государственного технического университета

УДК 539.3, 534.1

**В.А. Крысько, Н.Е. Савельева**

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ОБОЛОЧЕК ПРИ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОМ ВНЕШНЕМ ДАВЛЕНИИ**

*Исследуются колебания замкнутых цилиндрических оболочек кругового сечения конечной длины при действии поперечной знакопеременной локальной нагрузки в рамках нелинейной классической теории. Переход от уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений по времени (задача Коши) осуществляется с помощью метода Бубнова в высших приближениях. В свою очередь, задача Коши решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Численный анализ проводится на основе нелинейной динамики и качественной теории дифференциальных уравнений. Разработан новый сценарий перехода колебаний оболочки в состояние хаоса, выявлен новый критерий жесткой потери устойчивости.*

**V.A. Krysko, N.E. Savelyeva**

**STOCHASTIC DYNAMICS OF CLOSED CYLINDRICAL SHELLS EXPOSED  
TO NON-SYMMETRICAL EXTERNAL PRESSURE**

*Vibrations of closed circular section cylindrical shells of finite length under cross local load are studied under the bounds of nonlinear classical theory. Transition from PDE equations to the system of ordinary differential time equations (the Cauchy problem) is realized by means of Bubnov method in the most accurate approximation. In turn, the Cauchy problem is solved by the Runge-Kutt's method in the fourth order accuracy. Numerical analysis is conducted on base of nonlinear dynamics and qualitative theory of differential equations. The new scenario of transferring the vibration of shell in condition of chaos, has been developed in a new criterion of hard loss of stability.*

### Краткий исторический очерк

За последние 40 лет в нелинейной динамике были обнаружены новые явления, главным из которых являются хаотические колебания. Хаотические колебания – это возникновение неупорядоченных движений в совершенно детерминированных системах. Такие движения и ранее обнаруживались в механике жидкостей, но недавно их заметили в механике пластин и оболочек.

Большое количество публикаций было посвящено выявлению поведения отдельного осциллятора при медленном изменении его параметров. Существенный прогресс в понимании эффекта медленного изменения параметров был достигнут на Сольвеевской конференции 1911 года благодаря Эйнштейну, который указал на значение интеграла действия в физике. Он отметил, что «адиабатическое» постоянство действия, продемонстрированное впервые Лиувиллем и Гринном за три четверти века до этого, прямо связано с физическим представлением о том, что число квантов в медленно меняющейся системе должно оставаться постоянным, что предопределило появление метода усреднения. В пионерной работе Лоренца [1] было показано, что в диссипативных системах встречается хаотическое движение. Лоренц обнаружил аттрактор в модели, описываемой системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Рюэль и Тэкенс [2] использовали для аттрактора с хаотическим движением термин «странный аттрактор». Топология странных аттракторов весьма примечательна. Она характеризуется масштабной инвариантностью, при которой структура аттрактора повторяется на все более мелких пространственных масштабах. Такие структуры, называемые фракталами, обладают любопытным свойством дробной размерности, промежуточной между размерностью точки и линии, линии и плоскости и т.д.

При изменении параметра динамической системы эти системы испытывают последовательные бифуркации, такие, что период предельного колебания каждый раз удваивается. Бифуркации накапливаются при некотором критическом значении параметра, выше которого движение становится хаотическим – последовательность бифуркаций Фейгенбаума [3].

Большой вклад в развитие устойчивости оболочек при неосесимметричном деформировании внесли Л.В. Андреев, Н.И. Ободан и А.Г. Лебедев [4].

В известной нам литературе исследованию устойчивости цилиндрических оболочек при действии поперечной знакопеременной нагрузки не уделено должного внимания. Исследованию распределенных систем в виде пластинчатых конструкций посвящены исследования [5],[6]. Настоящая работа ставит своей целью заполнить указанный пробел.

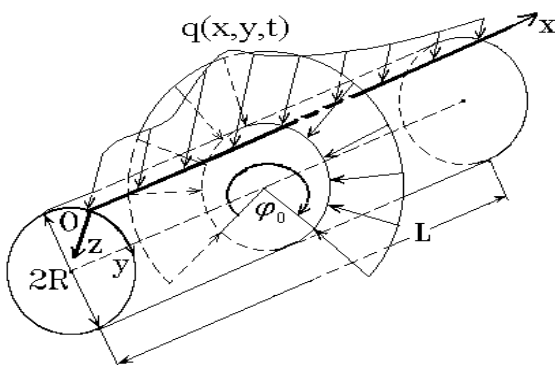


Рис. 1. Расчетная схема

### Основные уравнения

В рамках нелинейной классической теории рассмотрим замкнутую цилиндрическую оболочку кругового сечения конечной длины с постоянной жесткостью и плотностью при действии неравномерного знакопеременного внешнего давления  $q(t) = q_1 \sin(\omega_p t)$ .

Введем систему координат: ось  $x$  направлена по продольной координате, ось  $y$  – по окружной координате, ось  $z$  – по нормали к срединной поверхности (рис. 1).

Цилиндрическая оболочка как трехмерная область  $\Omega$  в данной системе координат определяется  $\Omega = \{x, y, z \mid (x, y) \in [0; L] \times [0; 2\pi], -h \leq z \leq h\}$ . Исходными являются следующие уравнения теории пологих оболочек в безразмерном виде [7]:

$$\frac{1}{12(1-\mu^2)} \left( \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \lambda^2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right) - k_y \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - L(w, F) - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} + k_y^2 q(x, y, t) = 0,$$

$$\frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + \lambda^2 \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + k_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} L(w, w) = 0, \quad (1)$$

где  $L(w, F) = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}$  – известный нелинейный оператор.

Система (1) приведена к безразмерному виду с использованием следующих безразмерных параметров (черточка над безразмерными величинами для простоты опущена) [8]:

$$w = 2h\bar{w}, \quad x = L\bar{x}, \quad y = R\bar{y}, \quad F = E_0(2h)^3\bar{F},$$

$$k_y = \frac{2h}{R^2}\bar{k}_y, \quad q = \bar{k}_y^2 \frac{E_0(2h)^4}{L^2 R^2}\bar{q}, \quad t = \frac{RL}{2h\sqrt{gE_0}}\bar{t}.$$

Присоединим граничные условия:

$$w = 0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0; \quad F = 0; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0 \quad \text{при } x = 0; 1, \quad (2)$$

$$w = g(x, y, t); \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = r(x, y, t); \quad F = u(x, y, t); \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = z(x, y, t) \quad \text{при } y = 0; 2\pi. \quad (3)$$

Неоднородность краевых условий во второй строке (3) указывает на присутствие начальных неправильностей и усилий в оболочке.

$$\text{Начальные условия } w(x, y)|_{t=0} = \varphi_1(x, y), \quad \frac{\partial w}{\partial t} = \varphi_2(x, y). \quad (4)$$

В (1)  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $\lambda=L/R$ , где  $L$  и  $R=R_y$  – длина и радиус круговой цилиндрической оболочки,  $k_y=1/R_y$  – кривизна оболочки по  $y$  (кривизна оболочки по  $x$   $k_x=1/R_x=0$ ),  $q(x, y, t)$  – внешнее давление,  $\varepsilon$  – коэффициент демпфирования среды.

Далее будет рассматриваться случай приложения поперечного внешнего давления, приложенного по полосе  $0 \leq \varphi_0 \leq 1,9\pi$ ,  $0 \leq x \leq 1$ , изменяющегося по гармоническому закону  $q(t) = q_1 \sin(\omega_p t)$ , где  $\omega_p$  – частота вынуждающей силы,  $q_1$  – амплитуда вынуждающей силы,  $\mu=0,3$ ,  $\varepsilon=9$ .

### Метод исследования – метод Бубнова

В задачу исследования устойчивости оболочек входит определение их критических нагрузок и форм потери устойчивости. Краевая задача по пространственным координатам решается методом Бубнова в высших приближениях. Метод Бубнова можно рассматривать как обобщенный метод Ритца. В данном случае функции  $w$  и  $F$ , являющиеся решениями, приближенно аппроксимируем аналитическим выражением, содержащим конечное число произвольных параметров.

Рассмотрим шарнирно опертую по криволинейному кругу замкнутую цилиндрическую оболочку с однородными граничными условиями (2), (3) и нулевыми начальными условиями (4). Искомые функции, являющиеся решением уравнений (1), аппроксимируем выражением, содержащим конечное число произвольных параметров, и представим в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит только от одного аргумента, удовлетворяющих краевым условиям (2), (3):

$$w = \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=0}^{M_y} A_{ij}(t) \sin(i\pi x) \cos(jy), \quad F = \sum_{i=1}^{M_x} \sum_{j=0}^{M_y} B_{ij}(t) \sin(i\pi x) \cos(jy). \quad (5)$$

В результате применения процедуры Бубнова в высших приближениях по пространственным координатам получены система линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $A_{ij}$  и  $B_{ij}$ , которая решается методом обратной матрицы, и система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка по времени относительно коэффициентов  $A_{ij}$  и  $B_{ij}$ :

$$K_{ij} B_{ij} = F_1(A_{ij}), \quad (6)$$

$$\frac{d^2 A_{ij}}{dt^2} + \varepsilon \frac{dA_{ij}}{dt} = F_2(A_{ij}, B_{ij}, t), \quad i = \overline{1, M_x}, \quad j = \overline{0, M_y}. \quad (7)$$

Подставляя найденные коэффициенты  $B_{ij}$  из (6) в (7), получаем систему дифференциальных уравнений 2-го порядка по  $t$  относительно коэффициентов  $A_{ij}$ , которая сводится к нормальной и решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

### Достоверность полученных результатов для стационарных задач

Рассмотрим статическое нагружение замкнутой цилиндрической оболочки равномерным внешним давлением  $q=q_1$ , распределенным в пределах полосы с центральным углом  $\varphi_0$  (рис. 1).

Изучим зависимость критических нагрузок от ширины полосы давления. Статическое решение получается из динамического с помощью метода установления, идея которого принадлежит В.И. Феодосьеву [9] при коэффициенте демпфирования  $\varepsilon=\varepsilon_{кр}$ . Для получения  $q_1(\varphi_0)$  следует построить для  $\forall \varphi_0 \in [0; 2\pi]$  множество  $\{q_{1,i}, w_i\}$ , по которым определяется  $q_{1,kr}$ , где  $q_{1,kr}$  – критическая нагрузка. Проанализируем результаты, полученные в разных приближениях.

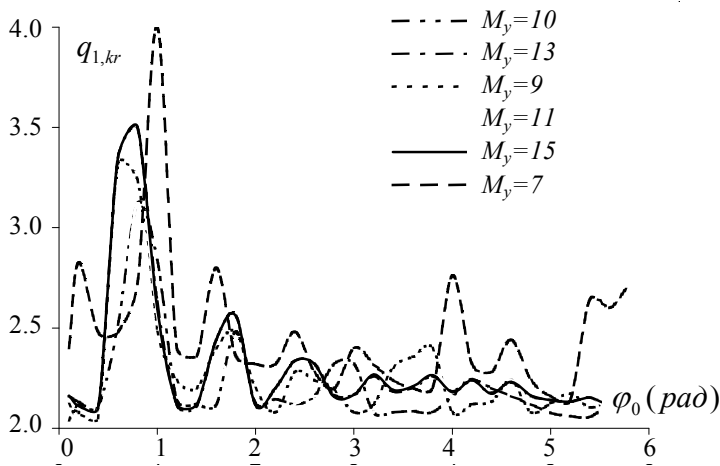


Рис. 2. Зависимость критических нагрузок от ширины полосы давления  $q_{1,kr}(\varphi_0)$

Так как нагрузка прикладывается по всей длине цилиндрической оболочки, то число членов ряда по координате  $x$  не играет роли и можно удержать в (5) один член ряда. Исследуем зависимость  $q_1(\varphi_0)$  полученных результатов от количества членов ряда по окружной координате  $y$   $M_y$  (рис. 2). Можно заметить, что характер зависимости немонотонный и колебательный, при различных значениях  $M_y$  поведение кривой носит сходный характер, но увеличение числа приближения приводит к заметным уточнениям результатов.

Это позволяет сделать вывод, что при неоднородном нагружении использование небольшого числа членов ряда (5) приводит к большим

погрешностям и можно судить о существенной зависимости результатов от числа приближений. Продолжая увеличивать число членов ряда (5), получим сходящуюся последовательность, начиная с  $M_y=13$ .



Чтобы убедиться в достоверности полученных результатов, воспользуемся данными, полученными в [4], и сопоставим их с построенной зависимостью  $\bar{q}_{1,kr}(\varphi_0)$  (рис. 3) при одних и тех же линейных размерах. Здесь  $\bar{q}_{1,kr}$  – отношение критической нагрузки  $q_{1,kr}$  к классическому критическому значению в случае равномерного внешнего давления, которое вычисляется по формуле Мизеса-Папковича [10]

$$\bar{q}_{кр} = 0,92 \frac{R}{L} \left( \frac{h}{R} \right)^{\frac{5}{2}}.$$

Сопоставляя два

графика, получаем практически полное

совпадение результатов с решениями, приведенными в [4], что позволяет судить о достоверности результатов, полученных вышеописанным методом. Здесь график 1 – результаты, полученные методом установления,  $M_y=15$ , график 2 – результаты, полученные в [4].

Кратко остановимся на некоторых критериях динамической устойчивости, предложенных некоторыми авторами.

А.С. Вольмир [11] в качестве динамического критерия принимает быстрый рост прогиба при незначительном увеличении нагрузки или появление точки перегиба графика  $q_1(w)$ .

А.С. Шио, Т.Т. Сунг, Д.С. Рот [12] показывают, что нагрузка, при которой начинается обратный процесс изменения времени, необходимого для достижения первого максимума в зависимости «нагрузка – время», считается критической.

В работе В.А. Крысько [13] делается анализ устойчивости оболочек и отмечается, что при потере устойчивости оболочки происходит смена знака усилия в срединной поверхности с отрицательного (сжатия) на положительный (растяжение). Обзор работ по динамическим критериям потери устойчивости дается в работе [14].

Классификация частных случаев потери устойчивости автоколебаний приведена в [15,16]. При этом возможны три случая:

1) жесткая потеря устойчивости – одно из собственных значений линеаризованного в окрестности неподвижной точки отображения Пуанкаре выходит из единичного круга в точке +1;

2) мягкая потеря устойчивости, рождение цикла удвоенного периода – одно из собственных значений линеаризованного в окрестности неподвижной точки отображения Пуанкаре выходит из единичного круга в точке -1;

3) возникновение второй частоты, в фазовом пространстве рождается двумерный тор – пара комплексно сопряженных собственных значений выходит из единичного круга.

Для определения критической нагрузки воспользуемся двумя ранее описанными критериями: динамическим критерием Вольмира [11] (рис. 4, б) и критерием Шио-Сунг-Рота [12] (рис. 4, а). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что критическая нагрузка, полученная по двум вышеописанным критериям, совпадает с точностью до тысячных долей.

Для более подробного анализа рассмотрим также формы изгиба оболочки и формы поперечного сечения цилиндрической оболочки в докритическом и закритическом состоянии при действии импульса бесконечной продолжительности во времени, то есть правая часть уравнения

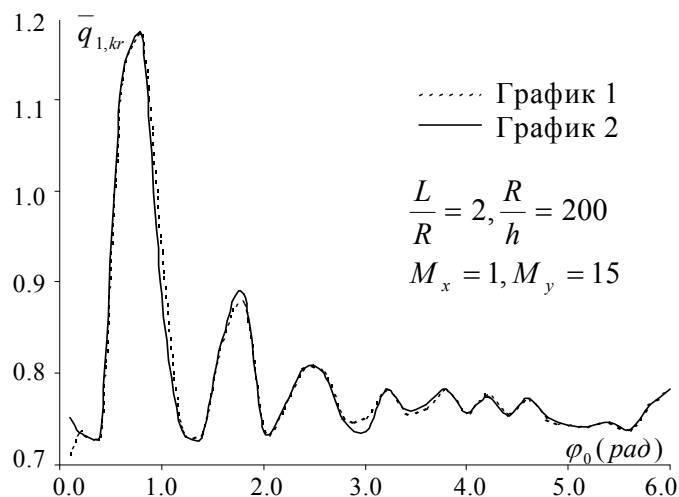


Рис. 3. Достоверность полученных результатов

(1) не зависит от времени (табл. 1). Формы поперечного сечения ( $x = 0,5; y \in [0; 2\pi]$ ) и характерные формы волнообразования цилиндра соответствуют точке A на сигнале.

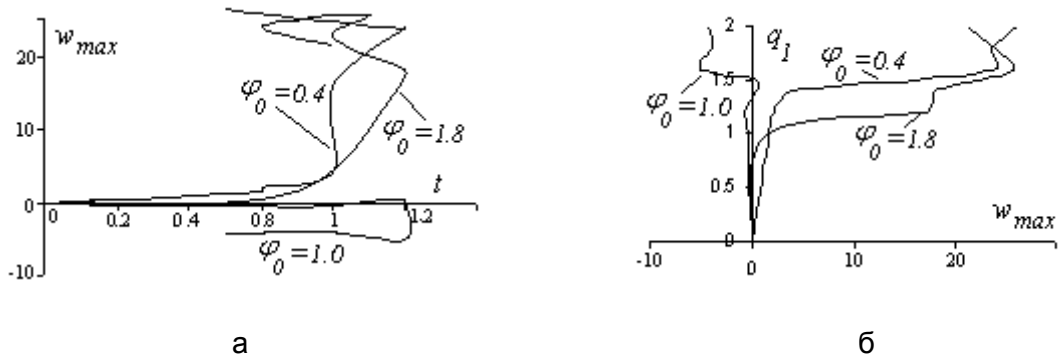
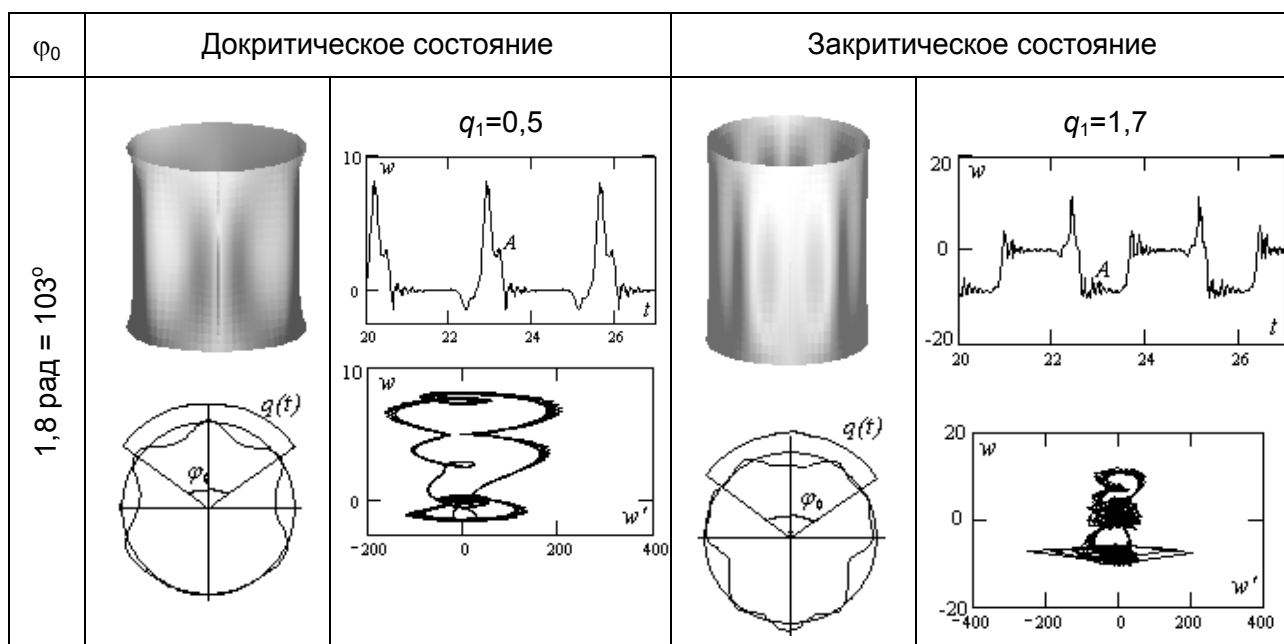


Рис. 4. Определение критической нагрузки: а – критерий Шю-Сунг-Рота; б – критерий Вольмира

Таблица 1

$\varphi_0$	Докритическое состояние		Закритическое состояние	
0,4 рад = 23°		<p><math>q_1=0,5</math></p>		<p><math>q_1=1,5</math></p>
1,0 рад = 57°		<p><math>q_1=0,5</math></p>		<p><math>q_1=1,5</math></p>



Так, быстрый рост прогиба в результате малого изменения нагрузки приводит к увеличению числа полуволин. В докритическом состоянии наибольшие прогибы наблюдаются в зоне приложения нагрузки. При переходе в закритическое состояние большие прогибы распространяются и на зоны оболочки, свободные от нагружения.

**Сценарий перехода в хаос колебаний замкнутых цилиндрических оболочек при неосесимметричном знакопеременном внешнем давлении ( $\varphi_0=180^\circ$ )**

Исследуем сценарий перехода из гармонических колебаний в хаос замкнутых цилиндрических оболочек при неосесимметричном внешнем давлении  $q(t)=q_1 \sin(\omega_p t)$  ( $\varphi_0=180^\circ$ ). Зафиксируем  $\omega_p=2,3$  и будем менять параметр  $q_1$ . Основные характеристики: сигнал  $w(0,5; 0,0; t)$ , фазовый портрет  $w(w')$ , спектр мощности  $S(\omega)$ , сечение Пуанкаре  $(w_t, w_{t+T})$ , где  $T$  – период вынуждающей силы, в зависимости от граничных значений  $q_1$  приведены в табл. 2. Значения  $q_1$  названы граничными, так как между указанными границами  $q_1$  картина остается практически постоянной.

1. При  $q_1=0,2$  колебания совершаются на основной частоте возбуждения  $\omega_p$  и являются гармоническими. Фазовый портрет – предельное множество однооборотного цикла. Сечение Пуанкаре – одна точка.

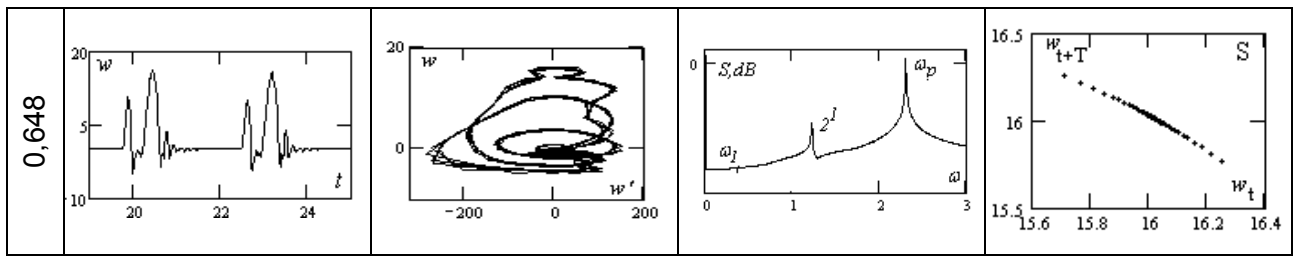
2. Далее, при  $q_1=0,35$  в спектре появляется независимая частота, т.е. имеется двухчастотное движение на частотах  $\omega_p$  и  $\omega_1$  (движение по тору), что приводит к изменениям в фазовом портрете (многооборотный цикл) и в сечении Пуанкаре (две точки) – возникают два аттрактора. Движение не синхронизированное, то есть  $\frac{\omega_p}{\omega_1} = \frac{m}{n} = 6,0483877... -$  иррационально.

3. Увеличивая граничный параметр до  $q_1=0,4$ , получаем линейно зависимую частоту  $\omega_2$  в спектре мощности, которая образуется по закону  $\omega_2=\omega_p-\omega_1$ . Сечение Пуанкаре не меняется – две точки.

4. Далее, колебания вновь совершаются на основной частоте возбуждения  $\omega_p$  ( $q_1=0,5$ ). Сечение Пуанкаре представляет собой точку – смена типа аттрактора и их количества (один).

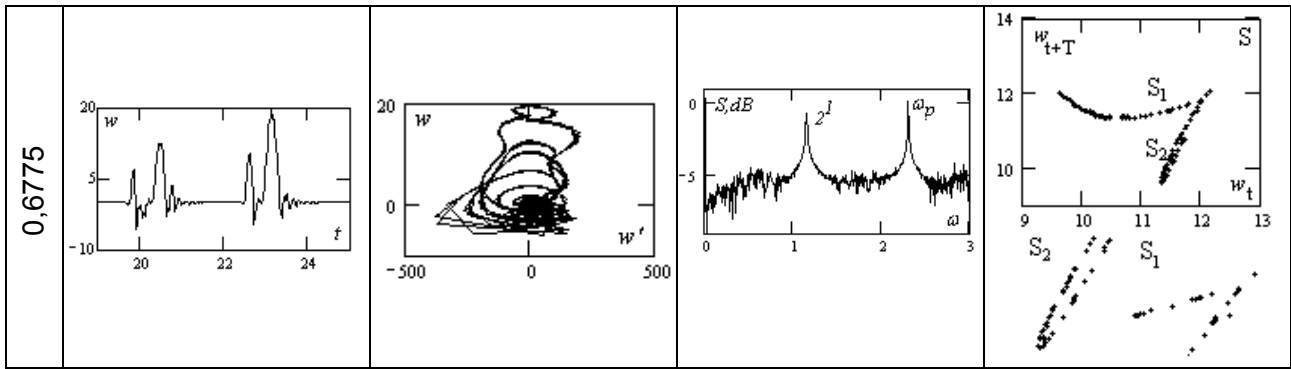
Таблица 2

$q_1$	Сигнал $w(0,5; 0,0; t)$	Фазовый портрет $w(w')$	Спектр мощности $S(\omega)$	Сечение Пуанкаре $(w_t, w_{t+T})$
0,2				
0,35				
0,4				
0,5				
0,545				
0,6				

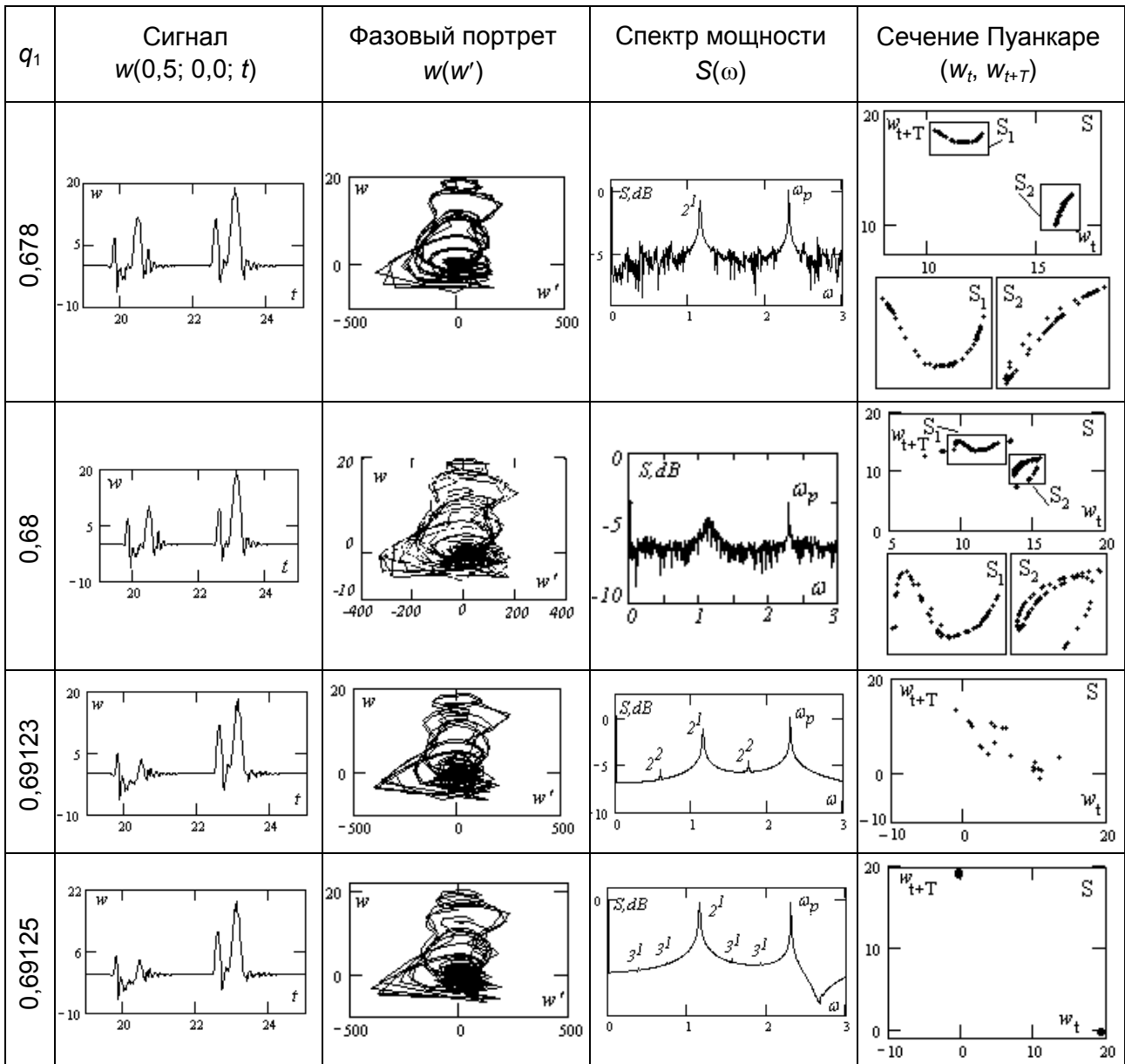


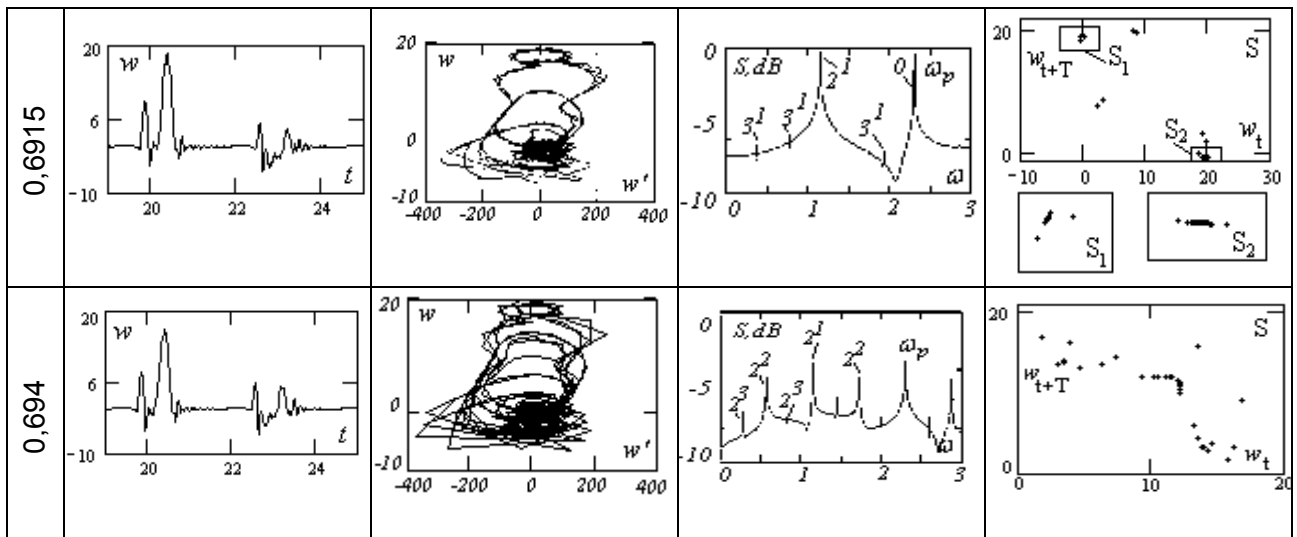
Продолжение табл. 2

$q_1$	Сигнал $w(0,5; 0,0; t)$	Фазовый портрет $w(w')$	Спектр мощности $S(\omega)$	Сечение Пуанкаре $(w_t, w_{t+T})$
0,65				
0,6585				
0,66				
0,67				
0,675				

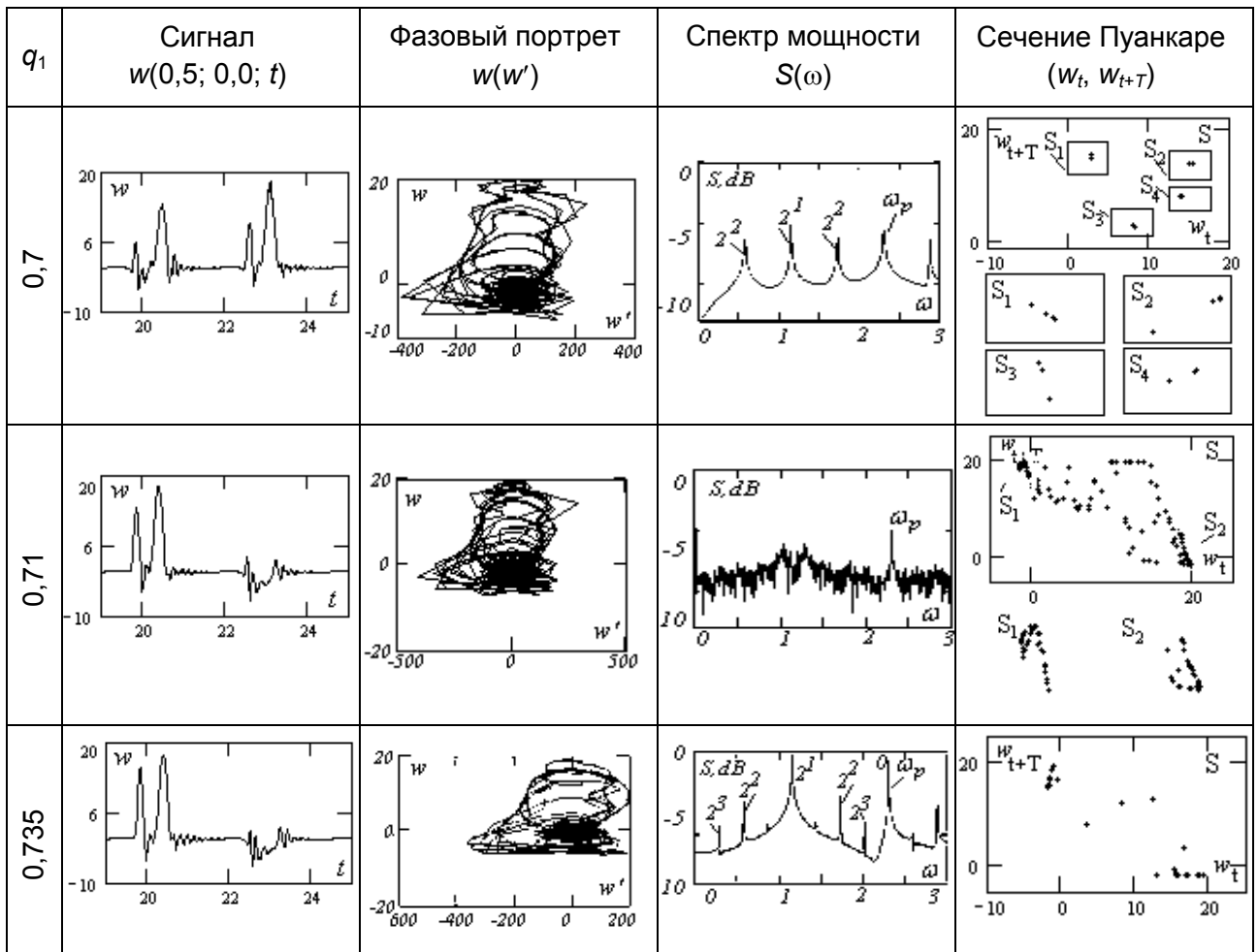


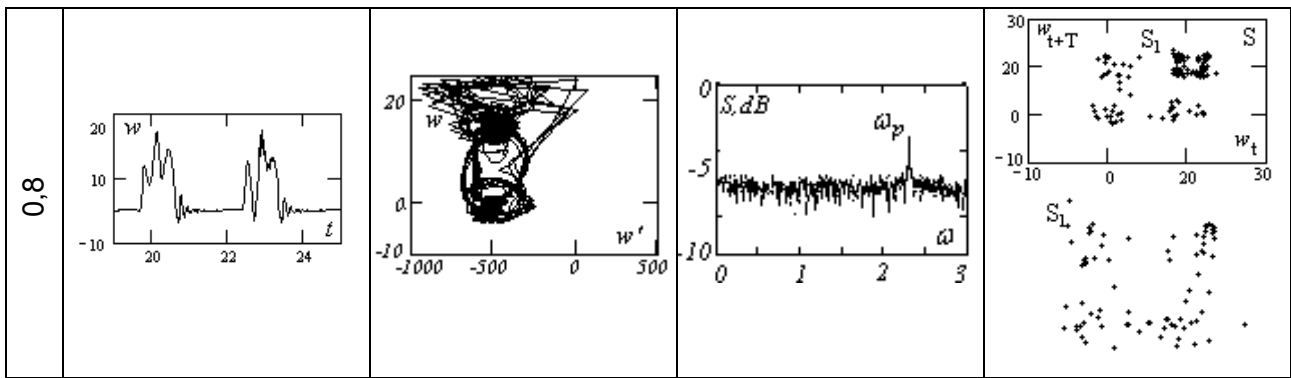
Продолжение табл. 2





Окончание табл. 2





5. При увеличении граничного параметра до  $q_1=0,545-0,6$  появляются независимая частота  $\omega_1$  и линейно зависимая частота  $\omega_2=\omega_p-\omega_1$ . Здесь имеется хлопок к центру кривизны и выхлоп. Сечение Пуанкаре – две точки (смена типа аттрактора).

6. Увеличение  $q_1=0,648$  приводит к разрушению линейно зависимой частоты и появлению первой бифуркации Хопфа с сохранением независимой частоты колебаний. В сечении Пуанкаре происходит объединение двух точек. Получаем множество точек, образующих дугу, более плотную в центре – рождение нового странного аттрактора. Как отмечалось выше, с изменением управляющих параметров (амплитуды  $q_1$  и частоты  $\omega_p$  вынуждающей силы) фазовый портрет может эволюционировать с сохранением первоначальной топологической структуры, но может демонстрировать и резкие (бифуркационные) ее изменения. При данных параметрах имеет место второй случай.

7. Дальнейшее движение по параметру  $q_1=0,65$  приводит к перестройке системы. Независимая частота разрушается и на фоне первой бифуркации Хопфа появляется 3-кратное увеличение периода. В сечении Пуанкаре происходит разрыв аттрактора. Наблюдаем две группы точек, каждая из которых при увеличении разрешающей способности превращается в дуги (см. плоскости  $S_1, S_2 \in S$ ) – смена типа аттрактора и их числа (два). По расположению точек на секущей видно, что, как отмечалось выше, существуют два независимых аттрактора, локализующихся в различных областях фазового пространства без пересечения. Эти аттракторы не грубые, так как не сохраняют свою структуру и статические свойства при малых изменениях управляющего параметра  $q_1$ .

8. Далее, при изменении  $q_1=0,65-0,675$  спектр мощности и сигнал остаются постоянными, то есть на фоне первой бифуркации Хопфа появляется 3-кратное увеличение периода, но изменения происходят в сечении Пуанкаре. Проследим его эволюцию более подробно.

- $q_1=0,6585-0,66$  – объединение двух групп точек в сечении Пуанкаре по дуге – слияние двух аттракторов и рождение нового аттрактора;
- $q_1=0,67-0,675$  – сечение Пуанкаре представляет собой две точки (двухоборотный цикл).

9. При  $q_1=0,6775$  система переходит в состояние хаоса на частоте первой бифуркации Хопфа. Вместо двух точек появляются две пересекающиеся дуги, одна из которых при увеличении разрешающей способности образует петлю (см. плоскости  $S_2 \in S$ ) – рождение нового странного аттрактора.

10. При  $q_1=0,678$  спектр мощности не меняется. Система находится в состоянии хаоса. В сечении Пуанкаре две дуги расходятся к противоположным углам фазовой плоскости, одна из дуг, так же как и ранее, образует петлю (см. плоскости  $S_1, S_2 \in S$ ) – смерть старого аттрактора и рождение двух новых аттракторов.

11. Далее, при  $q_1=0,68$  система переходит в состояние хаоса на основной частоте возбуждения. Сечение Пуанкаре вновь меняется (см. плоскости  $S_1, S_2 \in S$ ) – рождаются два новых аттрактора.



12. После выхода системы из состояния хаоса ( $q_1=0,69123$ ) в спектре мощности появляются 2 бифуркации Хопфа, и система колеблется на половине частоты вынуждающей силы, то есть частота колебаний системы равна  $\omega_p/2$ . В сечении Пуанкаре получаем множество точек – разрушение странного аттрактора.

13. При  $q_1=0,69125$  механическая система перестраивается. Колебания вновь совершаются на частоте  $\omega_p/2$ . При этом разрушается одна из двух бифуркаций Хопфа и происходит 3-кратное увеличение периода. В сечении Пуанкаре – две точки (двухоборотный цикл).

14. Далее, при  $q_1=0,6915$  система колеблется на половине основной частоты  $\omega_p/2$  и происходит 3-кратное увеличение периода – в сечении Пуанкаре возникают пять независимых аттракторов, каждый из которых при увеличении разрешающей способности преобразуется в две точки и дугу.

15. При увеличении  $q_1$  до 0,694 происходит разрушение утроения и возникает последовательность из трех бифуркаций. В сечении Пуанкаре происходит объединение аттракторов. Далее, при  $q_1=0,70$  происходит также разрушение третьей бифуркации. В сечении Пуанкаре наблюдается разрушение аттракторов и возникают четыре группы точек, каждая из которых состоит из трех точек (см. плоскости  $S_1, S_2, S_3, S_4 \in S$ ) – рождение четырех не грубых аттракторов, и затем, при  $q_1=0,71$  система вновь переходит в состояние хаоса на частоте возбуждения. В сечении Пуанкаре наблюдаем рождение объединенного аттрактора – беспорядочное множество точек. По краям выделяются две петли (см. плоскости  $S_1, S_2 \in S$ ).

16. Дальнейшее движение по параметру  $q_1=0,735$  приводит систему к выходу из состояния хаоса и возникновению последовательности из трех бифуркаций Хопфа. Колебания также происходят на половине основной частоты (в сечении Пуанкаре три странных аттрактора, разделенные между собой).

17. При  $q_1=0,8$  система вновь переходит в состояние хаоса на частоте возбуждения. В сечении Пуанкаре наблюдаем четыре разделенные между собой беспорядочные группы точек, каждая из которых при увеличении масштаба в свою очередь также представляет собой четыре группы точек, разделенных между собой (см. таблицу плоскости  $S_1 \in S$ ).

Таким образом, имеем сценарий, состоящий из трех этапов: (гармонические колебания) – (появление независимой и линейно зависимой частот) – (независимая частота + бифуркация Хопфа) – (бифуркация Хопфа + 3-кратное увеличение периода) – (хаос) – (3-кратное увеличение периода + колебания на частоте  $\omega_p/2$ ) – (3 бифуркации Хопфа) – (2 бифуркации Хопфа) – (хаос) – (колебания на частоте  $\omega_p/2$  + 2 бифуркации Хопфа) – (3-кратное увеличение периода + колебания на частоте  $\omega_p/2$ ) – (хаос). При этом хаос может возникать как на основной частоте возбуждения, так и на частоте первой бифуркации Хопфа. В сечении Пуанкаре наблюдается потаенная бифуркация странных аттракторов (количество их колеблется от одного до четырех), причем эти аттракторы не грубые. Кроме того, происходит разрушение сепаратрисной поверхности, по-видимому, при образовании объединенного аттрактора происходит и объединение областей притяжения локальных странных аттракторов, то есть наблюдается непрерывное переключение системы при движении по управляющему параметру  $q_1$  и в оболочке наблюдается серия хлопков в положительном направлении, выхлопы и колебания относительно нейтрального равновесия, то есть здесь наблюдается явление турбулентности.

Для цилиндрических оболочек при неосесимметричном внешнем давлении, приложенном по полосе шириной  $\varphi_0=180^\circ$ , имеются небольшие зоны в областях хаоса, где работает сценарий Фейгенбаума, но получить численно последовательность Фейгенбаума и его константу здесь не представляется возможным, так как наблюдается лишь 3 бифуркации Фейгенбаума, а не их последовательность.

Рассмотрим поведение цилиндра в целом при изменении  $x$  и  $y$  в пределах  $0 \leq x \leq 1$ ;  $0 \leq y \leq 2\pi$  и формы поперечного сечения при фиксированном значении  $x=0,5$ ;  $0 \leq y \leq 2\pi$ . В

табл. 3 приведены характерные формы волнообразования в результате приложения нагрузки на различных уровнях нагружения, а также соответствующий сигнал в центральной точке оболочки  $x=0,5; y=0$ , спектр мощности  $S(\omega)$ , сечение Пуанкаре  $(w_t, w_{t+T})$  и поперечное сечение.

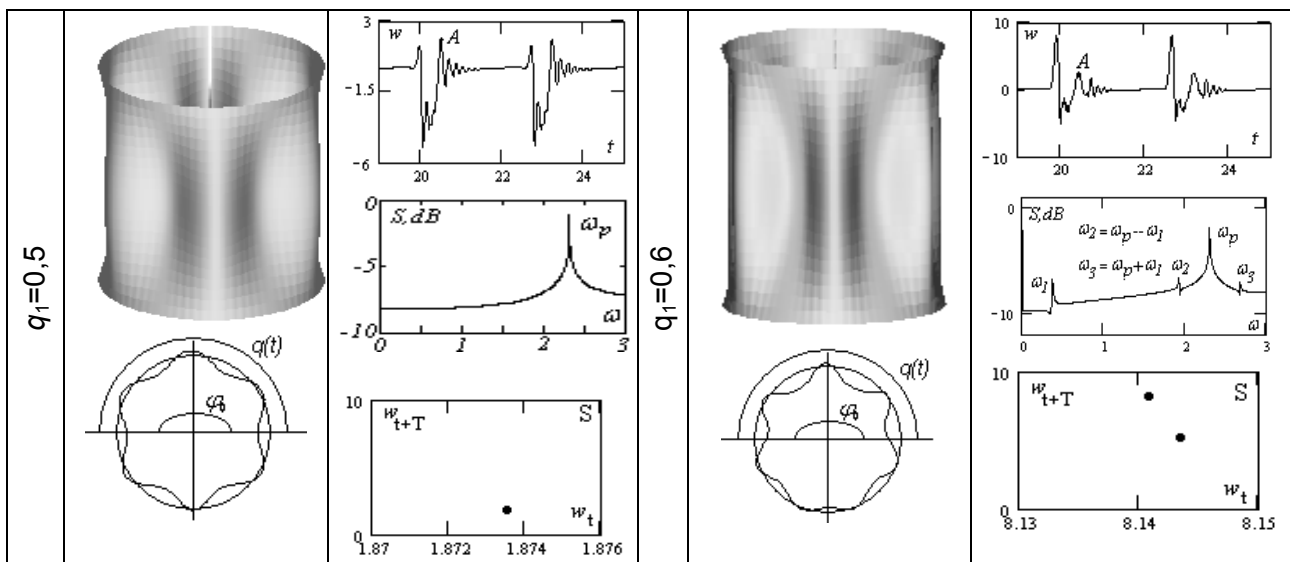
В зоне одночастотных колебаний наблюдаем периодически повторяющиеся пики, (выпучивание оболочки происходит сначала наружу, затем к центру кривизны с дрожанием около нулевого состояния). Прогибы оболочки к центру кривизны значительно превосходят прогибы наружу. Форма поперечного сечения показывает, что число полуволн вне зоны приложения нагрузки совпадает с числом полуволн в этой зоне, но прогибы несколько больше.

В случае появления независимой частоты (двухчастотные колебания) оболочка выпучивается больше наружу. Число полуволн вне зоны приложения нагрузки увеличивается. В зоне бифуркаций происходит увеличение периода колебаний, прогибы наружу также больше прогибов к центру кривизны оболочки. Число полуволн вне зоны приложения нагрузки уменьшается.

В состоянии хаоса наблюдаем чередование малых и больших пиков, увеличение периода колебаний. Колебания совершаются с большой амплитудой. Происходит явление «хлопок – выхлоп» оболочки. Оболочка сжата к центру кривизны. Число полуволн вне зоны приложения нагрузки вновь увеличивается, но переход между выхлопом наружу и сжатием к центру кривизны оболочки происходит резко.

Рассмотрим теперь изменение форм волнообразования во времени при различной амплитуде давления  $q_1$ . В табл. 4 приведены формы изгиба оболочки при фиксированном значении  $x=0,5$  при изменении  $y \in [0; 2\pi]$  в определенные моменты времени  $t=1, 2, 3, 4, 5, 6$ , которые указаны на графике сигнала  $w(0,5; 0,0; t), t \in [18; 27]$ .

Таблица 3



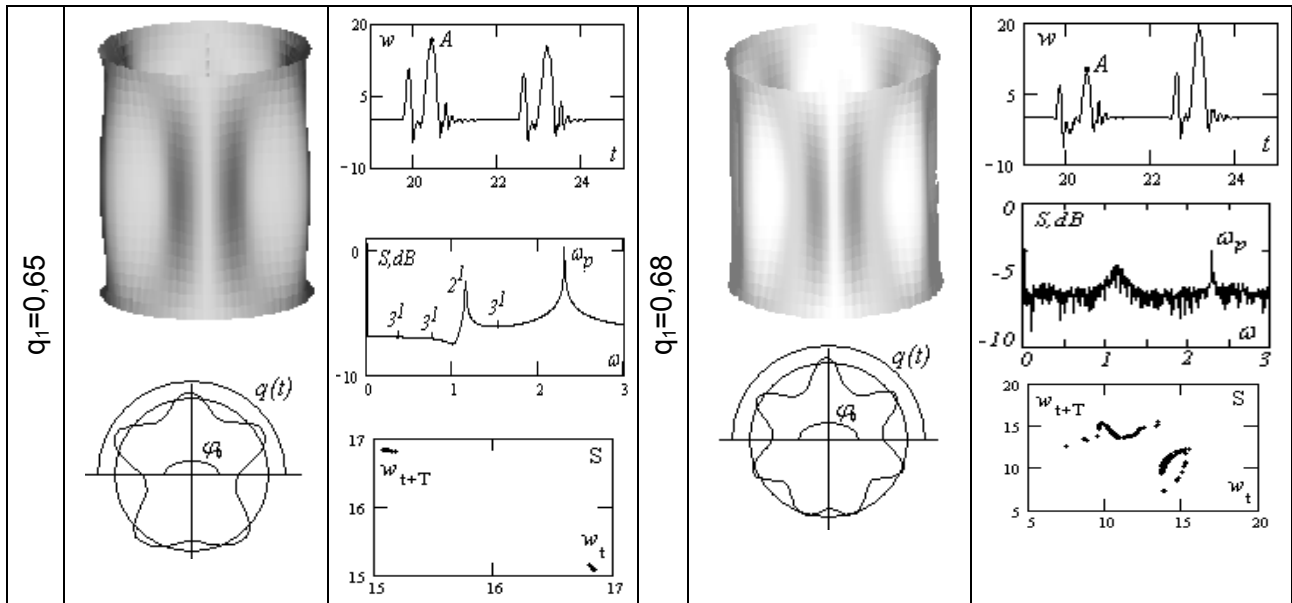
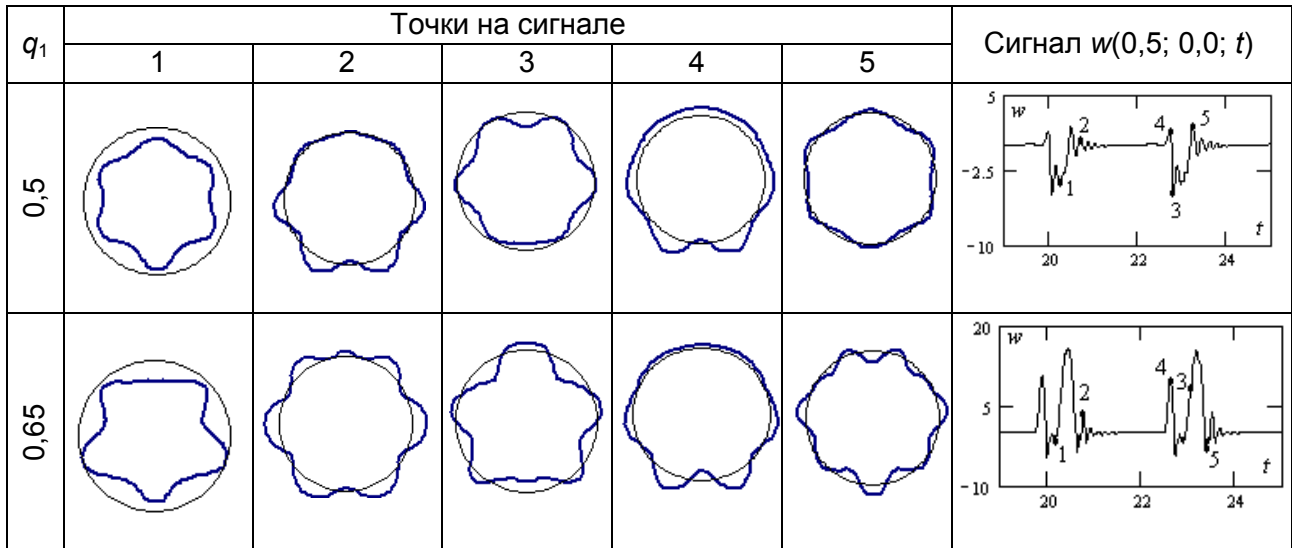
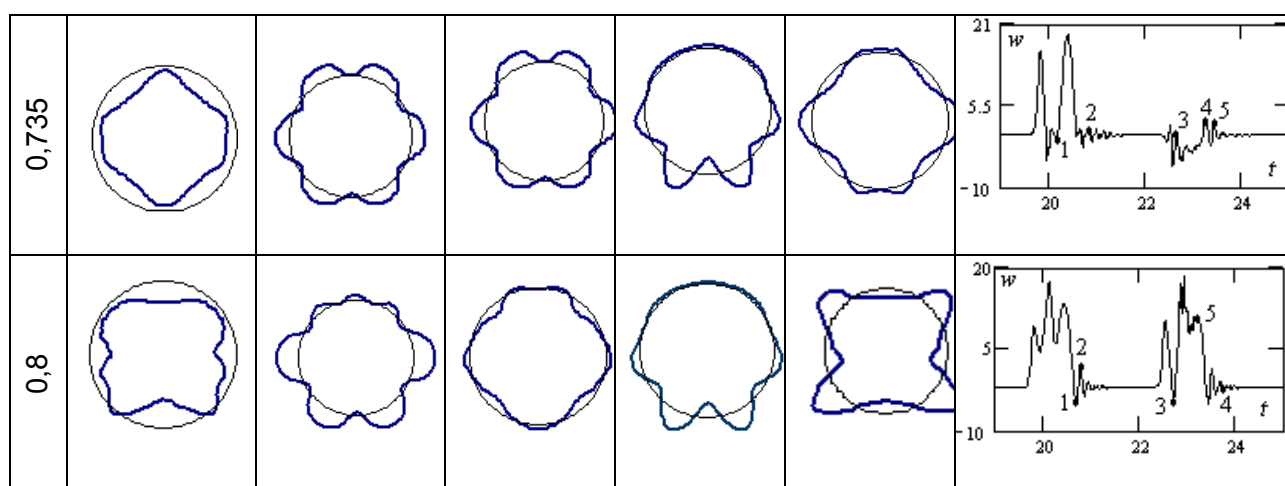


Таблица 4



Окончание табл. 4





Тонкой линией приведены сечения оболочки в недеформированном состоянии, а жирной – ее деформированное состояние в некоторый момент времени. Таким образом, в случае гармонических колебаний наблюдаются более мягкие формы изгиба оболочки. Наиболее изогнутые формы наблюдаются вне зоны приложения нагрузки. При появлении бифуркации формы изгиба носят более жесткий характер, и число полуволн увеличивается. Далее, возникновение следующих бифуркаций приводит вновь к увеличению полуволн. Состояние хаоса характеризуется более яркими формами изгиба, и локальные вмятины наблюдаются как в зоне приложения нагрузки, так и вне ее.

Для анализа поведения оболочки будем использовать такие характеристики, как зависимость максимального и минимального прогибов от амплитуды приложенной нагрузки на частоте возбуждения и шкала характера колебаний оболочки (рис. 5). Они хорошо согласуются с показателями Ляпунова и, как отмечалось в работе [17], позволяют заменить вычисление старшего показателя Ляпунова.

При угле приложения нагрузки  $\varphi_0 = \pi$  в зоне гармонических колебаний оболочка равномерно сжимается и расширяется, то есть прогибы к центру кривизны сопоставимы с прогибами наружу оболочки. Появление бифуркаций Хопфа приводит к тому, что прогибы к центру кривизны оболочки значительно превосходят прогибы наружу. Цилиндрическая оболочка сжимается, быстрый рост прогиба происходит к центру оболочки. Жесткая потеря устойчивости чередуется с плавным ростом прогиба. При этом зоны гармонических колебаний чередуются с зонами бифуркаций и хаоса.

Жесткая потеря устойчивости сопровождается появлением новой независимой частоты колебаний или сменой характера колебаний (от гармонических колебаний к бифуркациям, затем к состоянию хаоса). «Дрожание» соответствует области хаоса на обеих характеристиках.

В диссипативных системах с хаотической динамикой в зависимости от управляющих параметров и начальных условий, как правило, реализуется бесконечное число аттракторов, как регулярных, так и странных, отличающихся по своей структуре. Фиксирование управляющих параметров не меняет картины: аттракторов остается бесконечное множество, их области притяжения разделены в фазовом пространстве сепаратрисными поверхностями. То

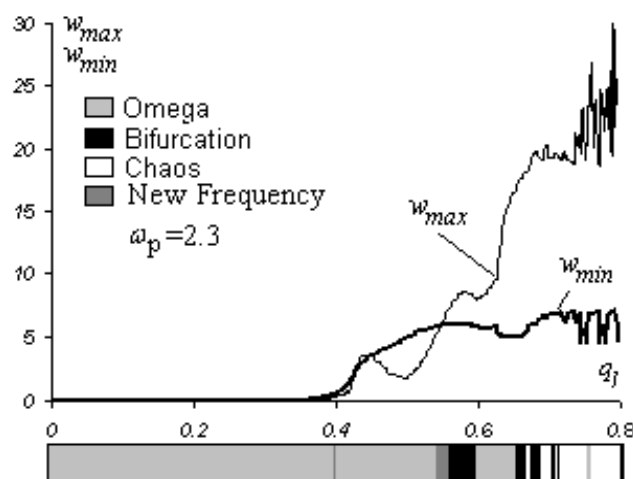


Рис. 5. Зависимости  $w_{max}(q_1)$  и  $|w_{min}(q_1)|$

обстоятельство, что наряду со странными аттракторами в фазовом пространстве системы существует множество регулярных периодических режимов, делает проблему теоретического описания динамики диссипативных систем чрезвычайно сложной.

Многочисленные результаты физических экспериментов свидетельствуют о том, что области притяжения и существования периодических режимов в фазовом пространстве и по параметрам уменьшаются с увеличением периода. В численных экспериментах это приводит к тому, что циклы больших периодов за счет флуктуаций не регистрируются, аттрактор не включает устойчивых периодических траекторий, то есть становится как бы гиперболическим. Подобные динамические системы называют системами с квазиаттракторами (квазигиперболическими системами).

Недостаточное количество строгих результатов по стохастической и эргодической теории квазиаттракторов должно стимулировать численные и физические эксперименты.

Следуя идее А. Пуанкаре о том, что лучше изучать все многообразие орбит, чем следить за какой-то конкретной, мы построили карту управляющих параметров  $\{q_1, \omega\}$  (рис. 6). Эта карта позволяет изучить все многообразие поведения оболочки. Три вертикальные прямые для частот: средняя линия для  $\omega_p = \omega_0$  – частота собственных линейных колебаний, правая и левая линии соответственно для  $\omega_p - \frac{\omega_0}{2}$  и  $\omega_p + \frac{\omega_0}{2}$ . Анализ карты  $\{q_1, \omega\}$  показывает, что для малых значений амплитуды вынуждающей нагрузки поведение оболочки характеризуется гармоническими колебаниями. При некоторых значениях  $q_1$  и  $\omega_p$  присутствуют колебания на половине частоты вынуждающей силы  $\omega_p/2$  и несколько точек, в которых колебания осуществляются на частоте  $\omega_p/3$ .

С возрастанием  $q_1$  при малых значениях частоты возбуждения  $\omega_p$  при ограничении на

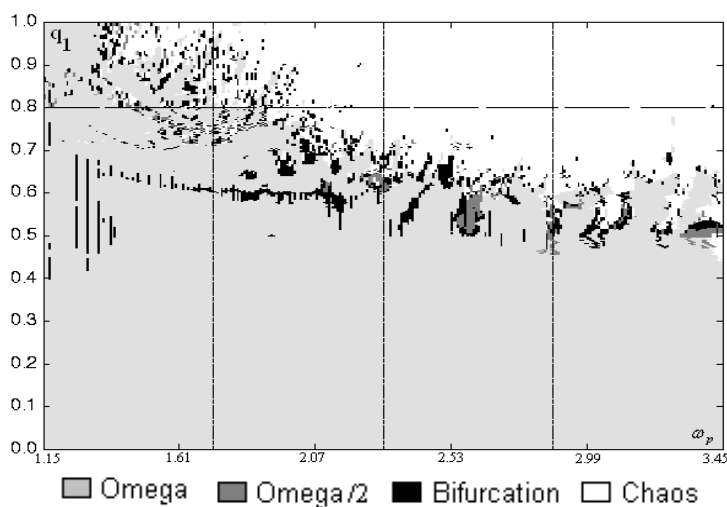


Рис.6. Карта управляющих параметров  $\{q_1, \omega\}$

прогиб  $w(0,5; 0,0; t) \leq 15$  появляются зоны бифуркаций, которые чередуются с зонами гармонических колебаний. По мере движения по параметру  $\omega_p$  возникают большие области хаоса, в которых существуют как зоны бифуркаций, так и зоны гармонических колебаний. Таким образом, зоны хаоса с увеличением  $q_1$  и  $\omega_p$  начинают возрастать.

Зависимость характера колебательных режимов от частоты внешнего сигнала  $\omega_p$  сложнее, чем от амплитуды  $q_1$  (см. рис. 5). Зафиксируем значение  $q_1 = 0,8$  (горизонтальная линия на рис. 6) и рассмотрим зависимости  $w_{\max}$  как функции  $\omega_p$  при адиабатическом

увеличении и уменьшении частоты  $\omega_p$  соответственно, причем шаг при увеличении и уменьшении возьмем разный, его величина указана на рис. 7 а, б. Сравнение кривых показывает, что шаг по  $\omega_p$  существенно влияет на сценарий колебаний (см. шкалы) и на зависимость  $w_{\max}(\omega_p)$ , особенно в области хаоса. Сравнение шкал и кривых  $w_{\max}(\omega_p)$  указывает на наличие в системе множества мелкомасштабных явлений, сопровождающихся частыми изменениями типов колебаний при изменении  $\omega_p$ , особенно при  $1 \leq \omega_p \leq 2,4$ .

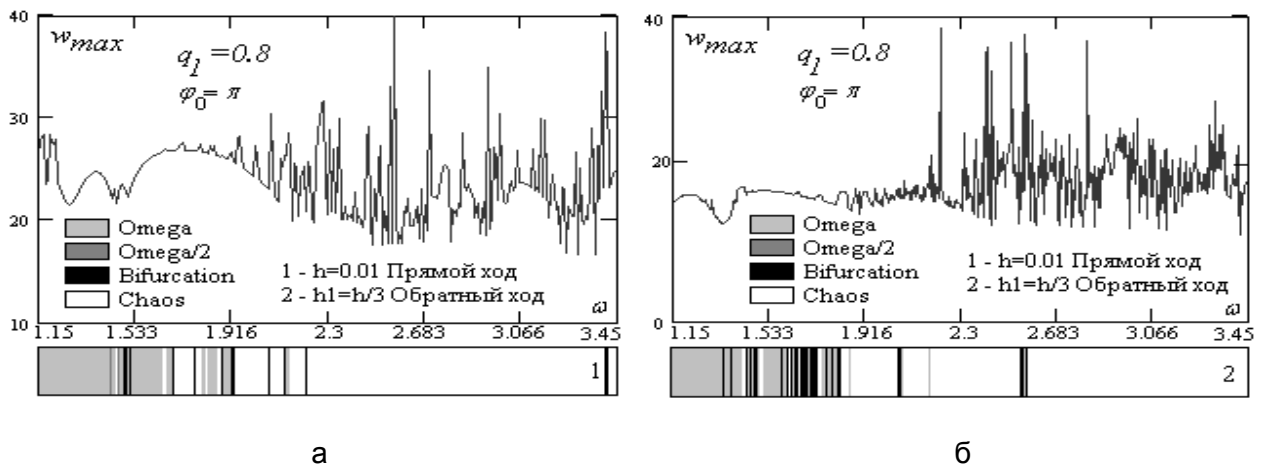


Рис. 7. Зависимость  $w_{\max}(\omega_p)$ : а – при адиабатическом увеличении частоты; б – при адиабатическом уменьшении частоты

### Основные выводы

При исследовании перехода в хаос замкнутых цилиндрических оболочек при действии знакопеременного внешнего давления, приложенного по полосе, можно выделить ряд особенностей, характерных для такого типа систем.

Система переходит в состояние хаоса через последовательность удвоение + утроение периода и наоборот, то есть для распределенных систем в виде замкнутых цилиндрических оболочек при неоднородном поперечном периодическом воздействии присутствует увеличение периода с четным и нечетным его числом. Наблюдается перемежаемость хаос – хаос – хаос, а также рождение и смерть странных аттракторов. Заметим, что явление утроения периода подтверждается теоремой А.Н. Шарковского [18].

В спектральной области после перехода механической системы к хаосу и появления движений мелких масштабов форма спектра мощности принимает вид, характерный для процессов с каскадом энергии вверх по спектру.

Жесткая потеря устойчивости сопровождается появлением независимой частоты в спектре мощности или возникновением бифуркаций удвоения и утроения периода.

В работе проанализирована эволюция странного аттрактора с изменением управляющих параметров (амплитуды  $q_1$  и частоты  $\omega_p$  вынуждающей силы). В вышеописанных сценариях были выявлены два возможных пути развития: эволюция с сохранением первоначальной топологической структуры или резкие (бифуркационные) изменения этой структуры. Первому варианту соответствует возникновение (разрушение) бифуркаций Хопфа, утроения периода колебаний системы. Резкие (бифуркационные) скачки сопровождаются появлением независимой частоты колебаний или, наоборот, связаны с исчезновением второй частоты и новой перестройкой системы – переходом на одночастотные колебания.

В работе построена карта управляющих параметров  $\{q_1, \omega\}$ , анализируя которую, можно управлять процессом перехода системы (цилиндрической оболочки) в состояние хаоса, используя при конкретных значениях амплитуды вынуждающей силы те значения частоты возбуждения, при которых точка на карте будет находиться в зоне гармонических колебаний или в зоне бифуркаций Хопфа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lorenz E.N. Deterministic Non-Periodic // J. Atmos. Sci. 1963. № 20. P.120-141.

---

# НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

---

УДК 629.621.018.66

А.С. Денисов, И.К. Данилов

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КРИВОШИПНО-ШАТУННОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ТОЛЩИНЕ МАСЛЯНОГО СЛОЯ

*Рассматриваются вопросы влияния теплового и скоростного режимов ДВС на толщину масляного слоя в шатунных подшипниках. Приведены расчет и обоснование режимов диагностирования кривошипно-шатунного механизма на примере двигателя КамАЗ-740.*

A.S. Denisov, I.K. Danilov

## MODEL DIAGNOSTING RESEARCH OF DIESEL ENGINE CVARK GROUPS ON THICKNESS OF AN OIL LAYER

*The article describes questions of influence of heat and velocity regimes of internal combustion engine on the width of oil slice in connecting rod rolling. The calculation and substantiation of the diagnostics regime of crank mechanisms on the example of the engine of automobile KamAZ-740 is given in this work.*

При исследовании скоростного режима ДВС и выборе оптимальной частоты вращения коленчатого вала для диагностирования кривошипно-шатунной группы (КШГ) необходимо:

- выяснить характер изменения толщины масляного слоя (ТМС) в шатунных подшипниках на различных скоростном и тепловом режимах работы ДВС;
- определить условия существования режимов движения поршня относительно шатуна с выборкой зазора в области ВМТ;
- оценить влияние температуры на тепловое расширение деталей двигателя.

Расчет проводился для цилиндра работающего ДВС, в который вместо форсунки планируется установить диагностическое устройство, способное герметизировать и разгерметизировать при необходимости камеру сгорания.

Для вывода формулы изменения минимальной ТМС в шатунном подшипнике при снятой форсунке воспользуемся методом кинестатики. Согласно принципу Даламбера:

$$P_j^1 + P_j^2 + F_{М.П.} + F_{зидр.} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $P_j^1 = -m\omega^2 r \cos \varphi$  – сила инерции 1-го порядка;  $P_j^2 = -m\omega^2 r \lambda \cos 2\varphi$  – сила инерции

2-го порядка;  $F_{\text{гидр.}} = \frac{\mu\omega}{\psi^2} l d \Phi_p$  – сила гидравлического слоя смазки;

$F_{\text{М.П.}} = 10\pi D H \left( 0,8 + 0,17\omega r \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \right)$  – сила механических потерь на трение поршня

и колец о гильзу цилиндра, для дизеля с вихревыми камерами сгорания получена эмпирически [1,2], где  $\psi$  – коэффициент, характеризующий посадку шейки-вкладыш;  $m$  – масса поршневого комплекта;  $\omega$  – частота вращения коленчатого вала;  $r$  – радиус кривошипа;  $\varphi$  – угол поворота коленчатого вала;  $\mu$  – динамическая вязкость масла;  $l$  – длина шатунного вкладыша;  $d$  – диаметр шатунного вкладыша;  $D$  – диаметр гильзы;  $H$  – высота поверхности трения гильзы;  $\lambda$  – относительный эксцентриситет;  $\Phi_p$  – коэффициент нагруженности.

Тогда:

$$m\omega^2 r (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) - 10\pi D H \left( 0,8 + 0,17\omega r \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \right) = \frac{\mu\omega}{\psi^2} l d \Phi_p, \quad (2)$$

откуда коэффициент нагруженности, являющийся безразмерной функцией положения шатунной шейки коленчатого вала в подшипнике и границ зоны несущего смазывающего слоя:

$$\Phi_p = \frac{\psi^2 \left[ m\omega^2 r (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) - 10\pi D H \left( 0,8 + 0,17\omega r \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \right) \right]}{\mu\omega l d}. \quad (3)$$

Согласно литературным данным, между коэффициентом нагруженности  $\Phi_p$  и относительным эксцентриситетом  $\lambda$  имеется эмпирическая связь. С помощью ЭВМ нами была подобрана наиболее достоверная взаимосвязь двух параметров (коэффициент корреляции 0,86), представляющая степенную зависимость:

$$\lambda = A \cdot \Phi_p^B = 0,6 \cdot \Phi_p^{0,18}. \quad (4)$$

С другой стороны, известно аналитическое выражение, связывающее относительный эксцентриситет и минимальное значение ТМС в шатунных подшипниках [3]:

$$h_{\min} = \delta(1 - \lambda), \quad (5)$$

где  $\delta$  – зазор в шатунных подшипниках.

Тогда ТМС в шатунных подшипниках:

$$h_{\min} = \delta \left[ 1 - 0,6 \left( \frac{\psi^2 \left[ m\omega^2 r (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) - 10\pi D H \left( 0,8 + 0,17\omega r \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \right) \right]}{\mu\omega l d} \right) \right]. \quad (6)$$

$$\text{В верхней мертвой точке при } \varphi=0: h_{\min} = \delta \left[ 1 - 0,6 \left( \frac{\psi^2 [m\omega^2 r (1 + \lambda) - 8\pi D H]^{0,18}}{\mu\omega l d} \right) \right].$$

Условия, соответствующие движению поршня относительно шатуна с выборкой зазора в области ВМТ, исходя из общего уравнения динамики поршня, базируются на втором законе Ньютона. Взяв начало координат на оси коленчатого вала, «+» – направление вращения по часовой стрелке, а движение «←» – от нижней мертвой точки к верхней, получим:

$$m \cdot \ddot{S} = F; \quad (7)$$



$$\ddot{S} = -r \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) + \Delta \ddot{S} ; \quad (8)$$

$$F = R - F_n \quad (9)$$

где  $m, \ddot{S}$  – масса и ускорение поршня;  $F$  – результирующая сила, действующая на поршень;  $\Delta \ddot{S}$  – ускорение поршня относительно верхней головки шатуна;  $R$  – сила, действующая на поршень со стороны верхней головки шатуна;  $F_n$  – результирующая сила сопротивления движению поршня, равная силе трения в сопряжениях поршневых колец с гильзой цилиндра и поршневого пальца с верхней головкой шатуна.

Анализируя (7)-(9) с учетом кинематики КШГ, можно отметить, что прямая выборка зазоров при подходе поршня к ВМТ имеет место при  $\Delta \ddot{S} = 0$ , то есть тогда, когда движение поршня предопределяется только перемещением шатуна. Это условие выполняется в определенном диапазоне частот:

$$0 < \omega \leq \omega_{0\max} ,$$

где  $\omega_{0\max}$  – максимальная частота, соответствующая переходу поршня в ВМТ от несвободного движения к свободному. Частоту  $\omega_{0\max}$  определим из (7)-(9) при одновременном выполнении условий несвободного ( $\Delta \ddot{S} = 0$ ) и свободного ( $R = 0$ ) движения поршня в ВМТ. При этом в ВМТ модуль переносного ускорения достигает максимума:

$|\ddot{S}| = r \omega^2 (1 + \lambda)$ , а искомая частота:

$$\omega_{0\max} = \sqrt{\frac{F_n}{m r (1 + \lambda)}} . \quad (10)$$

При использовании (10) с учетом  $F_n = 10 \pi D H \left( 0,8 + 0,17 \omega r \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \right)$  при  $\varphi = 0$ :

$F_n = 8 \pi D H$ . Окончательно:

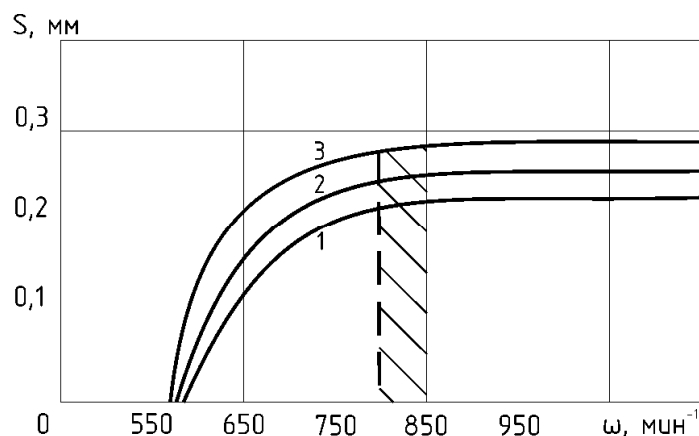
$$\omega_{0\max} = \sqrt{\frac{8 \pi D H}{m r (1 + \lambda)}} . \quad (11)$$

Так, для двигателей КамАЗ-740 зазоры в КШГ следует измерять при частоте вращения коленчатого вала 800...850 мин<sup>-1</sup>. Это подтверждается и результатами проведенного эксперимента на прогретом двигателе. При увеличении частоты вращения коленчатого вала выше указанного значения зазоры в КШГ не увеличиваются, то есть выбираются полностью, о чем свидетельствуют горизонтальные отрезки кривых на рисунке.

Оценим теперь влияние температурного режима работы ДВС на утолщение и удлинение шатунных вкладышей при разогретом двигателе. Согласно [3] тепловыделение в подшипнике:

$$Q = \int F_r \omega \frac{d}{2} = \psi \frac{\Phi_{mp}}{\Phi_p} F_r \omega \frac{d}{2} , \quad (12)$$

где  $\int$  – коэффициент трения в подшипнике;  $\Phi_{mp}$  – характеристика трения, представляющая собой безразмерную функцию положения шейки вала в подшипнике, границ несущего масляного слоя и отношения  $\frac{l}{d}$ ;  $\Phi_p$  – коэффициент нагруженности, являющийся безразмерной функцией положения шейки вала в подшипнике и границ зоны несущего смазывающего слоя, зависящего от отношения  $\frac{l}{d}$ ;  $F_r$  – несущая сила масляного слоя;  $d$  – внутренний диаметр вкладыша;  $\psi$  – коэффициент, определяющий посадку подшипника скольжения.



Зависимость перемещения поршня  $S$  в ВМТ от частоты вращения коленчатого вала при температуре масла в картере 1 – 30°C; 2 – 60°C; 3 – 90°C

Теплота, переносимая маслом из узла трения:

$$Q_1 = c q (t_2 - t_1), \quad (13)$$

где  $c$  – объемная теплоемкость масла;  $q$  – расход масла;  $t_1$  и  $t_2$  – температуры масла на входе и выходе из подшипника.

Теплота, отводимая корпусом подшипника во внешнюю среду:

$$Q_2 = \kappa \cdot A \cdot (t_m - t_{cp}), \quad (14)$$

где  $\kappa$  – коэффициент теплопередачи;  $A$  – площадь поверхности подшипника, омываемой маслом;  $t_m$  – средняя температура масла в нагруженной зоне;  $t_{cp}$  – температура окружающего масла.

Согласно уравнению теплового баланса при установившемся режиме работы подшипника:  $Q = Q_1 + Q_2$ , откуда:  $Q_1 = Q - Q_2$ .

Из формулы (13) расход масла:  $q = \frac{Q_1}{c(t_2 - t_1)}$ .

Подсчитаем удлинение вкладыша по окружности  $\Delta l$  и по ширине  $\Delta b$ :

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad \Delta b = b \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad (15)$$

где  $l$  – длина вкладыша;  $\alpha$  – температурный коэффициент расширения;  $\Delta t$  – перепад температур;  $b$  – ширина вкладыша.

Согласно [4]  $\Delta l = 0,094$  мм,  $\Delta b = 0,035$  мм, а  $\Delta h = h \cdot \alpha \cdot \Delta t = 2,46 \cdot 12 \cdot 10 \cdot 50 = 0,00148$  мм.

Таким образом, утолщение вкладыша при работе двигателя на диагностируемой частоте вращения не превышает 2% диагностического параметра, то есть не влияет на результаты диагностирования, о чем и свидетельствуют эксперименты на холодном и прогревом ДВС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные и тракторные двигатели: В 2 ч. Конструкция и расчет двигателей / Под ред. И.М. Ленина. М.: Высшая школа, 1976. 280 с.
2. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высшая школа, 1980. 400 с.
3. Кузьмин А.В. Расчеты деталей машин: Справ. пособие. 3-е изд. Минск: Высшая школа, 1980. 395 с.

4. Кулаков А.Т. Разработка способа диагностирования шатунных подшипников двигателей и практических рекомендаций для снижения их отказов в процессе эксплуатации: Дис. ... канд. техн. наук., Саратов, 1986. 173 с.

**Денисов Александр Сергеевич** –  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство»  
Саратовского государственного технического университета

**Данилов Игорь Кеворкович** –  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок на транспорте»  
Саратовского государственного технического университета

УДК 621.91.01

**Т.Г. Насад**

### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ С ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

*Предложен новый метод обработки, сочетающий высокоскоростное резание и тепловое воздействие, позволяющий повысить производительность обработки труднообрабатываемых материалов и обеспечить высокое качество поверхности. Приведены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между наиболее значимыми параметрами, характеризующими процесс.*

**T.G. Nasad**

### **PECULIAR PROPERTIES OF SURFACE FORMING AFTER HIGH-SPEED MACHINING WITH HEAT INFLUENCE**

*The new method of machine processing combining high-speed cutting and heat influence is proposed in this research. This method allows an increase of productivity in hard materials processing and high quality surfaces procedure. The dependencies between the most important parameters defining the processes are studied in the article.*

Наиболее высокой эффективностью при резании сталей и легких сплавов обладает высокоскоростная обработка (ВСО) [4]. Ее применение позволяет существенно поднять производительность и улучшить качество поверхности. Достижимая шероховатость после ВСО сопоставима с шероховатостью после шлифования, но при этом значительно сокращается общая длительность цикла формообразования. Применение ВСО позволяет отказаться от необходимости использования смазочно-охлаждающей технологической среды, что обуславливает более высокую экономичность процесса и в меньшей степени загрязняет окружающую среду. Скорости резания при ВСО в 5-10 раз превышают скорости резания при традиционной обработке, а высокая частота вынужденных колебаний технологической системы (ТС) и незначительные силы резания позволяют обрабатывать нежесткие детали. При исследовании теплофизики процесса ВСО основная часть тепла, выделившегося при резании, от-

водится со стружкой, поэтому тепловые деформации детали незначительны. ВСО редко применяется при резании труднообрабатываемых материалов, из-за низкой стойкости режущего инструмента. Практическая реализация данного способа возможна при условии снижения прочностных характеристик обрабатываемого материала, то есть при использовании предварительного нагрева поверхности заготовки.

При сочетании ВСО с тепловым воздействием на поверхность заготовки [2,3] возникает ряд особенностей, связанных с предварительным нагревом снимаемого припуска, высокими скоростями резания и прерывистостью процесса. Эти особенности накладывают существенные отличия как на механизм формирования качества обрабатываемого поверхностного слоя, так и на свойства поверхности детали. Нагрев заготовки в сочетании с высокими скоростями резания значительно уменьшает образование пластических заусенцев или локализует их образование в зоне, ограниченной геометрическим профилем режущего лезвийного инструмента, что приводит к улучшению микрогеометрии поверхности детали.

Для исследования влияния теплового фактора на качество поверхностного слоя разработана теплофизическая модель, позволяющая рассчитывать температуры в контактирующих телах с учетом фрикционного нагрева и резания.

При создании теплофизической модели фрикционной обработки деталь и инструмент представлены в виде полупространства, а стружка – в виде бесконечной пластины. Рассматривались три зоны контакта. Первая зона контакта – участок между стружкой и передней поверхностью инструмента с граничными условиями второго рода [5]: постоянным тепловым потоком в зоне контакта и нулевым потоком вне зоны контакта. При установившемся теплообмене температуры в инструменте выражаются зависимостью для полосового источника, непрерывно действующего на поверхности полупространства, то есть на боковой стороне фрикционного диска:

$$\Theta(y, \tau) = \frac{2q_{1\phi} \sqrt{\omega_{\phi}}}{\lambda_{\phi} \sqrt{\pi}} \left\{ \sqrt{\tau} \exp \left[ -\frac{y^2}{4\omega_{\phi}\tau} \right] - \frac{y\sqrt{\pi}}{\sqrt{4\omega_{\phi}}} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{y}{\sqrt{4\omega_{\phi}\tau}} \right] \right) \right\}, \quad (1)$$

где  $q_{1\phi}$  – плотность тепловыделения источника, действующего на стружке, Вт/м<sup>2</sup>;  $y$  – координата исследуемой точки, м;  $\omega_{\phi}$  – коэффициент температуропроводности материала диска, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_{\phi}$  – коэффициент теплопроводности материала диска, Вт/м °С;  $\tau$  – время действия источника, с.

Температура от действия плоского теплового источника с равномерно распределенной интенсивностью  $q_{1c}$ , движущегося по поверхности пластины (стружки), рассчитывается по формуле:

$$\Theta(y, z) = \int_{-h}^h \frac{q_{1c} K_m}{\pi \lambda} \exp \left[ -\frac{V_1(z-z')}{2\omega} \right] K_0 \left[ \frac{V_1}{2\omega} \sqrt{y^2 + (z-z')^2} \right] dz, \quad (2)$$

где  $K_m$  – коэффициент приведения формы [5];  $q_{1c}$  – плотность тепловыделения источника, действующего на стружке, Вт/м<sup>2</sup>;  $V_1$  – скорость перемещения стружки, м/с, определяемая выражением  $V_1 = V/k_c$ ;  $k_c$  – коэффициент усадки стружки;  $K_0$  – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка [8];  $y, z$  – координаты исследуемой точки, м;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности материала, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м °С.

Вторая зона контакта (задней поверхности диска с деталью) – участок, через который в обрабатываемую деталь поступает тепловой поток с равномерно распределенной плотностью тепловыделения, поэтому на обрабатываемой поверхности заданы граничные условия второго рода [5]. В условиях установившегося теплообмена температура от действия источника шириной  $2h$ , движущегося в полубесконечной теплопроводящей среде, рассчитывается по формуле [6]:

$$\Theta(x, z) = \int_{-h}^h \frac{q_{2c}}{\pi \lambda} \exp \left[ -\frac{V(z-z')}{2\omega} \right] K_0 \left[ \frac{V}{2\omega} \sqrt{x^2 + (z-z')^2} \right] dz, \quad (3)$$

где  $q_{2c}$  – плотность тепловыделения источника, Вт/м<sup>2</sup>;  $V$  – скорость перемещения источника, м/с;  $K_0$  – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка [4];  $x, z$  – координаты исследуемой точки, м;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности материала детали, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала детали, Вт/м °С.

Температурное поле в инструменте (фрикционном диске) от действия непрерывно действующего полосового источника описывается выражением:

$$\Theta(z, \tau) = \frac{2q_{2\phi} \sqrt{\omega_\phi}}{\lambda_\phi \sqrt{\pi}} \left\{ \sqrt{\tau} \exp \left[ -\frac{z^2}{4\omega_\phi \tau} \right] - \frac{z \sqrt{\pi}}{\sqrt{4\omega_\phi}} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{z}{\sqrt{4\omega_\phi \tau}} \right] \right) \right\}, \quad (4)$$

где  $z_u=0$ ;  $q_{2\phi}$  – плотность тепловыделения источника, Вт/м<sup>2</sup>;  $z$  – координата исследуемой точки, м;  $\omega_\phi$  – коэффициент температуропроводности материала диска, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_\phi$  – коэффициент теплопроводности материала диска, Вт/м °С;  $\tau$  – время действия источника, с.

Третья зона контакта включает источник, действующий в районе плоскости сдвига, который схематизирован как наклонный, движущийся внутри пластины со скоростью  $V_1$ , с равномерно распределенной интенсивностью  $q_\delta$ . На основании формулы [6] с учетом корректировки граничных условий, получено выражение:

$$\Theta(y, z) = \frac{q_\delta K_m}{\pi \lambda} \int_{-h}^h \exp \left( -\left\{ \frac{V_1}{2\omega} [y \sin \alpha_1 + (z-z') \cos \alpha_1] \right\} \right) K_0 \left[ \frac{V_1}{2\omega} \sqrt{y^2 + (z-z')^2} \right] dz', \quad (5)$$

где  $\alpha_1=90^\circ-\Phi$ ;  $\alpha_1$  – угол наклона действующего источника;  $\Phi$  – угол наклона плоскости сдвига.

По отношению к детали источник, действующий в плоскости сдвига, схематизирован как наклонный источник, движущийся по полупространству со скоростью  $V$  с равномерно распределенной интенсивностью  $q_\delta$ . Температурное поле от действия источника описывается формулой:

$$\Theta(x, z) = \frac{q_\delta}{\pi \lambda} \int_{-h}^h \exp \left( -\left\{ \frac{V}{2\omega} [x \sin \Phi + (z-z') \cos \Phi] \right\} \right) K_0 \left[ \frac{V}{2\omega} \sqrt{x^2 + (z-z')^2} \right] dz'. \quad (6)$$

Определить значения интенсивностей потоков тепловыделения можно, решив задачу баланса теплоты. Для этого составим систему уравнений:

$$\begin{cases} W = W_c + W_u + W_\phi = P_z V \\ W_c = b^* W_\delta + W_{1c} \\ W_u = (1 - b^*) W_\delta + W_{2c} \\ W_\phi = W_{1\phi} + W_{2\phi}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания;  $V$  – скорость резания;  $W_c, W_u, W_\phi$  – соответственно мощность тепловыделения в стружке, детали, фрикционном диске;  $W_\delta$  – мощность тепловыделения в результате деформации;  $W_{1\phi}, W_{2\phi}$  – тепловая мощность источников, возникающих на передней и задней поверхности инструмента как результат трения;  $W_{1\phi}, W_{2\phi}$  – тепловая мощность источников, возникающих на стружке и детали как результат трения;  $b^*$  – коэффициент, характеризующий часть теплоты деформации, передаваемую стружке.

Система уравнений является достаточно сложной и ее решение сопряжено с определенными трудностями вычислений. К наиболее удобным способам определения интенсивно-

стей тепловыделения относится их попарное рассмотрение, то есть определение относительных средних или максимальных значений температур  $\Theta^{omn}$  в пределах одной площадки контакта [5]. Тогда, для площадки контакта задней поверхности инструмента и детали, на основании граничных условий четвертого рода, имеем:

$$\bar{\Theta}_{2c} = \bar{\Theta}_{2\phi} . \quad (8)$$

Приравнивая значения средних температур, получим:

$$\int_{-h}^h \frac{q_{2c}}{\pi \lambda} \exp \left[ -\frac{V(z-z')}{2\omega} \right] K_0 \left[ \frac{V}{2\omega} \sqrt{x^2 + (z-z')^2} \right] dz =$$

$$= \frac{2q_{2\phi} \sqrt{\omega_\phi}}{\lambda_\phi \sqrt{\pi}} \left\{ \sqrt{\tau} \exp \left[ -\frac{z^2}{4\omega_\phi \tau} \right] - \frac{z \sqrt{\pi}}{\sqrt{4\omega_\phi}} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{z}{\sqrt{4\omega_\phi \tau}} \right] \right) \right\} . \quad (9)$$

По выражению (4) безразмерная температура определится выражением:

$$\Theta^{omn} = \frac{\lambda_\phi \sqrt{\pi} \Theta}{2q_{2\phi} \sqrt{\omega_\phi}} . \quad (10)$$

Аналогичным образом рассчитываются безразмерные температуры и на других контактных площадках.

Подстановка в систему (7) неизвестных параметров позволила получить следующие результаты: в стружку направляется 8% от общего количества выделившегося тепла; в деталь поступает 4% теплоты; в диск – 88%.

При установке на торцевую поверхность диска лезвийного инструмента возникают дополнительные источники теплоты, то есть ВСО вносит свой вклад в обобщенную теплофизическую модель в силу своих характерных особенностей, таких как предварительный нагрев поверхности, прерывистость процесса резания. В основу теплофизических исследований положена методика А.Н. Резникова с изменением схематизации контактирующих тел, типа формируемых источников, учетом периодизации теплового воздействия и др. При расчете тепловых полей в режущем инструменте учитывалась дискретность воздействия в виде импульсов прямоугольной формы с использованием функции  $(F_0-T)$  [9], представляющей собой зависимость теплового импульса от времени в период его действия. Решение задачи баланса теплоты при ВСО позволило определить, что в деталь поступает 15%, в стружку – 22%, в резец – 63% от общего количества выделившегося тепла.

Теплофизический анализ обработки стали 45 с фрикционным нагревом инструментом из стали 40Х показал, что температура нагрева детали составляет 610°C, инструмента – 853°C, стружки – 1024°C, что подтверждается экспериментальными исследованиями температур бесконтактным методом с помощью промышленного яркостного пирометра мод. «Промінь», работающего в диапазоне температур от 800 до 5000°C. Величина абсолютной погрешности при измерении температур в диапазоне 800-1400 °C составила 14°C, а средней квадратичной случайной составляющей основной погрешности – 2,5°C. Фиксировались температуры в зоне резания и температура стружки. В результате серии опытов установлено, что с увеличением скорости резания от 5 до 30 м/с мощность тепловыделения в зоне резания и соответственно температуры возрастают.

При исследовании качества поверхности после ВСО с учетом теплового воздействия применялся метод профилографирования обработанной поверхности с последующей обработкой данных на ЭВМ. Разработан ряд прикладных программ, рассчитывающих: высоту микронеровностей; корреляционную функцию профиля  $R(t)$ ; спектральную плотность профиля (частотный спектр наиболее значимых гармоник); средний шаг периодической состав-

ляющей; удельный вес периодической и случайной составляющих; длину опорной линии на высоте профиля и др.

Для получения наиболее полной информации о профиле запись профилограммы производилась на режимах, фиксирующих все значимые микронеровности поверхности. Разрешающая способность профилограммы определялась минимальным значением параметра  $h_c$ :

$$h_c = \frac{60L}{V_{np} N}, \quad (11)$$

где  $L$  – длина профилограммы;  $V_{np}$  – скорость перемещения ленты;  $N$  – количество расчетных точек.

Корреляционная функция профиля  $R(\tau)$  позволила выделить наличие и уровень случайной и периодической составляющих в профиле, которые очень сложно обнаружить другими способами и рассчитывалась по координатам точек профилограммы по формуле:

$$R(\tau) = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=1}^N Y_i Y_{(i+\tau)}, \quad (12)$$

где  $N$  – количество измеренных точек профиля;  $\tau$  – количество расчетных значений корреляционной функции;  $Y_i$  – значение ординаты профилограммы на  $i$ -м шаге.

Спектральная плотность  $G(f)$ , определяющая частотный состав и интенсивность каждой частотной составляющей в профилограмме, рассчитывалась по формуле:

$$G(f) = 2h_c \left[ R_0 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} R(\tau) \cos\left(\frac{\pi \tau f}{f_c}\right) + R(m) \cos\left(\frac{\pi m f}{f_c}\right) \right], \quad (13)$$

где  $h_c$  – принятый интервал времени отсчета;  $R_0$  – значение корреляционной функции в нулевой точке;  $R(\tau)$  – значение корреляционной функции при шаге  $\tau$ ;  $R(m)$  – значение корреляционной функции при шаге  $m$ ;  $m$  – число шагов корреляционной функции;  $f_c$  – частота среза;  $f$  – произвольное значение частоты в диапазоне  $0 < f < f_c$ .

Шаг периодической составляющей корреляционной функции  $T_\beta$ , характеризующей периодичность воздействия того или иного фактора при обработке для  $i$ -й составляющей определялся из соотношения:

$$T_{\beta_i} = T_i \frac{1}{f_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i. \quad (14)$$

Удельная доля периодической  $\beta$  и случайной  $\gamma$  составляющих профиля позволяет судить о соотношении между этими параметрами. Для любого процесса имеет место соотношение [7]:

$$\beta + \gamma = 1. \quad (15)$$

Средний шаг случайной составляющей  $T_\gamma$  определялся по формуле [1,7]:

$$T_\gamma = \sqrt{\frac{5\tau_p}{\ln\left(\frac{R_p(\tau)}{\gamma^2}\right)}}, \quad (16)$$

где  $\tau_p$  – абсцисса точки, выбираемая на произвольном расстоянии от начала координат (обязательно выше систематической части коррелограммы);  $R_p(\tau)$  – ордината корреляционной функции в точке с абсциссой, равной  $\tau_p$ ;  $\gamma$  – удельная доля случайной составляющей.

Для исследования шероховатости после фрикционной обработки анализировалась профилограмма поверхности, полученная в результате предварительного нагрева заготовки до температуры  $\Theta=430^\circ\text{C}$ . Производилась обработка образца из стали 40Х на режимах: скорость резания  $V=10$  м/с; подача  $S_z=0,06$  мм/зуб; глубина резания  $a=2,2$  мм.

Определение удельного веса периодической  $\beta$  и случайной  $\gamma$  составляющих в профиле производилось методом прямого перебора значений  $\gamma$ ,  $\beta$  в диапазоне  $0 < \gamma < 1$  и  $0 < \beta < 1$  с выбранным шагом  $\Delta\gamma$  и  $\Delta\beta$ .

Определение амплитуды и частоты колебаний составляет одну из наиболее важных и сложных задач гармонического анализа. Функционал  $R_a$  (среднее арифметическое отклонение точек реализации процесса от оси стационарности на интервале  $[0; L]$ ) определялся из выражения:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L x(t) dt . \quad (17)$$

Математическое ожидание  $ER_a$ , выраженное через значение корреляционной функции, в нулевой точке  $R_0$  имеет вид:

$$ER_a = \sqrt{\frac{2R_0}{\pi}} . \quad (18)$$

Аналогичное выражение получено для суперпозиции гармоник со случайной фазой. Для определения амплитуды колебаний каждой периодической составляющей спектра  $A_1, A_2, \dots, A_n$  необходимо решить систему уравнений:

$$A_1 + A_2 + \dots + A_n = R(\beta) ; \quad (19)$$

$$R(\beta) = A_1 \cos\left(\frac{\pi\tau}{T_1}\right) + A_2 \cos\left(\frac{\pi\tau}{T_2}\right) + \dots + A_n \cos\left(\frac{\pi\tau}{T_n}\right) . \quad (20)$$

Значения  $T_1, T_2, \dots, T_n$  определялись по формуле:

$$T_i = \frac{1}{f_i} , \quad (21)$$

где  $f_i$  – наиболее значимые частоты, выявленные при спектральном анализе корреляционной функции. Средний шаг периодической составляющей  $T_\beta$  определялся путем измерения шагов между соседними впадинами графика корреляционной функции.

Исследования шероховатости после высокоскоростной обработки показали, что среднее значение микронеровностей поверхности составило  $R_z = 4 \dots 7$  мкм. Скорость затухания корреляционных связей характеризовалась значением  $\alpha = 0,09$ . Удельный вес случайной составляющей соответствовал  $\gamma = 0,22$ , в то время как периодическая составляющая была равна  $\beta = 0,78$ .

По итогам обработки профилограммы процесса ВСО с фрикционным подогревом зоны резания получена зависимость шероховатости поверхности от режимов резания и температуры подогрева снимаемого припуска.

Зависимость имеет вид:

$$R_z = C_1 V^{-\alpha} S^\beta a_1^\gamma \Theta^\lambda . \quad (22)$$

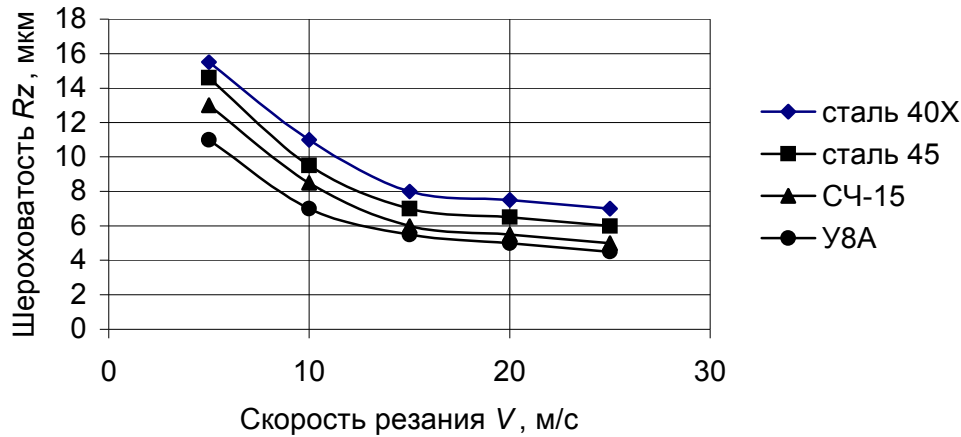
Значения коэффициентов и показателей степени для различных материалов приведены в таблице.

Значения коэффициентов и показателей степени в формуле (22)

Обрабатываемый материал	$C_1$	$\beta$	$\gamma$	$\lambda$	$\alpha$
Сталь 45	0,93	0,43	0,24	0,15	0,37
Сталь 40X	0,97	0,46	0,23	0,16	0,28
Сталь У8А	0,88	0,38	0,21	0,16	0,31
X18H10T	1,13	0,43	0,23	0,13	0,33
СЧ-15	0,98	0,44	0,25	0,17	0,30



Экспериментально установлено, что нагрев заготовки существенно изменяет картину формирования шероховатости. Изменение физико-механических свойств металла от нагрева приводит к значительному улучшению шероховатости поверхности (см. рисунок).



Зависимость шероховатости поверхности после ВСО с фрикционным нагревом от скорости резания ( $S=35$  мм/мин;  $t_{\phi}=2,5$  мм;  $t_r=1,0$  мм)

Сопоставление значений шероховатости  $R_z$ , полученных экспериментальным и теоретическим путем на основе профилограммы и последующего корреляционного анализа, показывает, что их расхождение не превышает 15-18%.

Применение спектрально-корреляционного анализа позволяет выявить удельный вес систематической и случайной составляющих и соответственно оценить их с позиций управления процессом. Значительный удельный вес случайной составляющей при обработке с ФН показал, что в формировании профиля принимают участие случайные процессы, такие как пластическая деформация металла, попадание раскаленных частиц в зону резания и другие, поэтому обработка с ФН не может быть отнесена к чистовым операциям. Для устранения недостатков и коррекции макро- и микрогеометрических характеристик необходима дополнительная чистовая обработка.

Исследования шероховатости после ВСО показали, что профиль характеризуется значительным удельным весом периодической составляющей, что позволяет причислить процесс ВСО с тепловым воздействием к управляемым. Таким образом, при ВСО возможно улучшение показателей качества за счет регулирования режимов обработки, в частности за счет увеличения скорости резания  $V$  и уменьшения величины подачи  $S$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов В.А. Конференция по высокоскоростной обработке // СТИН. 2000. С.32-36.
2. Насад Т.Г., Игнатъев А.А. Высокоскоростная обработка труднообрабатываемых материалов с дополнительными потоками энергии в зоне резания. Саратов: СГТУ, 2002. 112 с.
3. Насад Т.Г., Козлов Г.А. Лезвийная обработка сталей с фрикционным подогревом зоны резания // СТИН. 2000. № 12. С.27-29.
4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1982. 279 с.
5. Янге Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1983. 344 с.
6. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 166 с.

7. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
9. Хусу А.П., Витенберг Б.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхности. М.: Наука, 1975. 217 с.

**Насад Татьяна Геннадиевна –**

кандидат технических наук, доцент,  
докторант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами»  
Саратовского государственного технического университета.

УДК 629.113.004

**М.А. Трефилов**

**ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ КУЗОВА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА  
НА ОСВЕЩЕННОСТЬ ДОРОГИ**

*Рассмотрено влияние различных вариантов продольных колебаний кузовов транспортных средств на освещенность дороги. Определены условия, при которых на определенных режимах негативные последствия продольных колебаний могут быть сведены к нулю.*

**M.A. Trefilov**

**THE INFLUENCE OF THE OSCILLATIONS OF A VEHICLE'S BODY  
ON THE HEAD LAMP LIGHTING**

*The influence of different variants of the longitudinal oscillations of a vehicle's body on the head lamp lighting is considered. The conditions under which negative consequences of the longitudinal oscillations can be lowered down to zero on certain regimes are defined.*

Колебания неподрессоренных масс сказываются не только на плавности хода транспортных средств, но и на целом ряде эксплуатационных показателей, в частности связанных с безопасностью дорожного движения.

Для проверки подвесок транспортных средств в настоящее время наибольшее распространение получили два способа: амплитудный и по нормальной реакции опорной поверхности (метод EUSAMA – европейской ассоциации производителей амортизаторов).

Амплитудный способ заключается в возбуждении вынужденных колебаний в подвесках с закритической частотой (с частотой, превышающей резонансную). Последующее измерение параметров свободно затухающих колебаний позволяет определить техническое состояние подвесок. Оценка производится по амплитуде колебаний на резонансной частоте измерительной площадки, на которую опирается колесо транспортного средства. Отличительная особенность данного метода – эластичная связь между возбудителем колебаний и измерительной площадкой.

По соотношению амплитуд колебаний опорных площадок передних  $A_n$  и задних  $A_3$  колес транспортные средства можно подразделить на три группы:

1.  $A_n > A_3$
2.  $A_n < A_3$
3.  $A_n = A_3$

При совпадении собственных резонансных частот передних и задних подвесок на режиме синхронных колебаний в первых двух случаях наряду с вертикальными продольными будут иметь место угловые колебания (галопирование) кузова транспортного средства с амплитудой  $2\varphi_1$ . В первом случае условный центр угловых колебаний находится позади транспортного средства, во втором – впереди (рис. 1).

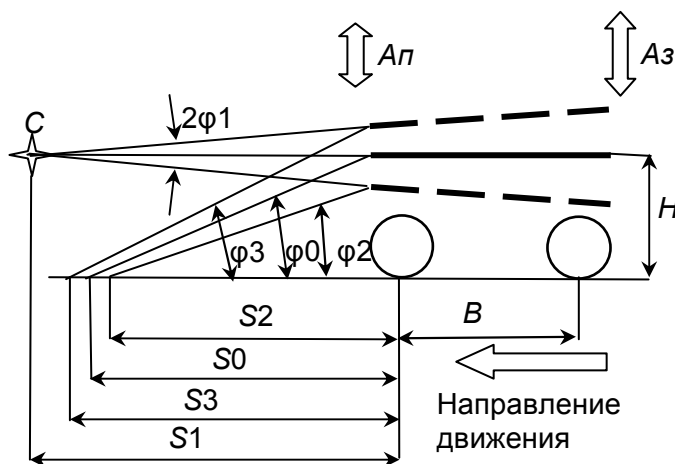


Рис. 1. Колебания кузова транспортного средства:

$C$  – центр угловых колебаний;  $2\varphi_1$  – амплитуда продольного угла наклона кузова транспортного средства; амплитуда вертикальных колебаний опорных площадок колес:  $A_n$  – передних;  $A_3$  – задних; угол наклона светового пучка в вертикальной плоскости:  $\varphi_0$  – исходный;  $\varphi_2$  – при крайнем нижнем положении кузова;  $\varphi_3$  – при крайнем верхнем;  $S_1$  – расстояние от передней оси до центра угловых колебаний; расстояние от передней оси до точки пересечения светового пучка с опорной поверхностью:  $S_0$  – в исходном состоянии;  $S_2$  – при крайнем нижнем положении кузова;  $S_3$  – при крайнем верхнем;  $B$  – база;  $H$  – высота установки фары (по центру рассеивателей)

Для каждого из трех вариантов при колебаниях кузова транспортного средства расстояние от передней оси до точки пересечения светового пучка с дорогой  $S$  зависит от высоты установки фары  $H$ , исходного угла наклона светового пучка в вертикальной плоскости  $\varphi_0$ , амплитуд колебаний опорных площадок передних  $A_n$  и задних  $A_3$  колес и расстояния между осями (базы)  $B$  транспортного средства

$$S = f(H, \varphi_0, A_n, A_3, B). \quad (1)$$

Учитывая, что  $A_n, A_3, B$  определяют  $\varphi_1$ , выражение (1) может иметь иной вид

$$S = f(H, \varphi_0, A_n, \varphi_1). \quad (2)$$

Следует отметить, что параметры  $H, \varphi_0, A_n, A_3, \varphi_1$  зависят от степени загрузки транспортного средства.

Высота установки фары  $H$  задается заводом-изготовителем для каждой марки (модели) подвижного состава, либо измеряется самостоятельно (расстояние от опорной поверхности автомобиля до центра рассеивателей).

Угол наклона светового пучка в вертикальной плоскости  $\varphi_0$  в исходном состоянии определяется ГОСТ Р 51709-01 «Автотранспортные средства. Требования к техническому состоянию по условиям безопасности движения» [1].

Исходное расстояние от передней оси до точки пересечения светового пучка с дорогой  $S_0$  зависит от высоты установки фары  $H$  и исходного угла наклона светового пучка в вертикальной плоскости  $\varphi_0$

$$S_0 = f(H, \varphi_0), \quad (3)$$

$$S_0 = H \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0. \quad (4)$$

В дальнейшем целесообразно использование известного соотношения для малых углов

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – в радианах.

Тогда (4) примет вид

$$S_0 \approx H / \varphi_0. \quad (6)$$

Угловые колебания (галомирование) кузова транспортного средства с амплитудой  $2\varphi_1$  пропорциональны разности амплитуд  $\Delta A$  колебаний опорных площадок передних  $A_n$  и задних  $A_3$  колес

$$\Delta A = A_n - A_3 \quad (7)$$

и обратно пропорциональны расстоянию между осями (базе)  $B$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} (|A_n - A_3| / (2 \cdot B)) \approx |A_n - A_3| / (2 \cdot B). \quad (8)$$

Разность расстояний от передней оси автомобиля до точек пересечения светового пучка с дорогой  $\Delta S$  при крайнем верхнем  $S_3$  и при крайнем нижнем  $S_2$  положении кузова определяет изменение освещенности дороги транспортным средством

$$\Delta S = S_3 - S_2. \quad (9)$$

Для случая  $A_n = A_3$ ,  $\Delta S$  увеличивается с ростом  $A_n = A_3$  и уменьшается с ростом  $\varphi_0$ . Значение  $B$  в этом случае не играет никакой роли. Формально  $H$  также не играет никакой роли, однако высота установки фары (по центру рассеивателей) и угол наклона светового пучка в вертикальной плоскости  $\varphi_0$  связаны между собой.

$$S_2 = (H - (A_n / 2)) \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0 \approx (H - (A_n / 2)) / \varphi_0, \quad (10)$$

$$S_3 = (H + (A_n / 2)) \cdot \operatorname{ctg} \varphi_0 \approx (H + (A_n / 2)) / \varphi_0, \quad (11)$$

$$\Delta S = A_n \cdot \operatorname{ctg} (\varphi_0) \approx A_n / \varphi_0. \quad (12)$$

Изменение освещенности дороги транспортным средством  $\Delta S$  прямо пропорционально  $A_n$ . Коэффициент пропорциональности зависит от первоначальной установки фар. Чем меньше угол наклона фар, тем больше  $\Delta S$ , и наоборот, чем больше угол наклона фар, тем меньше  $\Delta S$ .

Для случая  $A_n > A_3$ ,  $\Delta S$  увеличивается с ростом  $H$ ,  $\Delta A$ ,  $A_n$  и уменьшается с ростом  $B$  и  $\varphi_0$

$$S_2 = (H - (A_n / 2)) \cdot \operatorname{ctg} (\varphi_0 + \varphi_1) \approx (H - (A_n / 2)) / (\varphi_0 + \varphi_1), \quad (13)$$

$$S_3 = (H + (A_n / 2)) \cdot \operatorname{ctg} (\varphi_0 - \varphi_1) \approx (H + (A_n / 2)) / (\varphi_0 - \varphi_1), \quad (14)$$

$$\Delta S \approx (2 \cdot H \cdot \varphi_1 + A_n \cdot \varphi_0) / (\varphi_0^2 - \varphi_1^2). \quad (15)$$

В случае, если

$$\varphi_0 \gg \varphi_1, \quad (16)$$

формулу (15) можно упростить

$$\Delta S \approx (2 \cdot H \cdot \varphi_1 + A_n \cdot \varphi_0) / \varphi_0^2. \quad (17)$$

Для случая  $A_n < A_3$  поведение  $\Delta S$  имеет более сложный характер. При определенных соотношениях эта величина первоначально уменьшается, переходит через ноль, а затем увеличивается. Причем при крайнем верхнем положении кузова точка пересечения оси светового потока и горизонтальной поверхности будет находиться ближе к автомобилю, чем при крайнем нижнем положении кузова.

$$S_2 = (H - (A_n / 2)) \cdot \text{ctg}(\varphi_0 - \varphi_1) \approx (H - (A_n / 2)) / (\varphi_0 - \varphi_1), \quad (18)$$

$$S_3 = (H + (A_n / 2)) \cdot \text{ctg}(\varphi_0 + \varphi_1) \approx (H + (A_n / 2)) / (\varphi_0 + \varphi_1), \quad (19)$$

$$\Delta S \approx \frac{2H\varphi_1 - A_n\varphi_0}{\varphi_0^2 - \varphi_1^2}, \quad (20)$$

$$\Delta S \approx \frac{2H\varphi_1 - A_n\varphi_0}{\varphi_0^2}. \quad (21)$$

Возможны три варианта:

1. Оси световых потоков фар в крайних положениях кузова представляют сходящиеся, но не пересекающиеся на опорной поверхности автомобиля лучи. Точка пересечения находится под опорной поверхностью.

2. Оси световых потоков фар в крайних положениях кузова представляют сходящиеся лучи, пересекающиеся на опорной поверхности автомобиля.

3. Оси световых потоков фар в крайних положениях кузова представляют сходящиеся лучи, пересекающиеся над опорной поверхностью автомобиля.

При увеличении степени загрузки транспортного средства величина  $H$  уменьшается. Иными словами, при прочих равных условиях изменение границ светового пятна фар у груженого автомобиля при колебаниях кузова будет меньше, чем у частично груженого или порожнего автомобиля.

На автотранспортных средствах, фары которых снабжены корректирующим устройством, последнее при загрузке автотранспортного средства должно быть приведено в соответствующее загрузке положение. Однако, это в ряде случаев может привести к более существенному изменению границ светового пятна фар у груженого автомобиля при колебаниях кузова по сравнению с частично груженым или порожним автомобилем. Например, при высоте установки фары (по центру рассеивателей) до 600 мм угол наклона светового пучка в вертикальной плоскости  $34'$ , а при высоте свыше 600 до 700 –  $45'$ , то есть высота изменилась на 100 мм (16,7%), а угол – на  $11'$  (32,3%).

Следует отметить также, что в ряде случаев с изменением степени загрузки транспортного средства изменяются  $A_n$  и  $A_3$  и соответственно соотношение между ними.

Точка экстремума для случая  $A_n < A_3$

$$\Delta S = (2 \cdot H \cdot \varphi_1 - A_n \cdot \varphi_0) = 0. \quad (22)$$

Это условие выполняется при

$$2 \cdot \varphi_1 = A_n \cdot \varphi_0 / H, \quad (23)$$

где  $2 \cdot \varphi_1$  – амплитуда продольного угла наклона транспортного средства, при которой оси световых потоков фар в крайних положениях кузова представляют сходящиеся лучи, пересекающиеся на опорной поверхности автомобиля (экстремум продольного угла наклона транспортного средства).

Каждому значению высоты установки фары (по центру рассеивателей)  $H$  соответствует свой угол наклона светового пучка в вертикальной плоскости  $\varphi_0$ . Для большинства легковых автомобилей нормативные и фактические значения амплитуд колебаний опорных площадок колес находится в пределах 20...100 мм (рис. 2).

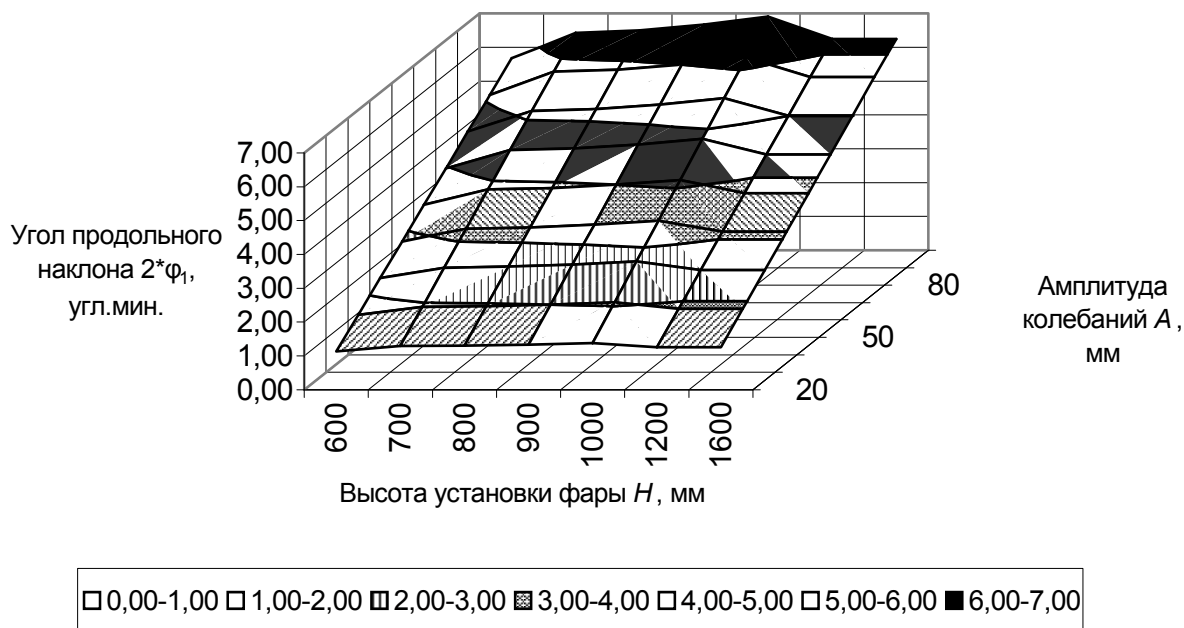


Рис. 2. Экстремумы углов продольного наклона кузова транспортного средства, угл. мин.

На основе изложенного алгоритм оценки подвески транспортного средства по критерию освещенности дороги выглядит следующим образом.

1. На стендах, предназначенных для диагностирования подвесок автотранспортных средств амплитудным способом, измеряют  $A_n < A_3$ .
2. Определяют соотношение между  $A_n$  и  $A_3$ :  $A_n < A_3$ ,  $A_n = A_3$ ,  $A_n > A_3$ .
3. Измеряют или определяют по нормативно-технической документации значения  $H$ ,  $\phi_0$ ,  $B$ .
4. Рассчитывают значения  $\phi_1$ ,  $\Delta S$ ,  $S_0$ ,  $S_3$ ,  $S_2$ .
5. В случае  $A_n < A_3$  рассчитывают экстремальное значение  $\phi_1$  по формуле (23) или определяют по графику (рис. 2).
6. По формуле

$$A_3^p = A_n + (2B)\text{tg}\phi_1 \approx A_n + (2B)\phi_1 \quad (24)$$

рассчитывают экстремальное значение амплитуды колебаний опорной площадки задних колес (оси световых потоков фар в крайних положениях кузова представляют сходящиеся лучи, пересекающиеся на опорной поверхности автомобиля).

7. Сравнивают фактическое  $A_3$  и расчетное  $A_3^p$  значения и делают заключение о степени их расхождения.

8. В случае необходимости осуществляют корректирующие технические воздействия в рамках рекомендаций заводов-изготовителей, направленные на изменение характеристик подвесок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 51709-01 «Автотранспортные средства. Требования к техническому состоянию по условиям безопасности движения». М.: Изд-во стандартов, 2001. 26 с.

**Трефилов Михаил Анатольевич** –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета.

---

## НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

---

УДК 621.9.047/048-114

**Н.В. Бекренев, А.В. Лясникова, Д.В. Трофимов**

### **ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ПРУТКОВОГО МАТЕРИАЛА**

*Изложены результаты исследований плазменного напыления металлических покрытий путем распыления пруткового материала при воздействии на него ультразвуковых колебаний. Установлено повышение однородности частиц по размерам и форме, что позволяет прогнозировать повышение качества покрытия.*

**N.V. Bekrenev, A.V. Lyasnikova, D.V. Trofimov**

### **FORMATION OF COVERINGS BY MEANS OF PLASMA SPRAY WITH ULTRASONIC DISPERSION OF CORE MATERIAL**

*The results of the research in plasma spray metal coverings performed by means of dispersion of core material which is influenced by ultrasonic vibration are given here. The study shows an increase in uniformity of particles in size and shape.*

Плазменное напыление является одним из эффективных способов формирования на поверхности деталей слоев покрытий различного функционального назначения [1,2]. В настоящее время применяются две схемы напыления: подачей в струю плазмы порошкового материала, который формирует покрытие; подачей пруткового материала, который расплавляется и диспергируется потоком газа на частицы, переносимые к поверхности детали.

Проанализировав существующие схемы плазменного напыления, можно сделать следующие выводы:

– при напылении порошковых материалов в потоке плазмы находятся частицы различного размера, обладающие различными скоростями и степенью проплавления, что определяет существенную анизотропию свойств покрытия;

– при напылении распыляемого пруткового материала все частицы находятся в полностью проплавленном состоянии, но их размеры отличаются вследствие различия скоростей ионизированного газа по оси и периферии потока, вызывающих диспергирование исходной макрокапли. Поэтому покрытие формируется также из неоднородных по размеру частиц (но различия в размерах частиц существенно меньше, чем при порошковом напылении).

Таким образом, все методы имеют существенные недостатки. Предлагается другой метод получения покрытий на деталях: распыление пруткового материала в потоке плазмы с одновременным воздействием на него ультразвуковых колебаний. Это позволит, по нашим данным [3,4,5], получать в потоке плазмы частицы, более близкие по размерам и одинаковые по своим свойствам, чем другими методами.

Сравнение частиц, которые могут быть использованы для плазменного напыления покрытий различными методами, показало существенное различие исходного материала по геометрическим характеристикам.

Порошкообразные частицы имеют неправильную форму и поверхность со сложной морфологией. Неправильная форма частиц может вызвать, из-за неоптимальных аэродинамических характеристик, отклонения в траектории движения в потоке плазмы, периодическое попадание их в осевые и периферийные области потока, характеризующиеся различной температурой и скоростью газа. Поэтому частицы достигают поверхности в различной степени проплавления и обладая различной скоростью. Кроме этого неправильная форма является причиной неравномерного проплавления в различном направлении частиц, что также создает различные условия контакта их с поверхностью. Неправильная форма исходных частиц приводит и к неправильной форме агломератов, образующих покрытие, неоднородной его структуре и морфологии. Вследствие этого покрытие будет формироваться неоднородным по свойствам и структуре.

Частицы, образованные ультразвуковым диспергированием первичной капли расплава, имеют явно выраженную сферическую форму. Их поверхность гладкая и блестящая, без видимых нарушений. Такая форма способствует более равномерной траектории движения частиц в потоке, ориентированной в определенной зоне потока, то есть изначально попавшие в осевую зону частицы будут двигаться в ней до поверхности детали, аналогично и попавшие в периферийную зону. Поэтому можно с большой достоверностью предсказать свойства частиц, формирующих покрытие. Правильная сфероидальная форма при соударении с поверхностью вследствие деформации под действием ударного и напорного давлений приобретет более или менее правильную форму диска, тарелки или тора. Таким образом, следует ожидать более однородной структуры покрытия.

Размерный анализ частиц позволяет сделать следующие выводы.

Средний размер непросеянных частиц порошкообразного материала составляет 254 мкм. Их разноразмерность характеризуется следующими параметрами (рис. 1). Частицы,

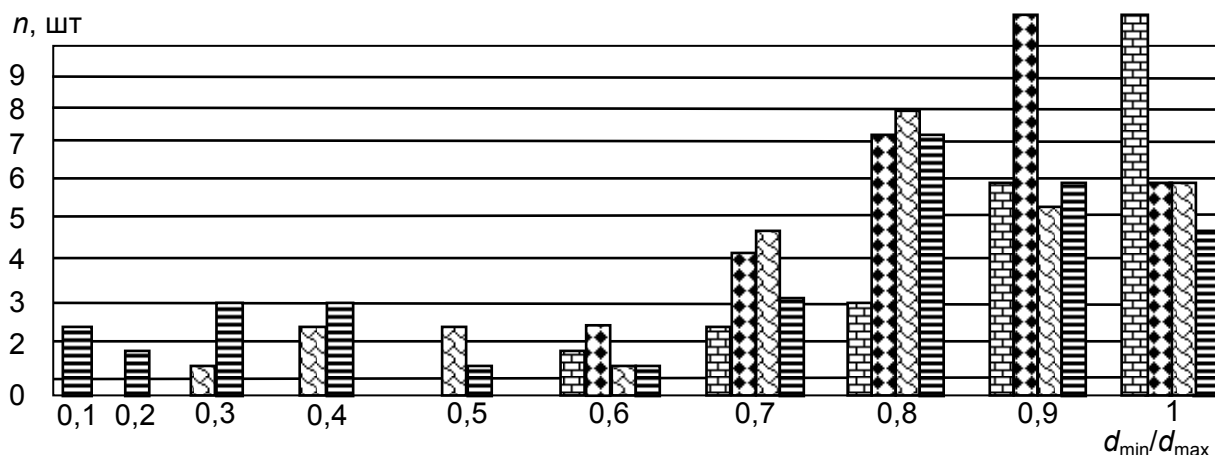


Рис. 1. Размерный анализ частиц:

- с УЗК, при A=12 мкм;
- просеянный титан;
- с УЗК, при A=4 мкм;
- непросеянный титан



имеющие форму, близкую к симметричной, составляют не более 15% от общего числа измеренных частиц. Частицы с отклонениями формы до 0,1 составляют 20%, а с отклонениями 0,2-25%. Остальные частицы имеют отклонения от симметричности от 25 до 300%, то есть их можно отнести к частицам неправильной формы.

Средний размер просеянных частиц составляет 97 мкм. Относительно симметричную форму имеют около 20% всех частиц, 40% частиц характеризуются отклонениями от симметричности до 0,3.

Таким образом, с точки зрения симметричности формы исходные и просеянные порошкообразные частицы практически не различаются.

Частицы, образованные ультразвуковым распылением первичной капли при амплитуде колебаний 4 мкм имеют средний размер 45 мкм. Сфероидальные (симметричные) частицы составляют около 20% общего количества. Частицы с отклонениями от сферичности 0,1 составляют не менее 35%, с отклонениями до 0,2-25%. Остальная часть приходится на частицы с большими отклонениями.

При амплитуде 12 мкм образуются частицы со средним размером 39,4 мкм. Сфероидальные частицы составляют 50%.

Следовательно, при ультразвуковом распылении образуется поток частиц, доля симметричных в котором, по сравнению с просеянным порошкообразным материалом, выше от 3 до 5 раз в зависимости от амплитуды колебаний, что может соответственно повысить и однородность структуры покрытий.

Распределение размеров частиц от среднестатистического отклонения характеризуется гистограммами рис. 2.

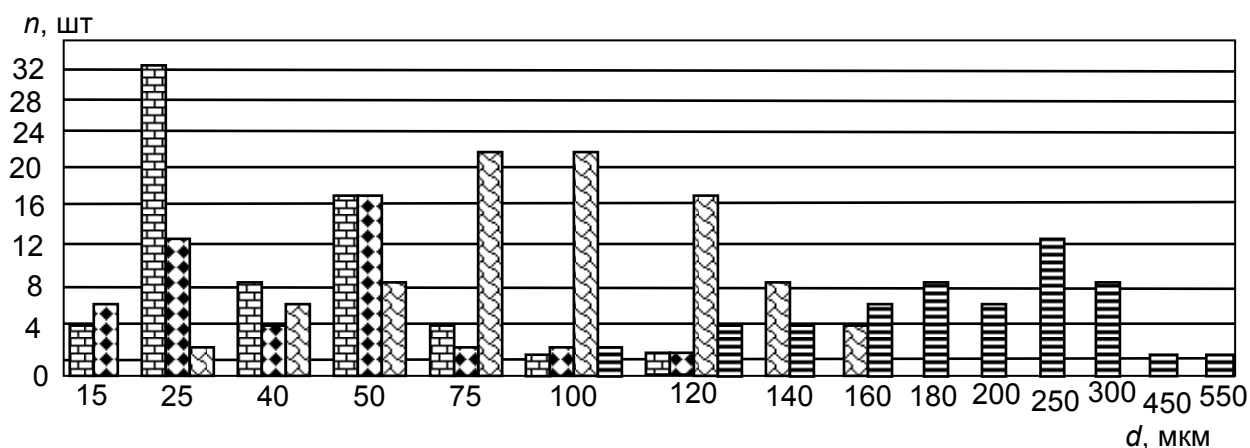


Рис. 2. Распределение размеров частиц:

- |  |                        |  |                      |
|--|------------------------|--|----------------------|
|  | – с УЗК, при A=12 мкм; |  | – просеянный титан;  |
|  | – с УЗК, при A=4 мкм;  |  | – непросеянный титан |

Видно, что исходный титановый порошок имеет разброс размеров частиц от 100 до 625 мкм с дисперсией  $\sigma=7331,5$ . Просеянный порошок имеет разброс значений от 25 до 150 мкм с дисперсией  $\sigma=1218,7$ . При воздействии ультразвука с амплитудой 4 мкм образуются частицы с размерами от 12,5 до 87,5 мкм и дисперсией  $\sigma=430,45$ . Амплитуда 12 мкм приводит к образованию частиц с размерами от 7,5 до 125 мкм и дисперсией  $\sigma=438,86$ .

Поскольку порошкообразные и распыленные частицы имеют различные размеры, то оценка разбросов размеров проводилась по относительной дисперсии, равной отношению дисперсии к среднему размеру частиц.

Относительная дисперсия размеров составила: для исходного порошка  $\delta\sigma=28,85$ ; для просеянного титана  $\delta\sigma=12,6$ ; для частиц, образованных распылением при  $A=4$  мкм –  $\delta\sigma=9,6$ ; при  $A=12$  мкм –  $\delta\sigma=13,0$ .

Таким образом, разноразмерность частиц в потоке, образованном ультразвуковым распылением, практически не отличается от просеянного титана (при больших амплитудах) или меньше на 24% (при малых амплитудах). По сравнению с исходным порошком разноразмерность меньше в 2-3 раза.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить следующие эмпирические модели для среднего размера частиц и относительной дисперсии:

$$d_{cp} = 64,46 \cdot A^{-0,259}$$

$$\delta\sigma = 6,49 \cdot A^{0,28}$$

Следовательно, физическое моделирование позволяет качественно подтвердить теоретические модели [3,4], согласно которым увеличение амплитуды колебаний прутка приводит к уменьшению размеров диспергируемых частиц.

Тот факт, что частицы, образованные диспергированием, имеют определенную разноразмерность, в отличие от теоретических предпосылок, а также увеличение разброса размеров при увеличении амплитуды колебаний, может быть объяснено неравномерным прогревом первичной капли при моделировании, что могло привести к неодинаковым условиям диспергирования из-за различной вязкости материала. Также при увеличении амплитуды возрастает интенсивность ультразвука и, как следствие, вероятность коалесценции (слияния) образовавшихся частиц в потоке. Таким образом, в потоке могут находиться как единичные частицы, так и частицы, слившиеся из нескольких первичных. Так и образовывается увеличенный разброс размеров.

В работе исследовали первый слой покрытия, сформированного потоком частиц, образованным при диспергировании пруткового материала. В ходе распыления пруткового материала в плазменной струе скоростным потоком и при помощи ультразвука установлено следующее. При обычной схеме распыления поток расплавленных частиц образовывался только спустя 3-5 секунд после введения прутка в плазменную струю, а при воздействии ультразвука – практически сразу (не более чем через 1 с). При распылении твердого сплава эта разница была менее выраженной (соответственно 1,5-2 и 1 с). Одновременно фиксировалась визуально значительно большая плотность потока частиц при воздействии ультразвука, что позволяло предположить более интенсивное формирование покрытия. Последний факт получил подтверждение при исследовании напыленного покрытия. Если при обычной схеме напыления в течение 15 с незапыленные участки поверхности составляли 60-80%, то при напылении с воздействием ультразвука на прутки – 30-40%. При этом, если в первом случае покрытие было представлено в основном отдельными застывшими частицами и небольшими их скоплениями, то при воздействии ультразвука образуются сплошные «поля», в которых невозможно выделить отдельные частицы. Особенно это различие проявляется при малых токах дуги. Это, очевидно, связано с неполным проплавлением торца прутка и малой величиной первичной капли, которая труднораспылима струей газа, но акустическое давление воздействует достаточно интенсивно и на каплю малых размеров. Менее явно это проявляется при распылении твердого сплава, который из-за низкой теплопроводности, при исследуемом диапазоне токов и дистанций от плазмотрона до прутка, образует примерно одинаковый по характеристикам расплавленный слой. Внешний вид поверхности с нанесенным на нее покрытием представлен на рис. 3.

При распылении стали с ультразвуковым воздействием, как при больших токах дуги (рис. 3. I, в и г), так и при малых (рис.3. I, а и б), при малом (рис. 3. I, а и в) и большом (рис. 3. I, б и г) расстоянии прутка от плазмотрона образуются агломераты тарелкообразной

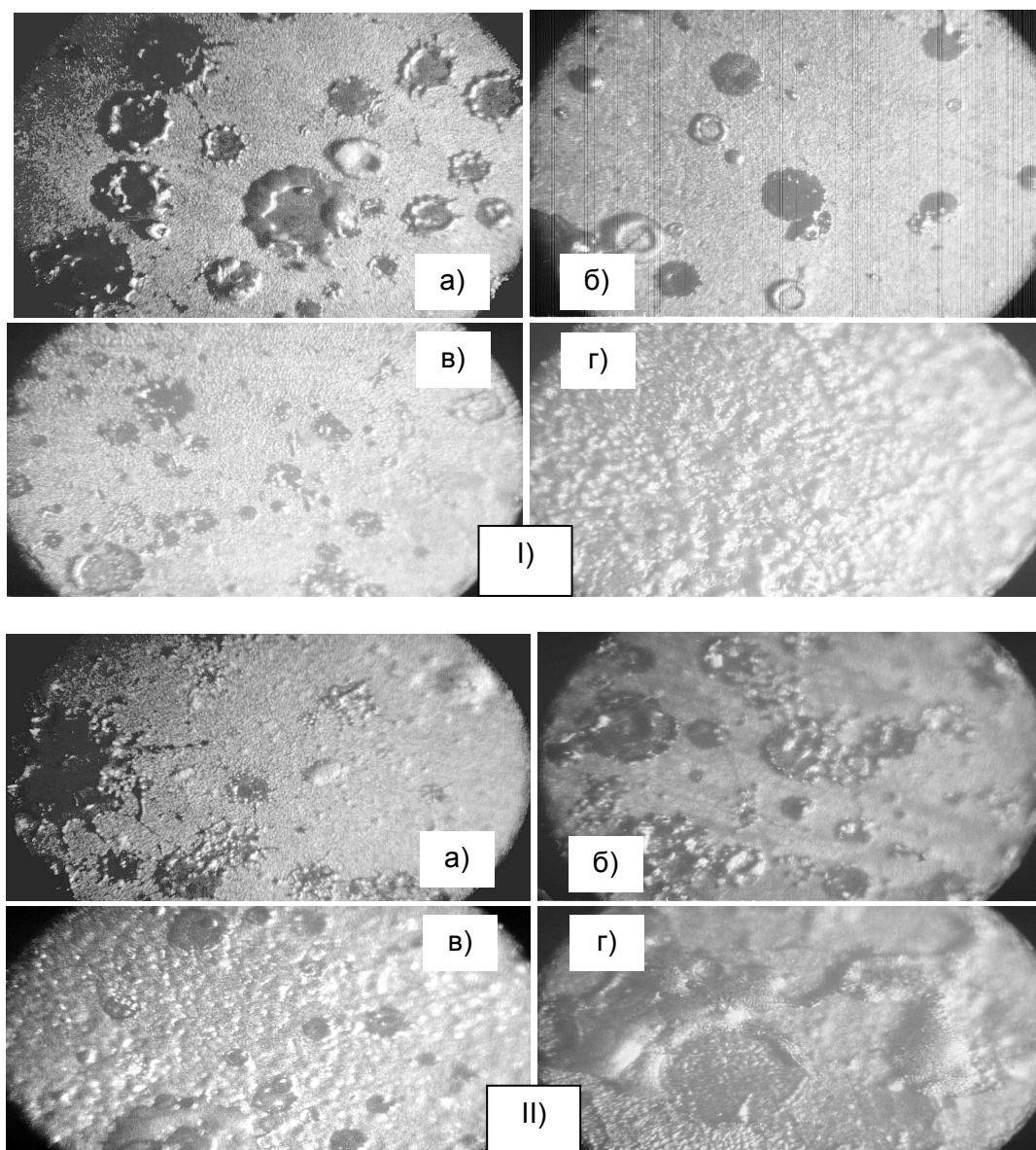
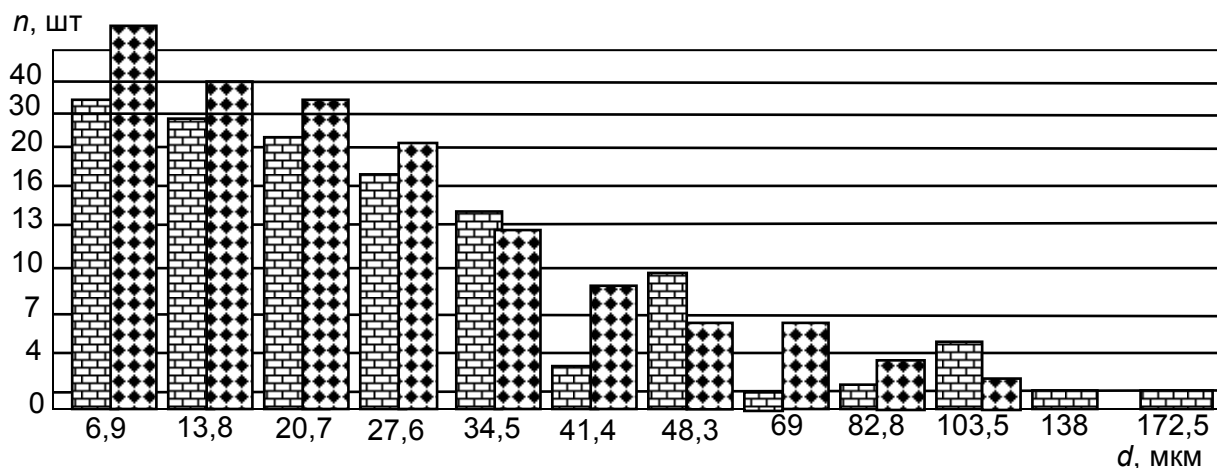


Рис. 3. I – распыление прутка стали с УЗК:  
 а –  $L=5$  мм,  $J=110$  А; б –  $L=20$  мм,  $J=110$  А;  
 в –  $L=5$  мм,  $J=280$  А; г –  $L=20$  мм,  $J=280$  А (покрытие).  
 II – распыление прутка стали без УЗК:  
 а –  $L=5$  мм,  $J=110$  А; б –  $L=20$  мм,  $J=110$  А;  
 в –  $L=5$  мм,  $J=280$  А; г –  $L=20$  мм,  $J=280$  А

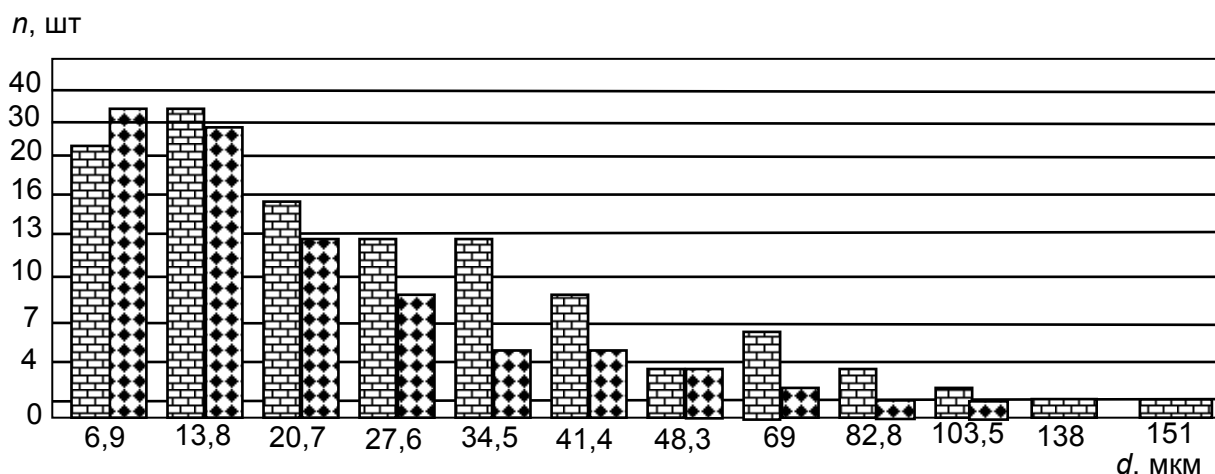
и торообразной формы практически правильной в плане (в виде окружности). Заметны отдельные частицы в виде окружностей на поверхности сплошных «полей» покрытия. При распылении прутка по обычной схеме на малых токах и больших расстояниях (рис. 3. II, б) образуются куполообразные частицы, а на малых токах и малых расстояниях (рис. 3. II, а) – частицы неправильной формы с отдельными «языками» и брызгами. По-видимому, формированию капель ультразвуковым распылением предшествует интенсивный теплообмен в первичной капле вследствие акустических потоков и кавитации, в результате чего отделяющиеся частицы являются более прогретыми, чем при обычном газоструйном распылении, даже при меньших тепловых потоках, которые имеют место при малых токах дуги и больших расстояниях. При распылении твердого

сплава агломераты имеют вид правильных плоских дисков, более тонких при больших токах и более толстых – при малых. Это может быть связано с меньшей степенью проплавления более тугоплавкого материала, что не обеспечивает условий для тарелкообразного деформирования частиц при ударе о поверхность или образования выплесков или «языков».

При распылении стальных прутков на больших токах ( $J=280-300A$ ) на малом расстоянии от плазмотрона в агломератах заметны трещины, иногда значительные по размерам, пересекающие всю поверхность агломерата. Такого явления не наблюдается при ультразвуковом диспергировании первичной капли. Вероятно, из-за перегрева частиц и интенсивного их охлаждения на поверхности детали в них возникают значительные внутренние напряжения, величина которых превышает предел прочности материала частиц. Последняя может оказаться заниженной вследствие наличия в объеме агломерата «замурованных» пузырьков газа, который был захвачен частицей в процессе образования капли и воздействия на нее плазменной струи. При ультразвуковом распылении, вследствие возможной кавитационной дегазации первичной капли, количество газа в ее объеме оказывается незначительным и материал агломерата после застывания оказывается более прочным. Результаты размерного анализа агломератов представлены на рис. 4, 5 (гистограммы распределения размеров).



а



б



– без УЗК



– с УЗК

Рис. 4. Гистограммы распределения размеров частиц при распылении прутка твердого сплава в плазме: а –  $I=110 A$ ;  $L=20$  мм;  $d_{np}=2,5$  мм; б –  $I=110 A$ ;  $L=5$  мм;  $d_{np}=2,5$  мм

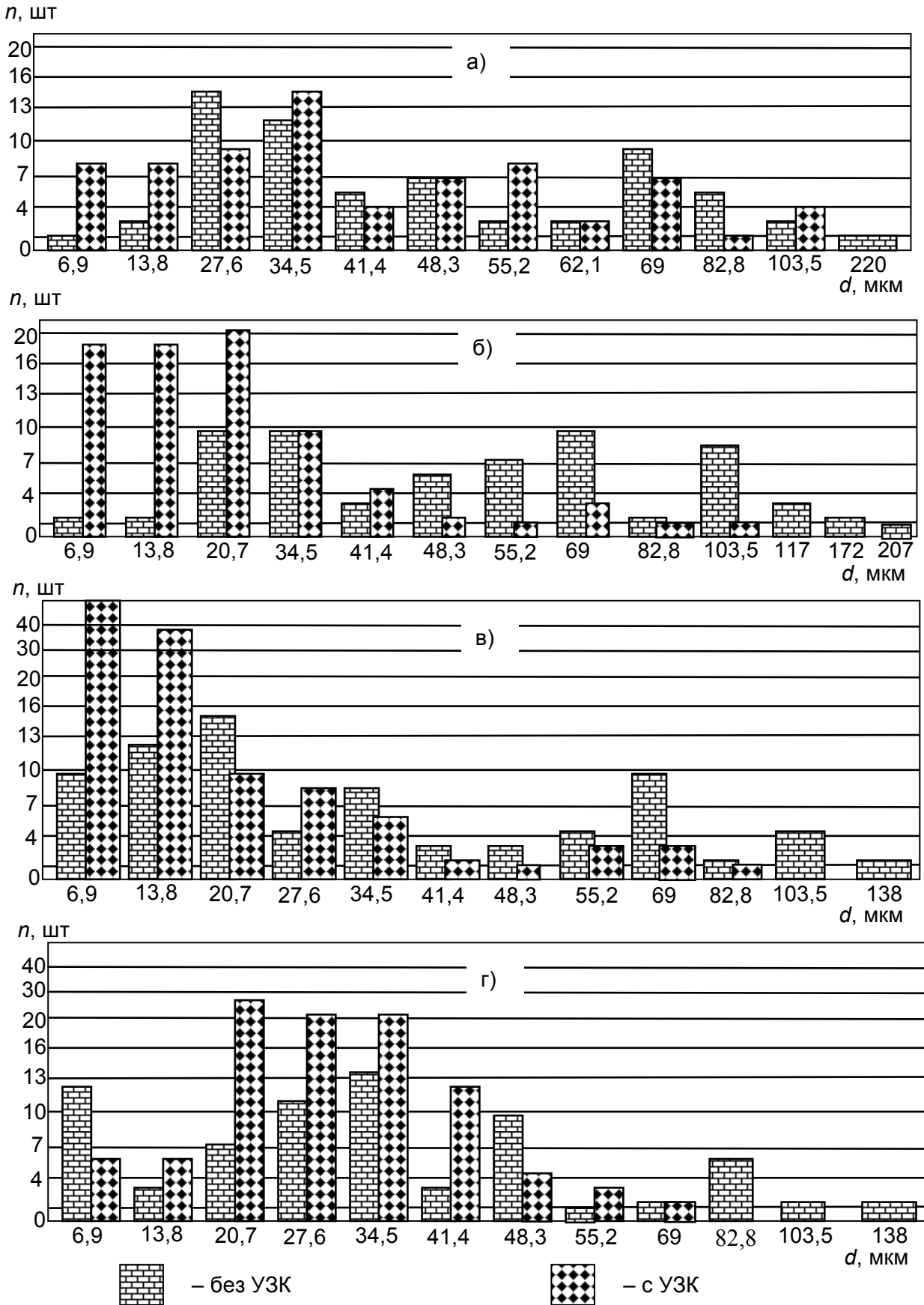


Рис. 5. Гистограммы распределения размеров частиц при распылении прутка стали в плазме: а –  $l=110$  А;  $L=5$  мм;  $d_{np}=4$  мм; б –  $l=110$  А;  $L=20$  мм;  $d_{np}=4$  мм; в –  $l=300$  А;  $L=20$  мм;  $d_{np}=4$  мм; г –  $l=300$  А;  $L=5$  мм;  $d_{np}=4$  мм

Видно, что при обычной схеме распыления, независимо от вида материала, расстояние от торца плазмотрона до прутка не является значимым фактором. Увеличение тока дуги в 2,5 раза приводит к снижению среднего размера частиц на 40-45%. Наибольшее влияние оказывают свойства распыляемого материала. Так, размер частиц твердого сплава меньше, чем стальных, в 2-2,5 раза. Относительная дисперсия при больших токах дуги в 2,5-2 раза меньше, чем при малых токах. При этом на малых токах значения относительной дисперсии не зависят от расстояния до прутка, при больших токах – меньше на 40% при больших расстояниях. При распылении твердого сплава на малых расстояниях до прутка относительная дисперсия меньше в 1,8 раза, чем на больших.

При ультразвуковом распылении описанные зависимости изменяются. Так, расстояние от плазмотрона до прутка при больших и малых токах существенно влияет на размер частиц для всех исследованных материалов. Увеличение расстояния с 5 до 20 мм при распылении стали приводит к уменьшению размера частиц в 1,8-1,7 раза. Относительная дисперсия при этом возрастает от 6% (при малых токах) до 3 раз (при больших токах). Для твердых сплавов наблюдается, напротив, снижение относительной дисперсии в 1,4 раза. Следует отметить весьма важное обстоятельство, заключающееся в уменьшении относительной дисперсии напыленных агломератов при ультразвуковом диспергировании от 2 раз при малых токах до 15 раз при больших токах для стали и от 1,6 до 4,5 раза при малых токах до 12 раз при больших токах для твердого сплава.

Тем самым подтверждаются высказанное в [3,4] теоретическое предположение и показанный при физическом моделировании факт формирования более однородного потока частиц при ультразвуковом диспергировании пруткового материала, расплавляемого струей плазмы. Значительное (на порядок) снижение дисперсии агломератов свидетельствует о возможном соответствующем повышении однородности структуры и морфологии напыляемого покрытия.

Изменение характера зависимости размеров агломератов от расстояния до плазмотрона при воздействии ультразвука связано с иным механизмом образования потока частиц. При газоструйном диспергировании для образования потока микрокапель необходимо наличие расплавленной первичной капли и определенной для гидродинамических характеристик данного расплава скорости газового потока. От размеров капли будет зависеть только количество вновь образовавшихся микрокапель. Поэтому при изменении расстояния от плазмотрона до прутка в рассматриваемом диапазоне, характеризующемся различной температурой, а значит, толщиной расплавленного слоя, но практически неизменной скоростью газового потока, изменения размеров частиц в заметных пределах не происходит.

При ультразвуковом диспергировании первичная капля дробится акустическим давлением, скорость газа не влияет на процесс диспергирования. Основными факторами, определяющими размер частиц, являются интенсивность ультразвука, которая вследствие неизменности амплитуды и частоты колебаний по условиям опытов остается постоянной, и толщина расплавленного слоя. Последняя, как показано выше, будет изменяться в зависимости от расстояния от торца плазмотрона. При этом согласно известной зависимости [4], чем меньше толщина слоя расплава, тем меньше будет диаметр микрокапель. Это и наблюдается в нашем случае, когда с увеличением расстояния от плазмотрона до прутка размер частиц уменьшается.

Сравнение влияния ультразвука на средний размер застывших агломератов при распылении металлических и твердосплавных прутков также выявило существенные различия в его характере. Так, размеры агломератов, полученных при ультразвуковом распылении прутка из стали 45, превышают твердосплавные агломераты, полученные на аналогичных режимах, не более чем на 10-12%. При обычной схеме распыления это различие составляет от 2,6 до 2,9 раз. Это может быть связано с большей температурой плавления твердого сплава, что при тех же режимах электрической дуги приводит к меньшему проплавлению и большей ди-

намической вязкости, а также большему поверхностному натяжению. Это, в свою очередь, препятствует образованию крупных капель газоструйным распылением и может быть связано со структурными особенностями твердого сплава, получаемого методами порошковой металлургии. Более тугоплавкие карбиды не успевают проплавиться и образовать первичную каплю, а более легкоплавкий кобальт-связующее разрывается скоростным потоком, и поток формируется из частиц карбидов, имеющих определенные размеры.

Энергии ультразвука достаточно для дробления как полупроплавленных карбидов (их жидких оболочек), так и связующего металла.

С другой стороны, различие в размерах агломератов, полученных по обычной схеме распыления и с воздействием ультразвука, составляет для стали 3,2 раза при больших токах и от 1,6 до 3,6 раза при малых токах в зависимости от расстояния. Для твердого сплава это различие составляет 1,6 раза при больших токах и 1,4 раза при малых токах независимо от расстояния. По всей видимости, такой результат объясним также различным механизмом распыления. При газоструйном распылении определяющими, помимо скоростных характеристик газового потока, являются физико-механические свойства материала, а именно: плотность и динамическая вязкость, которые существенно выше у твердого сплава, чем у стали. Поэтому и размер исходных микрокапель и застывших агломератов твердого сплава существенно меньше, чем стальных.

При ультразвуковом распылении плотность материала влияет на размер капель существенно меньше, а определяющим фактором является интенсивность ультразвука, зависящая от амплитуды и частоты. Причем зависимость от амплитуды является квадратичной, что и оказывает ее определяющее влияние на размер продуктов диспергирования. Поэтому размеры агломератов, полученных как при распылении стали, так и твердого сплава, – относительно близки. Отсюда следует важный для практики вывод, заключающийся в практической независимости размеров агломератов при ультразвуковом распылении от свойств напыляемого материала. Следовательно, возможно без перестройки системы формировать требуемую структуру покрытий из различных материалов.

### Выводы

1. Ультразвуковое распыление пруткового материала позволяет получать в потоке плазмы частицы, близкие по своим размерам и свойствам, то есть следует ожидать более однородной структуры и морфологии покрытия.
2. Размеры агломератов при ультразвуковом распылении практически не зависят от свойств напыляемого материала. Следовательно, возможно формировать заданную структуру покрытий из различных материалов, не меняя всю систему.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алимов А.П. Газодинамическое напыление. Состояние и перспективы // Пленки и покрытия – 98: Сб. статей. СПб., 1998. С.20-25.
2. Лясников В.Н. Комплексные исследования функциональных плазменных покрытий, разработка оборудования, технологии и внедрения их в серийное производство ЭВП: Дис... докт. техн. наук. М., 1987. 345 с.
3. Бекренев Н.В., Трофимов Д.В. Управление дисперсностью потока напыляемых частиц воздействием ультразвукового поля // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С.8-12.
4. Трофимов Д.В. Модель формирования размера напыляемых частиц воздействием ультразвукового поля в потоке // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С.209-212.

5. Трофимов Д.В. Исследование однородности напыляемых частиц, формируемых скоростным потоком газа и ультразвуковым полем, на основе физического моделирования // Тез. докл. конф. «ЗМНТК – 2003». Ульяновск: УлГТУ, 2003. С.61-62.

**Бекренев Николай Валерьевич –**

доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки» Саратовского государственного технического университета

**Лясникова Александра Владимировна –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки» Саратовского государственного технического университета

**Трофимов Дмитрий Викторович –**

аспирант кафедры «Материаловедение и высокоэффективные процессы обработки» Саратовского государственного технического университета

УДК 621.75

**О.Ю. Давиденко, М.К. Решетников**

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКА  
В ПРОЦЕССЕ ИХ СОВМЕСТНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ ДОРАБОТКИ**

*Предложено направление совершенствования технологических методов изготовления рабочих поверхностей прецизионных деталей на основе создания имитационных технологий. Исследован механизм отделения металла в процессе совместной имитационной доработки деталей подшипников качения, выявлены закономерности формирования геометрических параметров дорабатываемых поверхностей.*

**O.Yu. Davidenko, M.K. Reshetnikov**

**THE FORMATION OF WORKING SURFACES OF BEARING DETAILS  
IN THE PROCESS OF THEIR JOINT IMITATING FINISHING**

*The direction of improvement in technological methods concerning production of precision details working surfaces on the basis of creation of the imitating technology is offered. The process in metal separation in joint imitating finishing of rocking bearing details was investigated, and the regularities of forming geometrical parameters of finished surfaces were discovered.*

**Сущность предложенных технических решений**

Как показывает практика, в каждом конкретном рабочем узле в силу действия большого количества случайных факторов формируется трудно учитываемый комплекс условий,



приводящий в процессе приработки подшипника к формированию макро- и микрогеометрических параметров рабочих поверхностей, оптимальных только для данного комплекса контактных условий. Это создает значительные трудности при выполнении теоретических расчетов, связанных с поиском рациональных параметров геометрической формы профиля рабочих поверхностей деталей подшипника.

Так, например, после начального периода эксплуатации роликовых подшипников рабочие поверхности колец и роликов приобретают выпуклую форму, торцы роликов становятся закругленными, а поверхности направляющих бортов – «разваленными» или смятыми. В подшипнике, таким образом, происходит нежелательная и опасная эксплуатационная доводка роликов и дорожек качения до нужной геометрической формы. Очевидно, именно такую форму деталям подшипника необходимо придавать на заключительной стадии технологического процесса их изготовления.

В настоящее время отечественными и зарубежными учеными теоретически разработано большое количество различных конструкций профилей, представляющих собой дугу окружности, сочетание дуг окружностей переменного радиуса с отрезками прямых линий, эллиптические, параболические, логарифмические кривые и т.д. Все эти конструкторские решения, по мнению их авторов, достаточно эффективны, но, на наш взгляд, они не исчерпывают всех резервов повышения работоспособности узлов трения путем оптимизации формы профиля контактирующих поверхностей деталей. Кроме того, весьма трудоемко их изготовление, в силу чего предлагаемые конструкции не находят практического использования в промышленности. До сих пор остается неясным, какая же форма профиля деталей подшипника является оптимальной и какими технологическими методами она должна достигаться.

Идея создания имитационных технологий и технологических методов формообразования состоит в том, что в процессе обработки заготовке и инструменту сообщается комплекс движений, который соответствует движениям деталей подвижного сопряжения в реальном рабочем узле с учетом конкретных эксплуатационных условий. Такой подход позволяет решить задачу индивидуального рационального формообразования рабочих поверхностей деталей подвижных сопряжений на практическом уровне, без выполнения трудоемких расчетов.

Одной из важнейших задач, стоящих перед конструкторами и технологами подшипникового производства, является создание таких конструкций роликоподшипников, которые обеспечивали бы предотвращение возникновения в процессе их эксплуатации критических напряжений на рабочих поверхностях деталей, а также повышение эксплуатационных свойств и долговечности опор.

Наиболее точное формообразование обеспечивает предложенная авторами имитационная технология ускоренной приработки деталей подшипника в собранном виде [1]. Приработка осуществляется в абразивной среде, при этом детали подшипника сообкатывают друг друга, находясь в весьма неблагоприятных условиях повышенных скоростей проскальзывания. Это обеспечивает ускоренное получение рациональной внутренней геометрии подшипника, пригодной для его эффективной работы в самом широком диапазоне условий эксплуатации.

В предлагаемом техническом решении указанная задача решается тем, что подшипник помещают в абразивную среду, создают перекося наружного кольца относительно внутреннего и придают обоим кольцам вращение с углом перекося колец, равным максимально возможной величине их перекося в процессе эксплуатации. При этом вращение наружного кольца осуществляют вокруг его наклоненной в результате перекося оси. Фрагмент предложенного устройства для осуществления способа представлен на рис. 1.

Оно содержит рабочий вал, расположенный в корпусе на двух опорах. Указанные опоры состоят из прикатываемого подшипника, установленного в технологический подшипник, который запрессован в корпус. Монтажные поверхности корпуса выполнены с осями, пересекающимися в плоскости симметрии последнего, а рабочий вал смонтирован внутри

полого вала, имеющего клиновой ручей. Полый вал установлен в корпусе на двух соосных подшипниковых опорах и взаимодействует своими шлицевыми торцами со шлицевыми торцами внутренних колец технологических подшипников.

Существенными признаками предлагаемого технического решения, которые отличают его от известных аналогов и обуславливают новизну, являются следующие:

1. Угол перекоса наружного кольца относительно внутреннего равен максимально возможному углу перекоса, возникающему в реальных условиях эксплуатации подшипников.

2. Вращение наружного кольца обрабатываемого подшипника вокруг собственной оси, наклоненной по отношению к оси вращения наружного кольца.

3. Монтажные поверхности корпуса, предназначенные для установки технологических подшипников, выполнены таким образом, что их оси пересекаются в плоскости симметрии корпуса.

4. Рабочий вал расположен внутри полого вала с клиновым ручьем, установленного на соосных подшипниковых опорах в корпусе и взаимодействующего своими шлицевыми торцами со шлицевыми торцами внутреннего кольца технологического подшипника.

5. Создание рабочего давления только за счет перекоса колец обрабатываемого подшипника без применения дополнительных механизмов нагружения.

Совокупность указанных признаков обеспечивает достижение следующего положительного эффекта:

1. Обеспечивается получение на рабочих поверхностях деталей обрабатываемых подшипников профиля с оптимальной геометрической формой, что способствует снижению уровня максимальных контактных напряжений и благоприятному их распределению по площадке контакта в процессе эксплуатации подшипников [2].

Угол перекоса колец, равный максимально возможному, обеспечивает в процессе приработки такую геометрическую форму дорожек и тел качения, которая позволяет подшипнику надежно и без возникновения критических напряжений работать в самом широком диапазоне условий эксплуатации, при различных углах перекоса колец, неизбежно возникающего при монтаже подшипников в узлы.

Для обеспечения в процессе обработки заданного перекоса наружного кольца обрабатываемого подшипника относительно внутреннего посадочные поверхности корпуса, предназначенные для установки технологических подшипников корпуса, выполнены не соосно, а с наклоном, так, что их оси пересекаются в плоскости симметрии корпуса. Это обеспечивает одинаковые условия одновременной обкатки двух подшипников, а также симметричность получаемого профиля рабочих поверхностей их деталей.

Наличие технологических подшипников и полого вала, установленного соосно с рабочим валом и взаимодействующего в процессе вращения своими шлицевыми торцами с аналогичными торцами внутренних колец технологических подшипников, дает возможность осуществить вращение внутренних колец технологических подшипников, а вместе с ними и наружных колец обкатываемых подшипников вокруг наклонной оси, что обеспечивает обработку дорожки качения наружных колец по всей поверхности. Если не обеспечивать вращение наружных колец вокруг наклонной оси, то формирование профиля будет осуществляться только на рабочих поверхностях внутренних колец и роликов, а дорожки качения наружных колец не будут равномерно обрабатываться.

Отсутствие в предлагаемом устройстве специального механизма для создания рабочего давления значительно упрощает его конструкцию и повышает точность обработки за счет исключения звеньев, являющихся дополнительными источниками вибраций и других нежелательных явлений. А повышение точности обкатки способствует увеличению долговечности подшипника.

2. При обработке роликовых подшипников, наиболее чувствительных к монтажным перекосам, происходит формирование профиля не только рабочих поверхностей дорожек и тел качения, но и профиля поверхностей направляющих бортов и торцов роликов, а это создает более благоприятные условия работы подшипника в узле, снижает опасность разрушения бортов и уменьшает энергетические потери при эксплуатации.

Предложенный способ осуществляется следующим образом.

Обкатываемые подшипники 2 (см. рис. 1), смонтированные на рабочем валу 1, устанавливают в отверстия внутренних колец 12 технологических подшипников 3 и фиксируют в требуемом положении гайкой 13. Вал 1 вместе с внутренними кольцами 14 прикатываемых подшипников 2 придают вращение вокруг оси 15 с частотой  $n_n$ . Посредством клинового ремня 16, помещенного в клиновой ручей 9, сообщают вращение полному валу 7 с частотой  $n_n$  вокруг оси 15, который с помощью шлицов на своих торцах 10 и торцах 11 внутренних колец 12 технологических подшипников 3 передает вращение внутренним кольцам 12 технологических подшипников 3, вместе с которыми за счет сил трения, возникающих на поверхностях контакта, начинают вращаться наружные кольца 17 прикатываемых подшипников 2. В результате того, что наружные кольца 18 технологических подшипников 3 установлены в корпусе 4 с наклоном и остаются в процессе работы неподвижными, их внутренние кольца 12, а значит и наружные кольца 17 прикатываемых подшипников 2 будут вращаться вокруг осей 5 в плоскости 19 перекоса. При этом ролик 20, двигаясь вдоль дорожек качения, в результате перекоса колец 17 будет совершать качательные движения вокруг точки О. За один полный оборот ролик 20 сделает одно качание. В процессе своего движения каждый ролик 20, попадая в плоскость расположения осей 5, 15 (плоскость чертежа) и находясь в верхнем положении, будет контактировать крайними точками правой части своей рабочей поверхности 21 с крайними точками правой части рабочих поверхностей 22, 23 наружного 17 и внутреннего 14 колец. В этом положении удельное давление на контактной площадке очень высоко и достигает максимального значения. По мере качения ролика 20 площадки контакта его рабочей поверхности 21 и поверхностей дорожек качения 22, 23 наружного 17 и внутреннего 14 колец будут смещаться к центру с одновременным уменьшением давления в зонах контакта. При попадании ролика 20 в плоскость, перпендикулярную плоскости расположения осей 5, 15 (плоскость, перпендикулярную плоскости чертежа), он будет контактировать точками средней части своей рабочей поверхности 21 с точками середины рабочих поверхностей 22, 23 наружного 17 и внутреннего 14 колец. Удельное давление в зонах контакта снизится до минимального значения. По мере дальнейшего движения ролика 20 его площадка контакта будет перемещаться от центра рабочей поверхности 21 к ее левому краю с одновременным возрастанием удельного давления на ней. При прохождении роликом 20 плоскости расположения осей 5, 15 (плоскость чертежа) в нижней части подшипника 2 ролик 20 будет контактировать крайними точками левой части своей рабочей поверхности 21 с крайними точками левой части поверхностей 22, 23 роликовых дорожек наружного 17 и внутреннего 14 колец. Далее полуцикл повторяется.

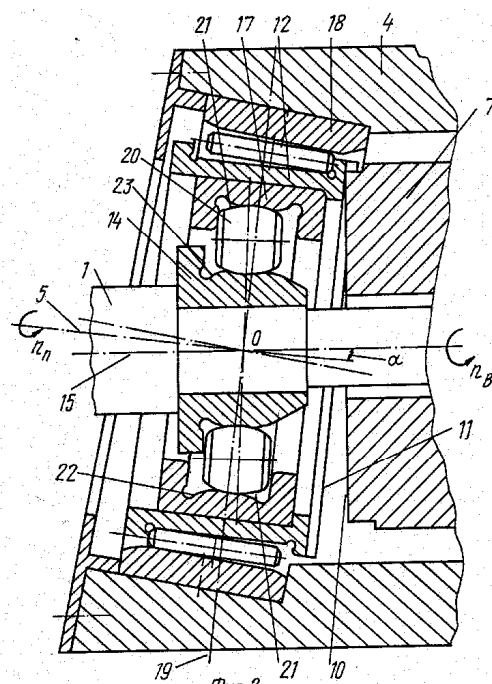


Рис. 1. Фрагмент сборочного чертежа устройства

В результате принудительного вращения наружного 17 и внутреннего 14 колец обрабатываемых подшипников 2 все точки рабочих поверхностей 21, 22, 23 их деталей будут периодически находиться во всех описанных положениях, произойдет обкатывание роликами 20 дорожек качения 22, 23 с проскальзыванием и переменным давлением вдоль образующих роликов 20 и роликовых дорожек 22, 23. В местах наибольшего удельного давления будет обеспечиваться максимальный износ контактных поверхностей, по мере уменьшения удельного давления износ также будет уменьшаться.

Наличие абразивной среды в зоне контакта будет способствовать интенсификации процесса. В конце обработки в результате образования выпуклого профиля на дорожках 22,23 и тела качения 20 ролики 20 будут обкатывать дорожки качения 22, 23 с равномерным удельным давлением во всех точках профиля.

Таким образом, в условиях такой обкатки на рабочих поверхностях 21 роликов 20 и дорожек качения 22, 23 естественным путем формируется рациональный профиль, пригодный для работы подшипников 2 в условиях неизбежных перекосов их колец 14, 17.

Использование предложенного способа приработки подшипников в собранном виде позволяет столь простым методом получать оптимальные параметры рабочих поверхностей деталей роликовых или шариковых подшипников, что значительно увеличит их надежность и долговечность, а значит и работоспособность огромного количества механизмов, машин и приборов.

С целью оптимизации режимов и времени приработки необходимо исследовать закономерности контакта прирабатываемых поверхностей в процессе их сообкатывания друг другом.

### Кинематика абразивной частицы в зазоре сопряжения

При осуществлении формообразующей доработки подшипников в собранном виде наружному и внутреннему кольцам придают вращение с частотами соответственно  $n_n$  и  $n_o$  (рис. 2). Будем считать вращение положительным, если оно направлено по часовой стрелке, и отрицательным, если оно направлено против часовой стрелки.

При этом ролики получают вращение вокруг собственной оси  $O_1$  с частотой  $n_p$  и одновременно их центры вращаются вокруг оси подшипника  $O$  с частотой  $n_o$ .

Абразивные частицы, находящиеся в смазке, попадают в зазор сопряженных поверхностей колец и роликов, внедряются в эти поверхности и в результате наличия проскальзывания отделяют или деформируют некоторые объемы материала. При этом частицы, имеющие размер

$$a_{\max} > \delta^1 + R_{\max},$$

где  $\delta^1$  – толщина смазывающей пленки;  $R_{\max}$  – максимальная высота микронеровностей сопрягаемых поверхностей, при прохождении зоны контакта дробятся.

Для оценки суммарного объема удаляемого в процессе формообразующей приработки металла рассмотрим последовательно две системы, состоящие из трех взаимодействующих элементов. Первая система: рабочая поверхность внутреннего кольца – абразивная частица – рабочая поверхность ролика; вторая система: рабочая поверхность ролика – абразивная

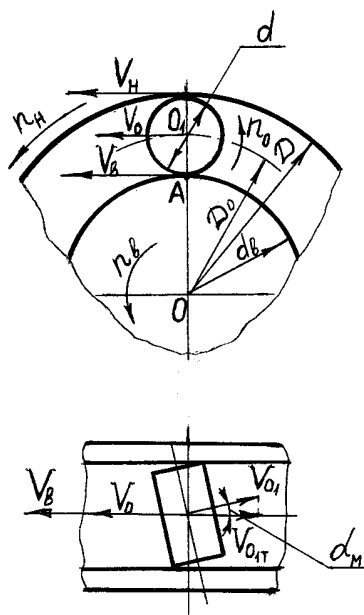


Рис. 2. Схема контакта деталей роликоподшипника при формообразующей приработке в собранном виде

частица – рабочая поверхность наружного кольца.

Рассмотрим первую систему взаимодействующих элементов. Так как абразивная частица может закрепляться на одной из взаимодействующих поверхностей и двигаться вместе с ней до момента дробления или попеременно закрепляться на взаимодействующих поверхностях, воспользуемся вероятностным представлением скорости абразивной частицы, предложенным в работе [3]. Скорость частицы в этих случаях можно представить в виде линейной комбинации скоростей рабочих поверхностей внутреннего кольца и ролика:

$$V_3 = \beta V_6 + \gamma V_p, \quad \text{при } \beta + \gamma = 1, \quad (1)$$

где  $\beta$ ,  $\gamma$  – вероятности закрепления абразивной частицы на рабочих поверхностях, соответственно, внутреннего кольца и ролика;  $V_6$ ,  $V_p$  – линейные скорости точек рабочих поверхностей, соответственно, внутреннего кольца и ролика.

Средние значения вероятностей  $\beta$  и  $\gamma$ , как следует из работы [3], можно принять обратно пропорциональными твердости сопрягаемых поверхностей внутреннего кольца и ролика:

$$\beta = \frac{H_p}{H_6 + H_p}; \quad \gamma = \frac{H_6}{H_6 + H_p}, \quad (2)$$

где  $H_6$ ,  $H_p$  – твердости по Бринеллю рабочих поверхностей, соответственно внутреннего кольца и ролика.

$$V_p = V_o - V_{o1} \cos \alpha_m, \quad (3)$$

где  $V_o$  – линейная скорость вращения центра  $O_1$  ролика;  $V_{o1}$  – осевая составляющая линейной скорости вращения ролика вокруг собственной оси;  $\alpha_m$  – угол контакта рабочих поверхностей ролика и внутреннего кольца.

Учитывая выражения (1) и (3), получим

$$V_3 = \beta V_6 - \gamma (V_o - V_{o1} \cos \alpha_m). \quad (4)$$

Из работы [3] известно, что путь, пройденный абразивной частицей в зазоре сопряжения двух цилиндров, можно определить из следующего выражения:

$$l_3 = \sqrt{\frac{\rho^*}{R}} \frac{a_6}{H_p} (H_6 + H_p) = \sqrt{\frac{\rho^*}{R}} \frac{a_p}{H_6} (H_6 + H_p), \quad (5)$$

где  $\rho^* = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ ;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  – радиусы кривизны взаимодействующих поверхностей;  $a_6$ ,  $a_p$  –

глубина внедрения абразивной частицы в рабочие поверхности, соответственно, внутреннего кольца и ролика;  $R$  – условный объемный радиус абразивной частицы.

С учетом выражений (4) и (5) определим время контакта  $\tau_k$  абразивной частицы с сопряженными поверхностями до момента ее дробления:

$$\begin{aligned} \tau_k &= \frac{l_3}{V_3} = \sqrt{\frac{\rho^*}{R}} \frac{a_6 (H_6 + H_p)}{H_p [\beta V_6 + \gamma (V_o - V_{o1} \cos \alpha_m)]} = \\ &= \sqrt{\frac{\rho^*}{R}} \frac{a_6 (H_6 + H_p)}{H_6 [\beta V_6 + \gamma (V_o - V_{o1} \cos \alpha_m)]}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для исследования механизма отделения металла с обрабатываемой поверхности необходимо знать размеры царапины, оставленной абразивной частицей на поверхности обработки. Длина  $L$  царапины зависит от скорости  $V_{3o}$  относительного перемещения частицы и времени  $\tau_k$  этого перемещения:

$$L = V_{3o} \tau_k. \quad (7)$$

Скорость относительного перемещения частицы по одной из сопряженных поверхностей определится, исходя из разницы линейных скоростей движения каждой поверхности. Тогда, с учетом выражения (2), скорость  $V_{зв}$  относительного перемещения абразивной частицы по рабочей поверхности внутреннего кольца будет равна

$$V_{зв} = \gamma (V_p - V_в) = \frac{H_в}{H_в + H_p} (V_о - V_{о1} \cos \alpha_m - V_в) ,$$

а относительная скорость перемещения абразивной частицы по поверхности ролика определится из следующего выражения:

$$V_{зр} = \beta (V_в - V_p) = \frac{H_p}{H_в + H_p} (V_в - V_о + V_{о1} \cos \alpha_m) . \quad (8)$$

Используя выражения (6) и (8), определим длины царапин  $L_{зв}$  и  $L_{зр}$ , оставленные абразивной частицей на рабочих поверхностях, соответственно, внутреннего кольца и ролика:

$$L_{зв} = V_{зв} \tau_k = \frac{(V_о - V_{о1} \cos \alpha_m - V_в) a_в H_в}{H_p (V_в + V_о - V_{о1} \cos \alpha_m)} \sqrt{\frac{\rho^*}{R}} ,$$

$$L_{зр} = V_{зр} \tau_k = \frac{(V_в - V_о + V_{о1} \cos \alpha_m) a_p H_p}{H_в (V_в + V_о - V_{о1} \cos \alpha_m)} \sqrt{\frac{\rho^*}{R}} . \quad (9)$$

Зная параметры царапины, оставленной абразивной частицей на обрабатываемой поверхности, можно определить объем металла, удаляемый этой частицей в процессе обработки.

### Механизм отделения металла с поверхностей сопряженных деталей

Двигаясь в зазоре сопряжения, абразивная частица все глубже внедряется в поверхность сопрягаемых деталей, деформируя некоторый микрообъем их материалов. При этом, в зависимости от условий взаимодействия абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью, будет наблюдаться либо микрорезание, либо пластическая деформация, либо упругая деформация материала. Критерием появления этих деформаций, как отмечают многие исследователи, можно считать величину отношения  $\frac{a}{R}$ . В этом отношении символом  $a$  обозначена

глубина внедрения абразивной частицы в обрабатываемую поверхность, а символом  $R$  – условный объемный радиус абразивной частицы. Так, например, при переходе от пластического передеформирования к микрорезанию для несмазанных стальных деталей критерий

$\frac{a}{R} = 0,1$ , а для смазанных –  $\frac{a}{R} = 0,3$  [4]. Упругие деформации стальных деталей переходят в пластические при  $\frac{a}{R} = 10^{-2}$ .

Очевидно, что вид воздействия абразивной частицы на материал определяется геометрической формой ее деформирующей части, а также ее механическими свойствами. Чем острее и прочнее абразивная частица, тем выше вероятность того, что деформированный ею микрообъем будет содержать область упругого деформирования, пластического передеформирования и микрорезания.

Таким образом, в зависимости от задач, которые необходимо решить в процессе формообразующей приработки подшипников в собранном виде, можно подобрать такой вид абразивного или алмазного материала и создать такие условия обработки, при которых будет реализовываться нужный вид деформирования материала деталей подшипника единичным зерном.

Очевидно, для повышения производительности приработки необходимо использовать такую абразивную среду, которая обеспечивала бы взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью в режиме микрорезания.

Рассмотрим механизм удаления металла с поверхностей деталей подшипника в процессе его формообразующей приработки в собранном виде в абразивной среде, когда имеет место микрорезание. На начальной стадии исследования проанализируем закономерности контакта рабочей поверхности внутреннего кольца и ролика.

Объем стружки  $W_{зб}$ , срезаемый абразивной частицей с поверхности обработки, равен

$$W_{зб} = L_{зб} S_{ср} , \quad (10)$$

где  $L_{зб}$  – длина царапины, оставленной абразивной частицей на обрабатываемой поверхности;  $S_{ср}$  – площадь поперечного сечения царапины.

Если принять сферическую модель абразивной частицы, когда среднее значение контактирующих радиусов равно объемному радиусу, то, как следует из работы [3], площадь среза единичным зерном равна

$$S_{ср} = a_{\epsilon}^{1,5} \sqrt{2R} . \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в равенство (10), получим

$$W_{зб} = L_{зб} a_{\epsilon}^{1,5} \sqrt{2R} . \quad (12)$$

Раскрывая значение  $L_{зб}$ , используя выражение (9), равенство (12) запишем в следующем виде:

$$W_{зб} = \frac{(V_o - V_{o1} \cos \alpha_m - V_{\epsilon}) a_{\epsilon}^{2,5} H_{\epsilon}}{H_p (V_{\epsilon} + V_o - V_{o1} \cos \alpha_m)} \sqrt{2\rho^*} . \quad (13)$$

Обозначим

$$V_{скв} = \frac{(V_o - V_{o1} \cos \alpha_m - V_{\epsilon})}{(V_{\epsilon} + V_o - V_{o1} \cos \alpha_m)} , \quad (14)$$

тогда выражение (13) примет следующий вид:

$$W_{зб} = \frac{V_{скв} a_{\epsilon}^{2,5} H_{\epsilon}}{H_p} \sqrt{2\rho^*} . \quad (15)$$

В работе [3] получена зависимость, связывающая механические свойства абразивной частицы и обрабатываемого материала с геометрическими параметрами частицы и царапины, оставленной ею на обрабатываемой поверхности:

$$\frac{a_i}{R} = \frac{\sigma}{2H} , \quad (16)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение сжатия абразивной частицы (разрушающая нагрузка, деленная на площадь ее максимального сечения);  $H$  – твердость по Бринеллю обрабатываемого материала.

Используя условие (16), выразим объем металла, срезаемый отдельной абразивной частицей, через безразмерную характеристику  $\frac{\sigma}{2H}$ .

$$W_{зб} = \frac{V_{скв} \sigma^{2,2} a_{\epsilon}^{0,3} R^{2,2}}{2^{2,2} H_p H_{\epsilon}^{1,2}} \sqrt{2\rho^*} . \quad (17)$$

Расположение вершин абразивных частиц, попавших в зазор сопряжения, можно описать степенной зависимостью, предложенной в работах профессора А.В. Королева:

$$z_i = 0,5 z_o \left( \frac{h_i}{H_o} \right)^{\kappa}, \quad (18)$$

где  $z_i$  – число частиц на единице рабочей поверхности, расположенных на расстоянии  $h_i$  от вершины наиболее выступающей частицы;  $z_o$  – общее число абразивных частиц на единице рабочей поверхности;  $\kappa$  – показатель степени расположения абразивных частиц;  $H_o$  – разность высот активных абразивных частиц.

Глубина внедрения абразивной частицы в обрабатываемую поверхность зависит от ее положения в зазоре сопряжения и от шероховатости поверхности в зоне обработки:

$$a_i = R_{\max} - h_i, \quad (19)$$

где  $R_{\max}$  – максимальная высота микронеровностей сопрягаемых поверхностей.

С учетом выражения (18) зависимость (19) примет следующий вид:

$$a_i = R_{\max} - H_o \left( \frac{z_i}{0,5 z_o} \right)^{\frac{1}{\kappa}}. \quad (20)$$

Подставляя выражение (20) в равенство (17), получим

$$W_{зв} = \frac{V_{скв} \sigma^{2,2} R^{2,2} \sqrt{2\rho^*} R_{\max}^{0,3}}{2^{2,2} H_e^{1,2} H_p} \left[ 1 - \frac{H_o}{R_{\max}} \left( \frac{z_i}{0,5 z_o} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]^{0,3}. \quad (21)$$

Втягиваясь в зазор между сопряженными поверхностями, абразивная частица все глубже внедряется в обрабатываемые поверхности и, достигая определенной глубины внедрения, может дробиться на большое число осколков. В процессе обработки происходит множество повторных дроблений, пока размер частицы не станет меньшим, чем  $\delta^* + R_{\max}$ . Имея такой размер, частицы свободно проходят зону контакта взаимодействующих тел. Учесть дробление при расчете суммарного съема, производимого частицей и ее осколками, позволяет коэффициент дробления  $\kappa_{др}$ , вводимый в выражение для определения объема отделяемого металла:

$$W_{зв\Sigma} = \kappa_{др} W_{зв}. \quad (22)$$

Значение этого коэффициента на основе вероятностного представления определено в работе [3], где дробление рассмотрено как случайный ветвящийся процесс. В этой же работе отмечается, что хотя коэффициент дробления будет изменяться в зависимости от твердости сопрягаемых поверхностей, механических свойств и геометрической формы абразивных частиц, но для инженерных расчетов съема припуска единичным зерном его можно принять равным 7. Исходя из этого, выражение (22) с учетом равенства (21) запишется в следующем виде:

$$W_{зв\Sigma} = \frac{2,1 V_{скв} \sigma^{2,2} R^{2,2} \sqrt{\rho^*} R_{\max}^{0,3}}{H_e^{1,2} H_p} \left[ 1 - \frac{H_o}{R_{\max}} \left( \frac{z_i}{0,5 z_o} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]^{0,3}. \quad (23)$$

Выражение (23) позволяет определить объем металла, удаляемый всеми абразивными частицами, расположенными на обрабатываемой поверхности с учетом их дробления:

$$W_e = \frac{2,1 V_{скв} \sigma^{2,2} R^{2,2} S_{об} \sqrt{\rho^*} R_{\max}^{0,3}}{H_e^{1,2} H_p} \int_0^{z_s} \left[ 1 - \frac{H_o}{R_{\max}} \left( \frac{z_i}{0,5 z_o} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]^{0,3} d z_i, \quad (24)$$



где  $S_{об}$  – площадь обрабатываемой поверхности, на которую воздействуют абразивные частицы;  $z_s$  – общее число режущих абразивных зерен на единице обрабатываемой поверхности.

С учетом выражения (18) определим

$$z_s = 0,5 z_o \left( \frac{R_{\max}}{H_o} \right)^\kappa . \quad (25)$$

Обозначим

$$x = \frac{H_o}{R_{\max}} \left( \frac{z_i}{0,5 z_o} \right)^{\frac{1}{\kappa}} . \quad (26)$$

Преобразуем равенство (26), используя выражение (25):

$$x = \left( \frac{z_i}{z_o} \right)^{\frac{1}{\kappa}} , \quad (27)$$

тогда

$$\begin{aligned} z_i &= z_s x^\kappa , \\ d z_i &= z_s x^{\kappa-1} d x . \end{aligned} \quad (28)$$

Преобразуем выражение (24), используя обозначения (27) и (28):

$$W_\epsilon = \frac{2,1 V_{\text{скв}} \sigma^{2,2} R^{2,2} S_{об} \sqrt{\rho^*} R_{\max}^{0,3} \kappa z_s}{H_\epsilon^{1,2} H_p} \int_0^1 x^{\kappa-1} (1-x)^{0,3} d x . \quad (29)$$

Интеграл в правой части равенства (29) представляет собой интеграл Эйлера и выражается через гамма-функцию. После преобразования выражения (29) получим

$$W_\epsilon = \frac{2,1 V_{\text{скв}} \sigma^{2,2} R^{2,2} S_{об} \sqrt{\rho^*} R_{\max}^{0,3} \kappa z_s \Gamma(\kappa) \Gamma(1,3)}{H_\epsilon^{1,2} H_p \Gamma(\kappa+1,3)} . \quad (30)$$

В работе [3] определено количество зерен  $z_s$ , попадающих на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности детали с учетом их объемной концентрации в смазке при среднем коэффициенте заполнения объема, равном 2:

$$z_s = 1,16 \times 10^{-2} \frac{\epsilon^{2/3}}{R^2} , \quad (31)$$

где  $\epsilon$  – объемная концентрация абразивных частиц в абразивной среде.

Площадь обрабатываемой поверхности  $S_{об}$ , подвергшейся воздействию со стороны абразивных зерен, можно определить из следующего выражения:

$$S_{об} = 2 \pi r l n_\epsilon \tau , \quad (32)$$

где  $r$  – радиус обрабатываемой поверхности;  $l$  – длина образующей обрабатываемой поверхности;  $n_\epsilon$  – частота вращения обрабатываемой поверхности;  $\tau$  – время обработки.

Подставляя выражения (32) и (31) в равенство (30), получим

$$W_\epsilon = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} V_{\text{скв}} \sigma^{2,2} R^{0,2} \sqrt{\rho^*} R_{\max}^{0,3} \epsilon^{2/3} 2 \pi r \ln_\epsilon \tau \kappa \Gamma(\kappa)}{H_\epsilon^{1,2} H_p \Gamma(\kappa+1,3)} . \quad (33)$$

За время обработки  $\tau$  обрабатываемая поверхность сделает множество оборотов вокруг своей оси с частотой  $n_\epsilon$ , поэтому площадь поверхности  $S_{об}$ , подвергшейся за это время воздействию со стороны абразивных зерен, будет равна

$$S_{об} = 2 \pi r n_\epsilon l \tau . \quad (34)$$

Разделив выражение (33) на равенство (34), получим толщину  $t_e^*$  слоя металла, удаленного с обрабатываемой поверхности за время обработки:

$$t_e^* = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} V_{\text{скв}} \sigma^{2,2} R^{0,2} \sqrt{\rho^*} R_{\text{max}}^{0,3} \varepsilon^{2/3} \kappa \Gamma(\kappa)}{H_e^{1,2} H_p \Gamma(\kappa + 1,3)} \quad (35)$$

В процессе формообразующей приработки роликоподшипника с дорожками качения внутреннего и наружного колец взаимодействует комплект роликов, которые вращаются вокруг обрабатываемой поверхности с частотой  $n_p$ . Поэтому суммарный линейный съем металла с рабочих поверхностей наружного и внутреннего колец роликоподшипника за время обработки  $\tau$  будет равен

$$t_e = t_e^* z_p n_p \tau, \quad (36)$$

где  $z_p$  – количество роликов в роликоподшипнике;  $n_p$  – частота вращения роликов вокруг рабочей поверхности колец.

Подставляя выражение (36) в равенство (35), получим

$$t_e = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} V_{\text{скв}} \sigma^{2,2} R^{0,2} \sqrt{\rho^*} R_{\text{max}}^{0,3} \varepsilon^{2/3} n_p z_p \tau \kappa \Gamma(\kappa)}{H_e^{1,2} H_p \Gamma(\kappa + 1,3)} \quad (37)$$

Выражение (37) позволяет определить толщину металла, удаляемого с рабочей поверхности внутреннего кольца подшипника при его формообразующей приработке в собранном виде.

С целью придания выражению (14) вида, более удобного для использования в инженерных расчетах, выразим величину  $V_{\text{скв}}$  через геометрические и кинематические характеристики деталей подшипника. Известно, что

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{\pi D_0 n_0}{30}; \\ V_e &= \frac{\pi}{30} (D_0 - d) n_e; \\ V_n &= \frac{\pi}{30} (D_0 + d) n_n, \end{aligned} \quad (38)$$

где  $D_0$  – диаметр окружности, проходящей через центры роликов;  $d$  – диаметр роликов;  $n_0$  – частота вращения ролика вокруг оси подшипника.

Относительную скорость  $V_{01}$  точек поверхности ролика, вращающегося вокруг собственной оси, можно определить из выражения

$$V_{01} = \frac{\pi d n_{01}}{30}, \quad (39)$$

где  $n_{01}$  – частота вращения ролика вокруг собственной оси.

Известно, что

$$n_0 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D_0} \right) n_e + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{d}{D_0} \right) n_n, \quad (40)$$

$$n_{01} = \frac{1}{2} \frac{D_0}{d} (n_n - n_e) \left[ 1 - \left( \frac{d}{D_0} \right)^2 \right]. \quad (41)$$

Подставляя выражения (39)-(41) в равенство (14), получим

$$V = \frac{(D_0 + d) n_n - (D_0 - d) n_e - D_0 (n_n - n_e) \left( 1 - \frac{d^2}{D_0^2} \right) \cos \alpha_m}{(D_0 + d) n_n + 3(D_0 - d) n_e - D_0 (n_n - n_e) \left( 1 - \frac{d^2}{D_0^2} \right) \cos \alpha_m} \quad (42)$$

Используя рассуждения, приведенные выше, несложно определить величину линейного износа дорожки качения наружного кольца прирабатываемого роликоподшипника:

$$t_n = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} V_{скн} \sigma^{2,2} R^{0,2} \sqrt{\rho^*} R_{max}^{0,3} \varepsilon^{2/3} n_p z_p \tau \kappa \Gamma(\kappa)}{H_n^{1,2} H_p \Gamma(\kappa+1,3)} \quad (43)$$

На износ рабочей поверхности роликов будет оказывать влияние их взаимодействие как с дорожкой качения внутреннего кольца, так и с дорожкой качения наружного кольца прирабатываемого роликоподшипника.

На основе выполненного анализа несложно определить величину линейного износа роликов, вызванного их взаимодействием с внутренним и наружным кольцами в процессе формообразующей приработки подшипника в собранном виде в абразивной среде:

$$t_{ps} = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} V_{скв} \sigma^{2,2} R^{0,2} \sqrt{\rho^*} R_{max}^{0,3} \varepsilon^{2/3} n_e \tau \kappa \Gamma(\kappa)}{H_p^{1,2} H_e \Gamma(\kappa+1,3)} \quad (44)$$

$$t_{pn} = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} V_{скн} \sigma^{2,2} R^{0,2} \sqrt{\rho^*} R_{max}^{0,3} \varepsilon^{2/3} n_n \tau \kappa \Gamma(\kappa)}{H_p^{1,2} H_n \Gamma(\kappa+1,3)} \quad (45)$$

Суммируя выражения (44) и (45), определим величину линейного износа роликов после ускоренной приработки роликоподшипника в собранном виде:

$$t_p = \frac{2,7 \cdot 10^{-2} \sigma^{2,2} R^{0,2} \sqrt{\rho^*} R_{max}^{0,3} \varepsilon^{2/3} \tau \kappa \Gamma(\kappa)}{H_p^{1,2} \Gamma(\kappa+1,3)} \left( \frac{V_{скн} n_n}{H_n} + \frac{V_{скв} n_e}{H_e} \right) \quad (46)$$

Используя выражения (37), (43) и (46), можно определить время, необходимое для завершения процесса формообразования деталей подшипника при осуществлении его приработки в собранном виде. При этом изменение величины радиального зазора в роликоподшипнике можно определить по следующей формуле:

$$\Delta_z = \frac{t_n + t_e + t_p}{2} \quad (47)$$

На рис. 3 приведены теоретические и экспериментальные зависимости, отражающие влияние на изменение величины радиального зазора в прирабатываемом подшипнике частоты вращения внутреннего кольца. Как видно из рис. 3, погрешность расчета не превышает 20%, что вполне приемлемо для инженерных расчетов.

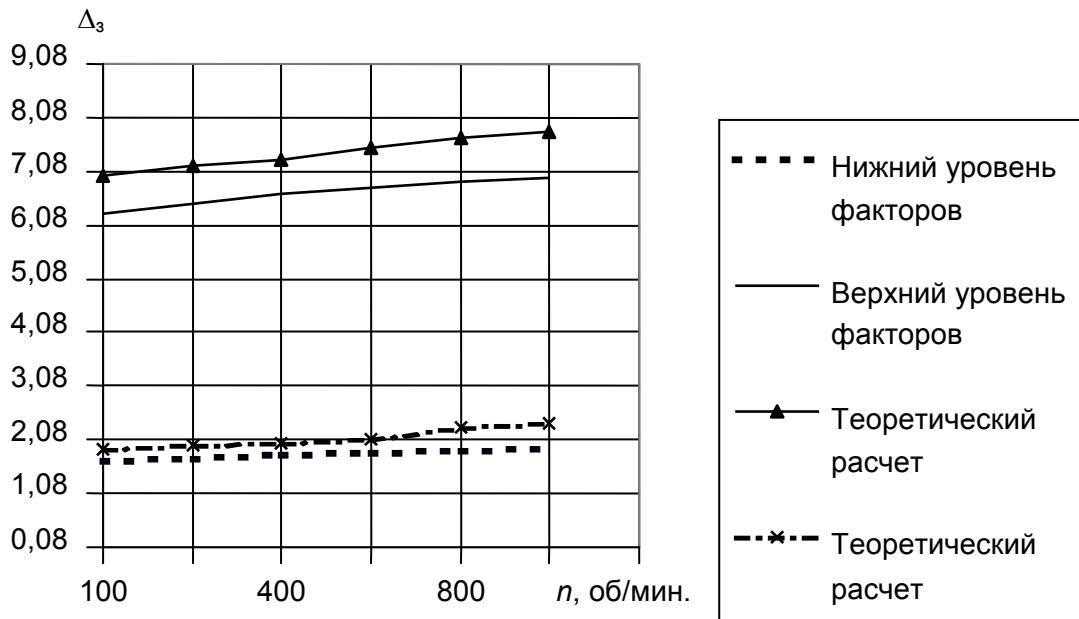


Рис. 3. Теоретические и экспериментальные зависимости влияния частоты вращения внутреннего кольца прирабатываемого подшипника на величину радиального зазора

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2166678. F16C 33/64, B24B 19/06. Способ приработки подшипников в собранном виде и устройство для его осуществления / А.В. Королев, О.Ю. Давиденко, О.В. Земсков. Открытия. Изобретения. 2001. № 13.
2. Давиденко О.Ю., Бочкарев П.Ю., Решетников М.К. Имитационные технологии окончательной обработки рабочих поверхностей прецизионных изделий // Фундаментальные и прикладные исследования саратовских ученых для процветания России и Саратовской губернии: Материалы науч. конф. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. С.27-29.
3. Ямпольский Г.Я., Крагельский И.В. Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. М.: Наука, 1973. 63 с.
4. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 326 с.

**Давиденко Олег Юрьевич** –

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

**Решетников Михаил Константинович** –

кандидат технических наук, докторант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета

УДК 541.123:546.21

**И.Д. Кособудский, К.В. Запис, Н.М. Ушаков, В.Я. Подвигалкин**

#### **НОВЫЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ**

*Исследованы электрофизические свойства новых композиционных материалов на основе наночастиц железа, распределенных в матрице относительно инертного полимера – полиэтилена. Показано, что электрические свойства материалов в значительной степени зависят от концентрации металлосодержащих наночастиц. При достижении перколяционной концентрации (массовой доли) более 0,5 в нанокompозите образуется объемный кластер, при этом материал становится проводником. Таким образом, изменяя концентрацию наночастиц, можно управлять свойствами композиционного материала.*

**I.D. Kosobudsky, K.V. Zapsis, N.M. Ushakov, V.Ya. Podvigalkin**

#### **NEW NANOCOMPOSITE MATERIALS FOR ELECTRONICS**

*Physical properties of new composite materials based on iron nanoparticles, distributed in matrix of the inert polymer of polythene are investigated. It is shown, that electric properties of materials strongly depend on the concentration of metal*

*nanoparticles in matrix. For percolation concentration more than 0,5 bulk clusters are formed in nanocomposite material. So composite material properties can be controlled due to change of concentration metal nanoparticles in a matrix.*

Исследователи и разработчики электронной аппаратуры всегда много внимания уделяют поиску новых физических принципов организации искусственных электронных сред. В последнее время новые подходы в структурной организации таких сред предлагает атомная (молекулярная) или нанотехнология. Одним из важных направлений развития нанотехнологии является создание и исследование металлических нанокompозитов, представляющих двухфазную систему из металлических наночастиц в диэлектрической матрице [1-3]. Использование в качестве диэлектрической матрицы различных полимеров обусловило развитие нового научного направления- пластиковой электроники. В настоящее время уже известно, что свойства металлических нанокompозитных материалов критическим образом зависят от объемной концентрации металлической фазы  $x$  [4,5]. При перколяционной концентрации (концентрации заполнения) объема матрицы металлическими наночастицами больше некоторой критической ( $x > x_c \cong 0.5$ ) в нанокompозите образуется объемный кластер, и полимер становится проводником. При этом такой кластер структурно представляет собой сеть контактирующих друг с другом металлических частиц («проводящая фаза»). В случае малой концентрации заполнения ( $x < x_c$ ) металлические кластеры пространственно разделены между собой, и электрическая проводимость нанокompозита носит характер туннелирования носителей заряда между такими кластерами («полупроводниковая или диэлектрическая фаза»). Изменение концентрации заполнения металлическими наночастицами полимерной матрицы существенно влияет на основные параметры нанокompозитной среды – электропроводность, комплексную диэлектрическую проницаемость, плазменную частоту и т.д. Таким образом, выбирая состав металлического нанокompозита – диэлектрическую матрицу, вид металла, размеры металлических наночастиц и их концентрацию в матрице, можно управлять основными физическими свойствами среды – электрическими, оптическими, гальваномагнитными и т.д.

Целью настоящей работы являлась разработка технологии синтеза композиционных материалов, содержащих наноразмерные частицы ферромагнитных металлов, выяснение механизма образования наночастиц в полимерной матрице, а также измерение электропроводности, комплексной диэлектрической проницаемости и ширины линии электронного парамагнитного резонанса полученных образцов с разным значением концентрации заполнения полимерной матрицы наночастицами металла.

Синтез металлосодержащих наночастиц в полимерной матрице осуществлялся методом термораспада нестойких металлоорганических соединений на специально разработанной установке, описанной в работах [1-3]. В качестве полимерной матрицы был выбран полиэтилен высокого давления (ПЭВД), а в качестве исходного металла – железо. Полученные порошки имели окраску серого или черного цвета в зависимости от концентрации металла. Исследования методом рентгеноскопии малоуглового рассеяния показали, что в этих матрицах присутствуют наночастицы металла с размерами 4...18 нм.

Измерение проводимости металлических нанокompозитов проводилось на частоте 1 МГц с помощью мостового измерителя Е7-12. При этом считалось, что эквивалентная схема образца представляет собой параллельно включенные сопротивление и емкость. Если полное сопротивление образца является чисто омическим, то измерения на постоянном и переменном токе должны совпадать. Однако, в общем случае механизмы электропроводности на постоянном и переменном токе могут быть совершенно различными. В зависимости от строения молекул полимера перемещения носителей заряда могут сопровождаться диэлектрическими потерями в области Максвелла-Вагнера или потерями, обу-

словенными вращением диполей, образованных группами атомов полимера [6]. На рис. 1, а,б показаны частотные зависимости эффективных значений резистивности и электрической емкости образца металлического наноконкомпозита (рис. 1, а) в соответствии с эквивалентной схемой образца (рис. 1, б).

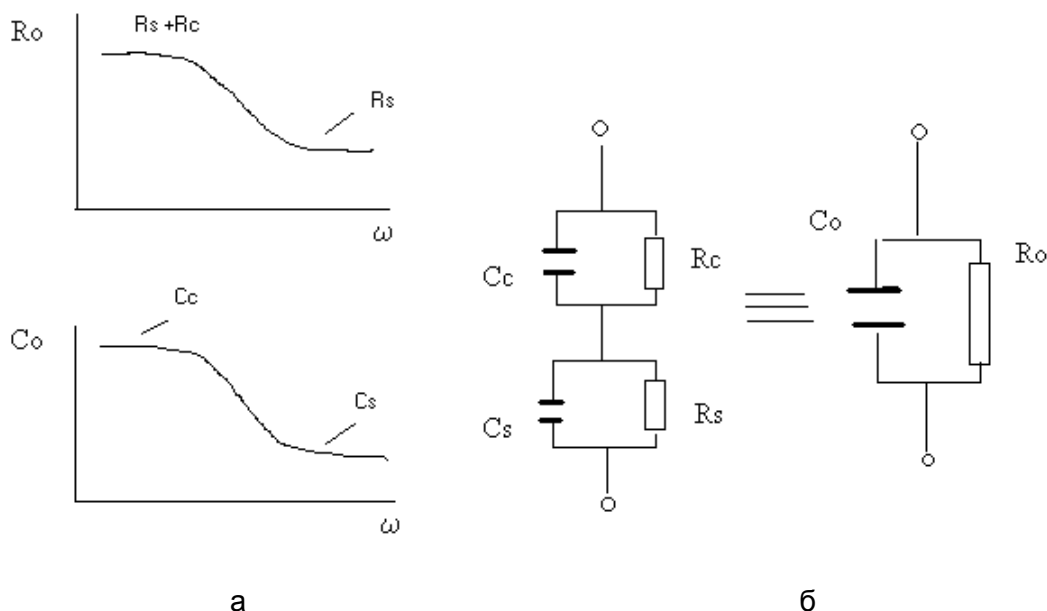


Рис. 1. Частотные зависимости эффективного сопротивления и эффективной емкости образцов (а) для эквивалентной схемы образца (б)

Здесь сопротивление и емкость контактов обозначены как  $R_c$  и  $C_c$ , а сопротивление наноконкомпозита –  $R_s$  и  $C_s$ . Как показано в работе [7], на высоких частотах выполняются соотношения  $C_c \gg C_s$ ,  $R_c \gg R_s$ , и влияние контактов на эквивалентные параметры образцов незначительны. Математическое преобразование для эквивалентной схемы дает следующие выражения для проводимости  $G_o$  и емкости образца  $C_o$ :

$$G_o = \frac{1}{R_o} = \frac{(R_s + R_c) + \omega^2 R_c R_s (R_s C_s^2 + R_c C_c^2)}{(R_s + R_c)^2 + \omega^2 R_c^2 R_s^2 (C_c + C_s)^2}, \quad (1)$$

$$C_o = \frac{R_s^2 C_s + R_c^2 C_c + \omega^2 R_s^2 R_c^2 C_s C_c (C_s + C_c)}{(R_s + R_c)^2 + \omega^2 R_s^2 R_c^2 (C_c + C_s)^2}.$$

На основании (1) и вышесказанного следует, что

$$R_o(\omega \rightarrow 0) = R_s + R_c,$$

$$R_o(\omega \rightarrow \infty) = R_s,$$

$$C_o(\omega \rightarrow 0) = \frac{R_s^2 C_s + R_c^2 C_c}{(R_s + R_c)^2}, \quad (2)$$

$$C_o(\omega \rightarrow \infty) = \frac{C_s C_c}{C_s + C_c}.$$

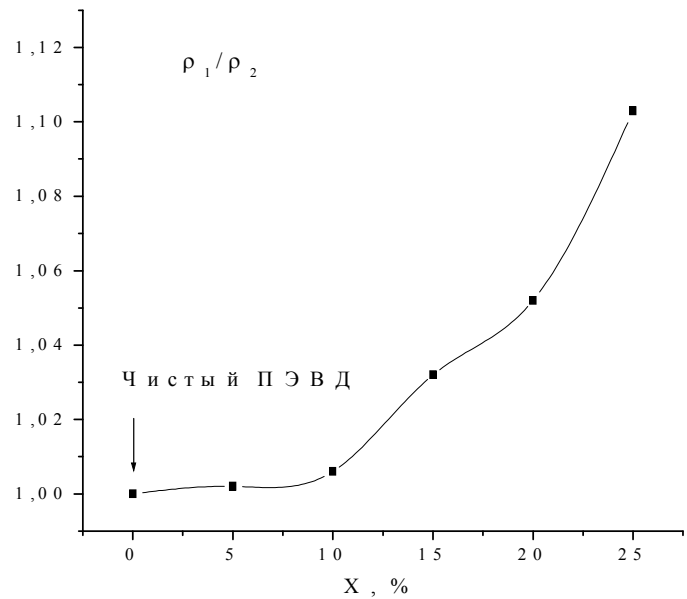
Удельное сопротивление  $\rho$  и относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  определялись стандартным способом из формулы плоского конденсатора на основании измеренных значений  $R_o$  и  $C_o$ . Расстояние между обкладками конденсатора составляло 1 мм, а площадь обкладок – около 10 мм<sup>2</sup>.

На рис. 2, а,б приведены зависимости измеренных значений удельного сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости для образцов с различной концентрацией заполнения  $x$  по отношению к чистому ( $x=0$ ) полиэтилену.

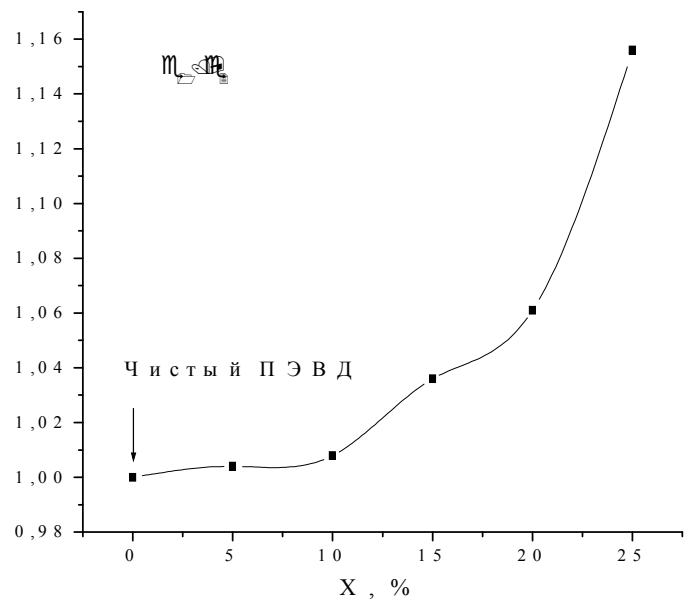
Измеренное значение удельного сопротивления чистого ПЭВД ( $x=0$ ) было равно  $\rho_2=1,15 \cdot 10^6$  Ом·м, а относительная диэлектрическая проницаемость имела значение  $\varepsilon_2=2,61$ .

Из приведенных зависимостей следует, что изменение концентрации до 20% приводит к росту проводимости нанокompозитов на 12%. Относительная диэлектрическая проницаемость увеличивается на 16%. При этом электропроводность нанокompозита имеет «полупроводниковую фазу».

Образцы металлических нанокompозитов с разной концентрацией заполнения исследовались методом электронного парамагнитного резонанса на спектрометре типа СЭПР-2 на частоте 9,8 ГГц. Были получены одиночные линии парамагнитного поглощения для каждого образца. Известно [6], что линия поглощения (отражения) характеризуется следующими параметрами: 1) значением  $g$ -фактора; 2) шириной; 3) амплитудой или площадью под кривой поглощения, которая возрастает с концентрацией парамагнитных центров; 4) формой. Значения концентрации заполнения образцов изменялись от 3 до 20%. На рис. 3, а-г показаны измеренные линии отражения СВЧ мощности для разных значений напряженности магнитного поля. По оси  $U$  отложена первая производная СВЧ мощности от магнитного поля –  $dP/dH$ , а по оси  $X$  – напряженность магнитного поля  $H$ . Наименьшая ширина линии ЭПР ( $\Delta H=50$  Оэ) и наибольший сигнал получены для образцов с 5%-ной концентрацией заполнения (рис. 3, а), а наибольшая – для образца с концентрацией 20% ( $\Delta H=650$  Оэ). Линии (б-г) приведены с 50-кратным увеличением по амплитуде сигнала по отношению к линии (а).



а



б

Рис. 2. Зависимости приведенных значений удельной проводимости ( $\rho_1/\rho_2$ ) и относительной диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ ) от концентрации заполнения  $X$  в процентах к чистому ПЭВД ( $x=0$ )

Таким образом, результаты измерений электрофизических и магнитных свойств металлических наноконкомпозитов на основе железа и ПЭВД показывают возможность эффективного управления физическими свойствами таких искусственных сред при концентрации заполнения, значительно меньшей критической ( $x < x_c = 50\%$ ).

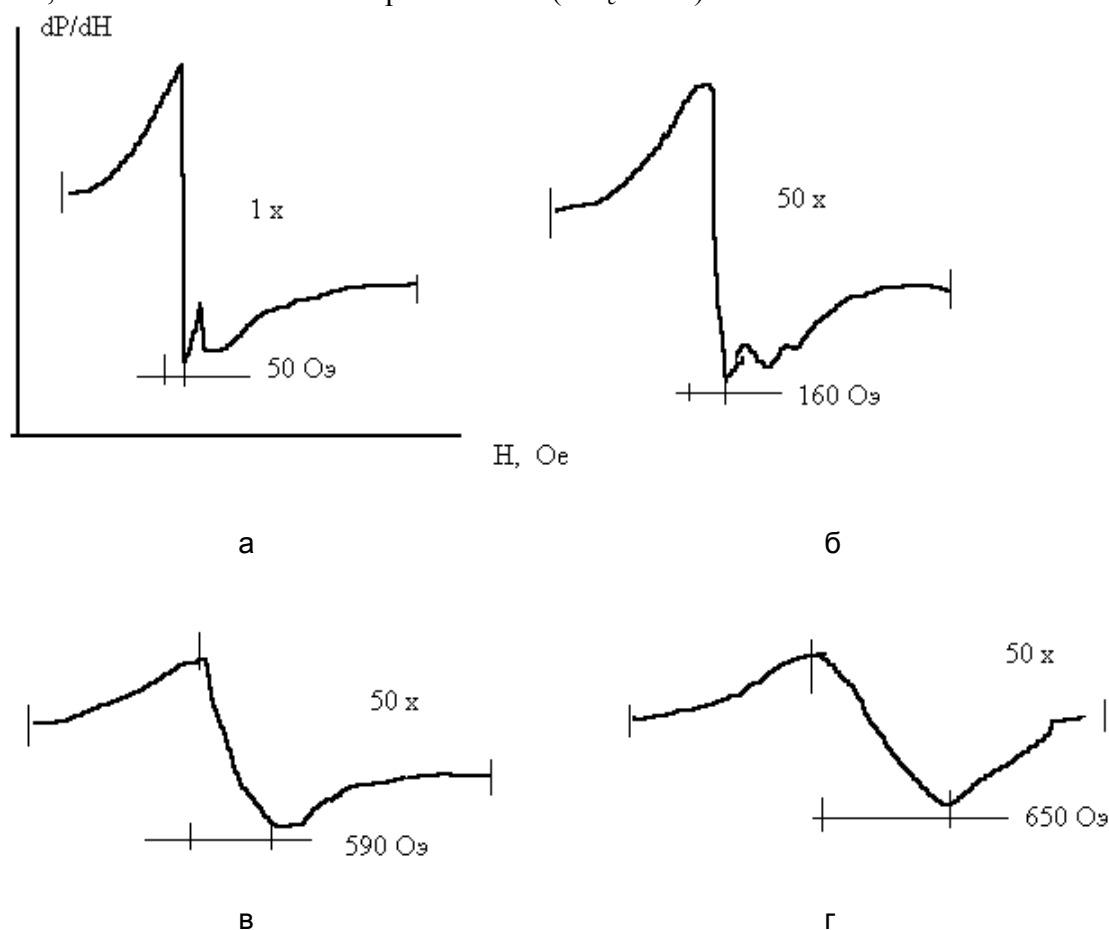


Рис. 3. Линии отражения СВЧ мощности при разных значениях напряженности магнитного поля

Авторы выражают глубокую благодарность к.ф.-м.н. С.Л. Высоцкому за измерение характеристик наноконкомпозитов методом ЭПР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yurkov G.Y., Gugin S.P., Kosobudsky I.D. Metallocontaining nano-particles in polymeric matrixes // Ninth Foresight Conf. on Molekular Nanotechnology. USA, Santa Clara, 2001, 08-11. P.34-36.
2. Кособудский И.Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2000. Т.43, вып.4. С.3-18.
3. Кособудский И.Д., Юрков Г.Ю. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: II. Синтез, физико-химические свойства. Применение // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2000. Т.43, вып.5. С.3-19.
4. Sarychev A.K., Brouers F. New Scaling for ac Properties of Percolating Composite Materials // Phys. Rev. Lett. 1994. V.73. № 21. P.2895-2898.



5. Мейлихов Е.З. Электрофизические свойства деформируемых нанокompозитов // Физика твердого тела. 2001. Т.43, вып.7. С.1181-1184.

6. Гутман Ф., Лайонс Л. Органические полупроводники / Под ред. Е.Л. Франкевича. М.: Мир, 1979. 696 с.

7. Huggins С.М., Sharbaugh А.Н. Dielectric properties of organic semiconductors // J. Chem. Phys. 1963. V.38. P.393.

**Кособудский Игорь Донатович** –

доктор химических наук, профессор кафедры «Химия»  
Саратовского государственного технического университета

**Запис Константин Васильевич** –

аспирант кафедры «Химия»  
Саратовского государственного технического университета

**Ушаков Николай Михайлович** –

доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией Саратовского отделения ИРЭ РАН

**Подвигалкин Виталий Яковлевич** –

ведущий инженер лаборатории Саратовского отделения ИРЭ РАН

УДК 541.138:541.452:621.357.2

**А.В. Яковлев, А.И. Финаенов, Е.В. Яковлева, С.Л. Забудьков**

### **АНОДНЫЙ СИНТЕЗ ТЕРМОРАСШИРЯЮЩИХСЯ СОЕДИНЕНИЙ ГРАФИТА В АЗОТНОЙ КИСЛОТЕ**

*Потенциостатической обработкой суспензионного графитового электрода в 13,5М HNO<sub>3</sub> получены терморасширяющиеся соединения графита. Установлена взаимосвязь между потенциалом анодной обработки графита, сообщаемой электрической емкостью и способностью полученных соединений к терморасширению. Показано, что для получения пенографита с насыпной плотностью 2-4 г/дм<sup>3</sup> графитовому электроду необходимо сообщить электрическую емкость 120-280 мА·ч/г графита при потенциале 2,1-2,3 В.*

**A.V. Yakovlev, A.I. Finayenov, E.V. Yakovleva, S.L. Zabud'kov**

### **ANODE SYNTHESIS OF THERMO EXPANDING GRAPHITE COMPOUNDS IN NITROGEN ACID**

*Thermoexpanding graphite compounds are obtained as a result of potentiostatic suspension graphite electrode in 13.5M HNO<sub>3</sub>. Anode graphite processing potential, given by electric capacity, and the ability of compounds, having been ob-*

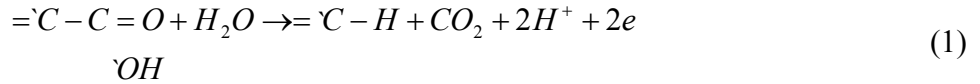
*tained to thermoexpand are proved to be interconnected. It is shown that to obtain the foam graphite with the density of 2-4 g/dm<sup>3</sup> it is necessary to give electric capacity of 120-280 mA·h/g with potential of 2.1-2.3 V to the graphite electrode.*

Соединения внедрения графита (СВГ) широко используются в качестве катодных [1-3] и анодных [4,5] материалов в различных электрохимических системах, а также в электрохимических и гибридных конденсаторах [6,7]. Кроме того, СВГ являются промежуточным продуктом для получения терморасширенного графита (ТРГ) [8,9]. ТРГ – это продукт термообработки СВГ, на основе которого изготавливаются прессованные углеродные изделия [9,10], графитовая фольга, шумо- и теплопоглощающие экраны [9,11,12]. Основная масса СВГ для дальнейшей переработки в пенографит производится химическим окислением углеродного сырья в кислой среде (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), содержащей дополнительно сильный окислитель (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, KMnO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub><sub>конц.</sub>) [13]. СВГ достаточно легко синтезировать и электрохимическим методом, подвергая графит анодной обработке в H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> или HNO<sub>3</sub> [14-16]. Электрохимический способ, по сравнению с химической технологией, легко контролируется и управляется, позволяет получать соединения заданного состава с высокой однородностью свойств [17]. Однако, несмотря на неоспоримую перспективность электрохимического метода, его широкое применение сдерживается отсутствием технологических проработок и необходимого оборудования. Учитывая, что для разработки основ технологии и оборудования промышленного производства СВГ по электрохимической технологии необходимы сведения о влиянии режимов анодной поляризации на качество и состав получаемых соединений, нами ранее была показана перспективность использования потенциостатической анодной обработки [16]. В настоящем сообщении приведены более обширные экспериментальные данные по влиянию потенциала и времени синтеза на свойства получаемых соединений.

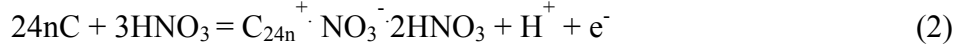
### Экспериментальная часть

Все электрохимические эксперименты проводились в трехэлектродной ячейке с подпрессовкой дисперсного графита к платиновому токоотводу поршнем-диафрагмой ( $P=0,2$  кг/см<sup>2</sup>). В качестве электрода сравнения использовался хлорсеребряный электрод сравнения (х.с.э.) и все значения потенциалов, приведенные в данном сообщении, даны относительно х.с.э. Более подробно конструкция ячейки и методика эксперимента описаны в [16,18]. Свойства синтезированных соединений оценивались по плотности терморасширенного графита ( $d_{mpc}$ ), получаемого термообработкой ( $t=900^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=5$  с) гидролизованного и высушенного СВГ. Коэффициент терморасширения рассчитывался по отношению объема ТРГ к навеске исходного графита  $\left( K_{TP} = \frac{V_{ТРГ}}{m} \right)$  [19]. Выход по углероду ( $B_c$ ) оценивался по соотношению масс ТРГ и графита. В экспериментах использовались графит марки ГСМ-1 (99,5% С) с размером частиц 80-250 мкм и азотная кислота квалификации ХЧ.

Изменение тока во времени при различных потенциалах анодной обработки графита в 13,5М растворе HNO<sub>3</sub> представлено на рис. 1. Потенциостатические кривые имеют характерную форму, которая неоднократно описывалась в литературе для процесса внедрения в графит бисульфат-иона [14,15]. На ниспадающей части кривой токи обусловлены в основном зарядением двойного электрического слоя, процесс имеет тенденцию к быстрому снижению скорости во времени. Дальнейший ход кривых определяется потенциалом анодной поляризации. Ведение синтеза при  $E_a \leq 1,5$  В характеризуется невысокой скоростью анодных процессов. При этих потенциалах термодинамически возможны лишь реакции окисления поверхностных функциональных групп (ПФГ) [20]:



Увеличение  $E_a$  приводит к возрастанию анодных токов и наложению на реакцию (1) процесса электрохимического внедрения [20]:



где  $n= 1,2,3\dots$  – степень внедрения.

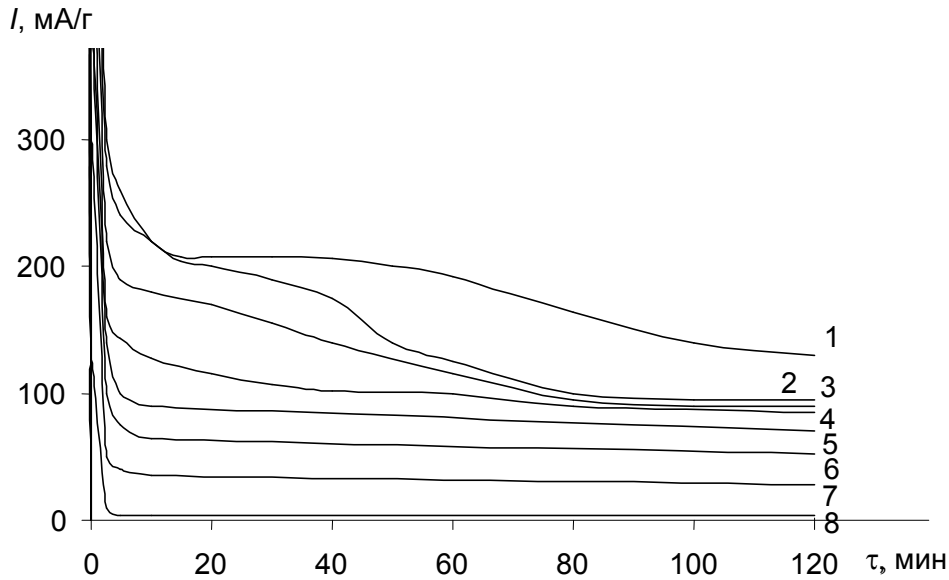
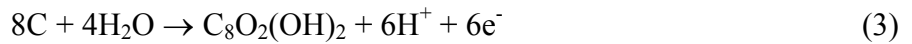


Рис. 1. Потенциостатические кривые анодной обработки графита в 13,5М HNO<sub>3</sub> при различных потенциалах:  
1 – 2,3; 2 – 2,2; 3 – 2,1; 4 – 2,0; 5 – 1,9; 6 – 1,7; 7 – 1,6; 8 – 1,5 В

О протекании этого процесса свидетельствует подъем при 1,5 В на  $Q-E$  кривых (рис. 2), построенных по потенциостатическим (ПС) кривым. Образование структур внедрения подтверждается и коэффициентом терморасширения полученных соединений, имеющего тенденцию к увеличению с ростом потенциала синтеза (табл. 1). Увеличение потенциала анодной поляризации до 2,1 В создает условия для образования соединений типа окиси графита (ОГ) [20]:



ОГ также относится к СВГ и, согласно литературными сведениям, имеет большой коэффициент терморасширения. Именно процессу образования ОГ соответствуют перегибы на ПС кривых при  $E_a > 2,1$  В (рис.1) и второй подъем на поляризационных кривых (рис. 2). Экстраполяция наклонных участков анализируемых кривых при  $E_a > 2,1$  В на ось абсцисс пока-

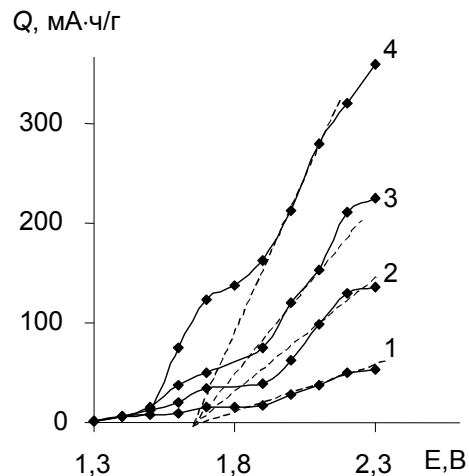


Рис. 2. Поляризационные потенциостатические кривые для графита ГСМ-1 в 13,5М HNO<sub>3</sub> при различном времени анодной обработки: 1-10; 2-30; 3-60; 4-120 мин.

зывает, что процесс, определяющий данный подъем тока, начинается при потенциалах около 1,6 В. Таким образом, можно говорить, что при потенциалах анодной поляризации свыше 1,6 В параллельно протекают процессы образования СВГ (реакция 2) и окиси графита (реакция 3), причем доля последнего увеличивается с ростом  $E_a$ . Это подтверждается и увеличением насыпной плотности ( $d_{mpz}$ ) для образцов, синтезированных при более высоких потенциалах (табл. 1), что согласуется с литературными сведениями, согласно которым, степень терморасширения для окиси графита выше, чем кислых солей графита. При потенциале 2,3 В отмечается значительное увеличение анодных токов, которое может быть вызвано лишь реакцией выделения кислорода [21]:

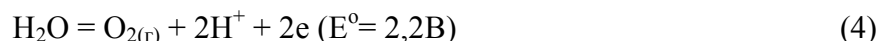


Таблица 1

Влияние потенциала и времени синтеза терморасширяющихся соединений графита (ТРСГ) в 13,5М HNO<sub>3</sub> на скорость анодных процессов, сообщаемую емкость и свойства полученных соединений

$E_a$ , В	$\tau$ , ч	Токи ПС-кривой			$Q$ , мАч/г	$B_c$ , %	$d_{mpz}$ , г/дм <sup>3</sup>	$K_{mp}$ , мл/г
		$I_H$ , мА/г	$I_{cp}^*$ , мА/г	$I_K$ , мА/г				
1,3	2,0	98	0,5	0,2	1	100	–	0
1,4	2,0	100	2	1,6	4	100	–	0
1,5	2,0	128	4	3,2	8	100	–	0
1,6	2,0	300	38	28	75	100	59,2	8
1,7	2,0	360	60	52	120	99	9,2	80
1,8	2,0	390	65	55	140	99	8,0	110
1,9	0,5	390	70	60	35	99	16,0	56
	1,0	380	65	60	65	98	10,0	78
	1,5	400	77	60	115	97	8,0	100
	2,0	400	80	70	160	95	6,0	132
2,0	2,0	460	107	86	214	97	3,71	210
2,1	0,5	620	160	114	80	97	5,5	146
	1,0	580	140	100	140	96	3,5	230
	1,5	600	130	100	195	95	2,7	300
	2,0	560	140	90	280	94	2,4	340
2,2	2,0	660	160	100	320	92	2,4	330
2,3	2,0	720	180	130	360	90	2,4	310

\* – рассчитано по значениям сообщенной емкости и времени синтеза.

Как следует из табл. 1, с ростом потенциала свыше 2,1 В, сообщение одинакового количества электричества приводит к уменьшению  $d_{mpz}$ , но одновременно снижается выход по углероду ( $B_c$ ). Вероятно, образовавшийся кислород наряду с окислением углерода стимулирует процесс интеркаляции.

При полном заполнении графитовой матрицы интеркалатом анодные токи должны стремиться к нулю (рис. 1). Однако, даже длительная анодная обработка (более 30 часов), независимо от потенциала синтеза не приводит к снижению тока до нуля, при этом сообщаемая электрическая емкость в основном расходуется на переокисление образовавшихся СВГ. Процесс переокисления сопровождается увеличением заряда макрокатионов ( $\text{C}_{24}^+ \rightarrow \text{C}_{16+12}^+$ ),

а, следовательно, меняется стехиометрический состав СВГ. Теоретически необходимое количество электричества для получения СВГ  $n$ -й ступени можно рассчитать по формуле:

$$Q = F \cdot m / (12,011 \cdot 24n), \quad (5)$$

где  $F$  – число Фарадея (26,8 А·ч);  $m$  – масса графита (г);  $n$  – номер ступени внедрения. Так, для образования СВГ I ступени состава  $C_{24}^+ \cdot NO_3^- \cdot 2HNO_3$  необходимо сообщить емкость 93 мА·ч/г, II – 46,5 мА·ч/г, III – 31 мА·ч/г, IV – 23,2 мА·ч/г.

Учитывая динамику сообщения электрической емкости при различных потенциалах анодной поляризации (рис. 3), было определено минимально необходимое время анодной обработки графита для образования СВГ различного состава (табл. 2).

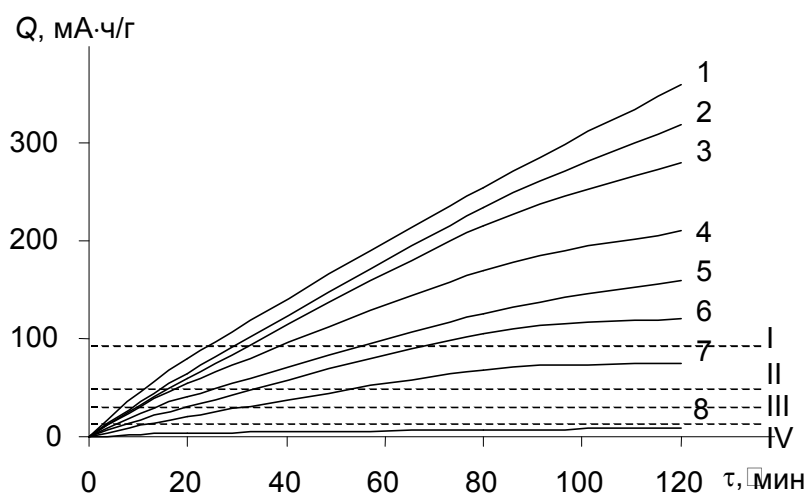


Рис. 3. Динамика нарастания электрической емкости в процессе потенциостатической поляризации графитового анода в 13,5М HNO<sub>3</sub> при различных потенциалах:  
1 – 2,3; 2 – 2,2; 3 – 2,1; 4 – 2,0; 5 – 1,9; 6 – 1,7; 7 – 1,6; 8 – 1,5 В

Таблица 2

Зависимость времени (в мин.) для сообщения теоретически необходимой емкости для СВГ различных ступеней ( $n$ ) от потенциала ( $E$ ) анодной обработки графита

$E, В$		1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
$n$	I	–	–	–	68	38	33	30	25
	II	–	54	33	25	18	16	15	11
	III	–	30	19	13	9	9	8	6
	IV	–	13	9	6	4	4	4	3

Как следует из рис. 3 и табл. 2, синтез СВГ даже с невысокой концентрацией интеркалата возможен лишь при  $E_a > 1,6 В$ . Превышение в 3-4 раза сообщенной емкости (табл. 1) над теоретически необходимой для образования СВГ, например III ступени (табл. 2), можно объяснить следующим образом. Часть электричества, сообщаемая в начальный момент времени (спад тока, рис. 1), затрачивается на зарядку ДЭС и окисление ПФГ, а емкость, накапливаемая после выхода тока на стационарное значение, идет преимущественно на переокисление

образовавшихся соединений и выделение кислорода. Реально затрачиваемое количество электричества приводит к полному заполнению графитовой матрицы интеркалатом. Данный факт нельзя подтвердить рентгенофазовым анализом (РФА) в связи с тем, что СВГ, полученные в наших экспериментах, по-видимому, полностью гидролизваны.

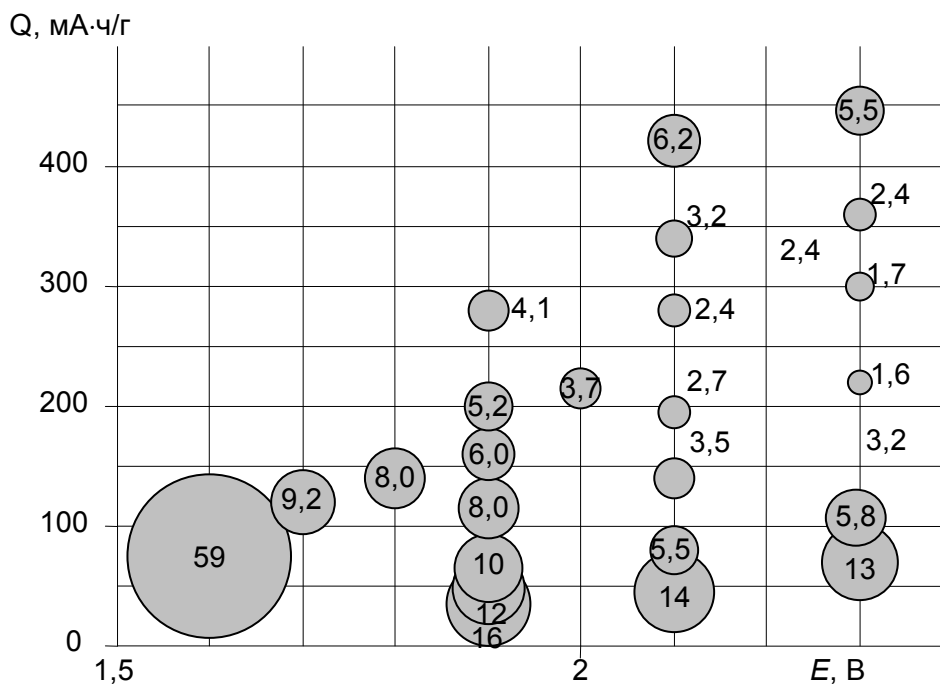


Рис. 4. Зависимость плотности ТРГ (диаметр круга, г/дм<sup>3</sup>), полученного термообработкой синтезированных соединений, от режима потенциостатической анодной обработки дисперсного графита в 13,5М растворе HNO<sub>3</sub>

Степень заполнения углеродной матрицы можно оценить по  $d_{mpg}$ . Для нитрата графита, синтезированного в концентрированных растворах, состав которого идентифицирован РФА, согласно литературным сведениям [22], известны следующие значения: I – 2; II – 2,4; III – 3,8 г/дм<sup>3</sup>. Для наших образцов, судя по значениям  $d_{mpg}$ , образуются соединения не выше III ступени. О переокислении СВГ свидетельствует наличие минимума (минимальный диаметр круга) на зависимости  $d_{mpg}-Q$  при  $E > 2,1$  В (рис. 4). При последующей термообработке таких соединений интеркалат удаляется не только через торцевую поверхность, но и через образовавшиеся дефекты, что приводит к снижению степени терморасширения СВГ. Это подтверждается и снижением выхода по углероду при этих потенциалах синтеза (табл. 1).

Полученные результаты показали, что потенциостатической обработкой графита в 13,5М растворе HNO<sub>3</sub> можно получить СВГ для дальнейшей переработки в пенографит. При этом насыпная плотность пенографита может варьироваться в широких пределах (табл. 1, рис. 4). Рост потенциала анодной обработки закономерно повышает скорость процессов и увеличивает сообщенную графиту емкость, от значения которой зависит плотность пенографита, получаемого на основе синтезированных соединений. Обнаруженные зависимости в интервале потенциалов, обеспечивающих достаточно высокие скорости анодного процесса, проиллюстрированы на рис. 4. Согласно рисунку, нарастающие емкости с повышением потенциала, приводит к снижению  $d_{mpg}$ . Увеличение потенциала свыше 2,3 В и, соответственно, емкости практически не влияет на степень вспенивания СВГ, а выход по углероду при этом уменьшается (табл. 1). В пределах одинаковых

потенциалов синтеза отмечается закономерное снижение  $d_{mpz}$  до определенного значения, а при дальнейшем наращивании емкости начинается переокисление СВГ. Таким образом, СВГ, способные при термообработке образовывать пенографит с насыпной плотностью 2-4 г/дм<sup>3</sup>, необходимо синтезировать потенциостатической обработкой дисперсного графита при потенциалах 2,1-2,3 В, с сообщением 120-280 мА·ч на грамм графита. При этом качество пенографита не уступает существующим аналогам. Полученные данные подтверждают возможность получения электрохимическим способом терморасширяющихся соединений графита с необходимыми свойствами без использования высококонцентрированных растворов кислот.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Beck F., Junge H., Krohn H. Graphite intercalation compounds as positive electrodes in galvanic cells // *Electrochimica Acta*. 1981. V.26. № 7. P.799-809.
2. Flandrois S. Graphite intercalation compounds as electrode materials in batteries // *Synth. Met.* 1982. V.4. P.255-266.
3. Inagaki M., Iwashita N., Wang D. Electrochemical synthesis of graphite intercalation compounds with nickel and hydroxides // *Synth. Met.* 1988. V.26. P.41-47.
4. Flandrois S., Herran J. Battery electrodes based of metal chloride-graphite intercalation compounds // *Synth. Met.* 1986. V.14. № 1-2. P.103-111.
5. Yazami R., Tauzain Ph. A reversible graphite-lithium negative electrode for electrochemical generators // *J. Power Sourc.* 1983. V.9. P.365-371.
6. Вольфович Ю.М., Мазин В.М., Уриссон Н.А. Исследование работы двойнослойных конденсаторов на основе углеродных материалов // *Электрохимия*. 1998. Т.34. № 8. С.825-828.
7. Вольфович Ю.М. Электрохимические конденсаторы // *Фундаментальные проблемы электрохимической энергетики: Материалы IV Междунар. конф. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. С.173-175.*
8. А.с. № 1662926 (СССР), МКИ С01 В 31/04. Способ получения терморасширенного графита / И.В. Зверев, В.В. Шапранов, А.П. Ярошенко, В.А. Кучеренко. Заяв. 06.07.89. (№ 4716122/26); Опубл. 15.07.91. Бюл. № 26.
9. Фиалков А.С., Малей Л.С. Некоторые аспекты технологии изготовления расширенного графита // *Электроугольные и металлокерамические изделия для электротехники: Сб. тр. М.: Наука, 1985. С.65-72.*
10. Уббелоде А.Р., Льюис Ф.А. Графит и его кристаллические соединения. М.: Мир, 1965. 256 с.
11. Setton R. The use of graphite intercalation compounds in preparative chemistry (A bibliography, 1977-1985) // *Synth. Met.* 1988. V.23. P.519-524.
12. Ярошенко А.П., Савоськин М.В. Высококачественные вспучивающиеся соединения интеркалирования графита – новые подходы к химии и технологии // *Журнал прикладной химии*. 1995. Т.68. № 8. С.1302-1306.
13. Синтез соединений внедрения в системе графит – HNO<sub>3</sub> – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> / В.В. Авдеев, Н.Е. Сорокина, И.В. Никольская и др. // *Неорганические материалы*. 1997. Т.33, № 6. С.699-702.
14. Выбор условий электрохимического синтеза бисульфата графита / С.П. Апостолов, В.В. Краснов, В.В. Авдеев, А.И. Финаенов // *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 1997. Т.40, № 1. С.113-117.
15. Апостолов С.П., Краснов В.В., Финаенов А.И. Электрохимический синтез гидросульфата графита в потенциостатическом режиме // *Журнал прикладной химии*. 1997. Т.70, № 4. С.602-607.

16. Яковлев А.И., Финаенов А.И. Электрохимический синтез соединений внедрения графита с азотной кислотой для получения пенографита // Журнал прикладной химии. 1999. Т.72, № 1. С.88-91.

17. Ярошенко А.П., Попов А.Ф., Шапранов В.В. Технологические аспекты синтеза солей графита // Журнал прикладной химии. 1994. Т.67. № 2. С.204-211.

18. Изучение электродных процессов на платине и углеродных материалах в концентрированной азотной кислоте / А.В. Яковлев, А.И. Финаенов, Л.Е. Никитина, С.П. Апостолов // Журнал прикладной химии. 1999. Т.72, № 4. С.589-593.

19. Пат. 18187 Україна, МКВ 6 С01 В 31/04. Спосіб одержання терморозщепленого графіту та склад для його реалізації / О.П. Ярошенко, М.В. Савоськін. – № 94076302; Заявл. 19.07.94; Опубл. 31.10.97. Бюл. № 5. 8 с.

20. Тарасевич М.Р. Электрохимия углеродных материалов. М.: Наука, 1984. 253 с.

21. Добош Д. Электрохимические константы. М.: Мир, 1980. 368 с.

22. Сорокина Н.Е., Максимова Н.В., Авдеев В.В. Анодное окисление графита в 10-98%-ных растворах  $\text{HNO}_3$  // Неорганические материалы. 2001. Т.37, № 4. С.1-7.

**Яковлев Андрей Васильевич –**

кандидат технических наук,  
докторант кафедры «Технология электрохимических производств»,  
доцент кафедры «Физическая и органическая химия»  
Энгельсского технологического института  
Саратовского государственного технического университета

**Финаенов Александр Иванович –**

доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технология электрохимических производств»  
Энгельсского технологического института  
Саратовского государственного технического университета

**Яковлева Елена Владимировна –**

кандидат химических наук, научный сотрудник ЗАО «УНИХИМТЕК», г. Москва

**Забудьков Сергей Леонидович –**

аспирант кафедры «Технология электрохимических производств»  
Энгельсского технологического института  
Саратовского государственного технического университета



---

---

## ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

---

---

УДК 535.37: 577.352

**Г.В. Мельников, М.И. Лобачев, А.Г. Мельников**

### **ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ФЛУОРИМЕТР ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

*Исследования кинетики излучательных процессов дезактивации триплетных состояний люминофоров с помощью автоматизированного лазерного флуориметра позволили установить изменение структуры белков при добавлении в исследуемые растворы молекул спирта и поверхностно-активных веществ. Применение сенсibilизированной фосфоресценции, полициклических ароматических углеводородов позволило повысить селективность определения этих соединений. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработанных методов и созданной экспериментальной установки для экологического мониторинга природных объектов.*

**G.V. Mel'nikov, M.I. Lobachev, A.G. Mel'nikov**

### **HIGH SENSITIVE IMPULSE FLUORIMETRE FOR ENVIRONMENTAL ECOLOGICAL MONITORING**

*The kinetics studies of radiative processes of luminophors triplet states decontamination with the help of automated laser fluorimetre showed changes in protein structure when alcohol molecules and surface-interactive agents were added into the studied solutions. The usage of sensibilized phosphorescence and polycyclic aromatic hydrocarbons allowed to increase the selectiveness of these compounds definition. The obtained results prove prospective of the developed methods and the experimental equipment for ecological monitoring of environmental objects.*

Во многих странах с развитой индустрией и интенсивным сельским хозяйством наблюдается деградация экологических систем, ставящая под угрозу существование человека. Все большее значение приобретают такие загрязняющие вещества, как нефтепродукты, тяжелые металлы, биогенные вещества, сложные органические соединения (детергенты на основе поверхностно-активных веществ, полициклические ароматические углеводороды и др.). Среди загрязнителей особое место занимают полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), которые оказывают не только токсичное, но и главным образом, мутагенное и канцерогенное

действие на животных и человека. Это заставляет искать все новые способы контроля содержания этих веществ в объектах окружающей среды. Преимущество отдается экспрессным методам с большой чувствительностью и избирательностью [1]. Несмотря на большие достижения в области разработки методов контроля состояния окружающей среды, имеется много нерешенных проблем, связанных с применением люминесцентных методов экспрессного определения органических веществ [2] и состояния биологических объектов [3].

В осуществлении выполняемых белковыми макромолекулами функциональных нагрузок ключевую роль играет не только конформация (статичная структура), но и равновесные тепловые движения конструктивных элементов глобулы [4]. Из всех видов внутримолекулярной динамики белков наименее изучены медленные флуктуации структуры белка, с характерными миллисекундными временами. Уникальные возможности исследования медленной внутримолекулярной динамики белка представляет метод, основанный на изучении процессов дезактивации триплетных состояний молекул люминесцентных зондов, время жизни которых как раз укладывается в этот временной интервал. Разработке этих методов и посвящена данная работа. Цель проведенных исследований состояла в выяснении возможности применения методов люминесцентной спектроскопии для исследования структурной динамики белков, а также в поиске путей увеличения селективности аналитического определения ПАУ в объектах окружающей среды.

При выполнении работы применялся метод импульсного фотолиза [5,6], с помощью которого удалось получить спектры замедленной флуоресценции и фосфоресценции, а также определить времена жизни триплетных состояний люминофоров по затуханию люминесценции образцов. Метод импульсного фотолиза основан на создании высоких концентраций триплетных состояний люминофоров при фотооблучении образцов мощной вспышкой света малой длительности. Достигаемая при возбуждении высокая концентрация триплетных молекул позволяет осуществить измерения их спектров триплет-триплетного поглощения и люминесценции. Достоинством метода импульсного фотолиза является то, что его применение делает возможным прямое наблюдение промежуточных фотопродуктов с помощью сравнительно малочувствительных физических методов. Импульсный фотолиз является релаксационным методом, в котором применяется воздействие кратковременных световых импульсов на вещество для создания неравновесной концентрации метастабильных состояний. Релаксация системы в исходное или новое неравновесное состояние прослеживается по спектрам поглощения или люминесценции, регистрируемым во времени после импульсного фотооблучения на созданной установке импульсного флуориметра.

Главным достоинством импульсного флуориметра является высокая чувствительность, надёжность в работе и хорошая воспроизводимость получаемых результатов. С его помощью удаётся обнаружить молекулы в триплетном состоянии, когда их концентрация составляет  $\sim 10^{-8} \div 10^{-10}$  М, и надёжно регистрировать фосфоресценцию люминофоров с квантовым выходом до  $10^{-3}$ . Отличие данного импульсного флуориметра состоит еще и в том, что он позволяет осуществить контроль за изменением концентрации триплетных состояний люминофора по оптической плотности триплет-триплетного (Т–Т) поглощения при изменении условий эксперимента. На рис. 1 представлена блок-схема такой установки, которая позволяла исследовать спектры Т–Т поглощения, быстрой и замедленной флуоресценции, фосфоресценции, а также кинетику дезактивации триплетных молекул по данным Т–Т поглощения и затухания длительного послесвечения.

Люминесценция исследуемого раствора (1), возникающая при импульсном фотооблучении лазером (19), регистрировалась с помощью монохроматора (9), фотоэлектронного умножителя (8) и осциллографа (10). Обработка полученных сигналов осуществлялась с помощью компьютера (14). Регистрация оптической плотности триплет-триплетного поглощения осуществлялась с помощью зондирующего источника (4) и системы линз (3). Спектры

триплет-триплетного поглощения и люминесценции красителей и ПАУ строились «по точкам», путём установки монохроматора перед инициированием импульсного фотовозбуждения раствора на фиксированную длину волны.

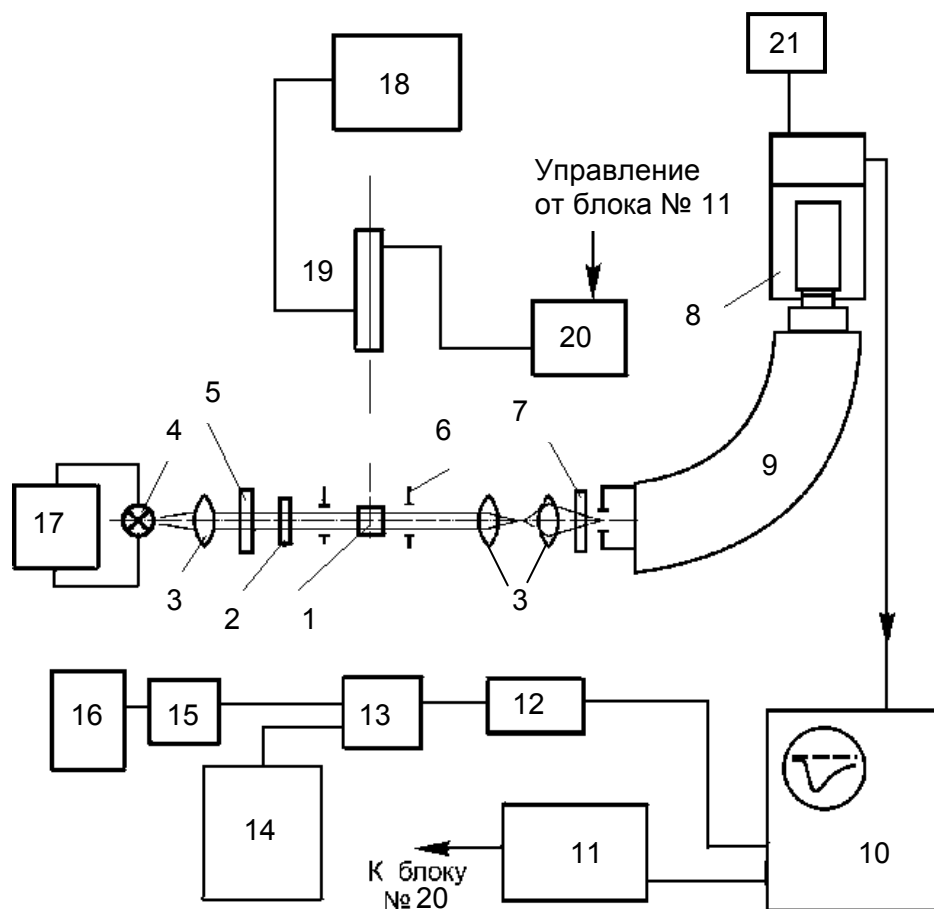
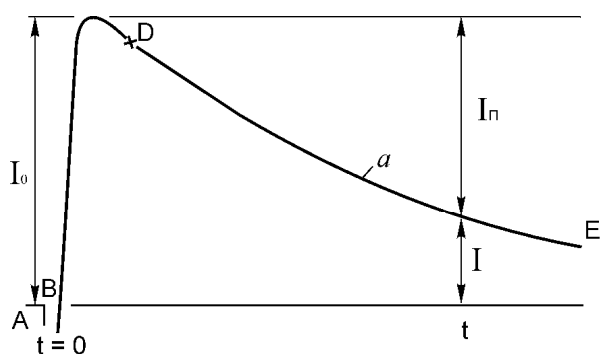


Рис. 1. Блок-схема установки импульсного флуориметра:  
 1 – кювета с исследуемым раствором; 2 – тепловой фильтр; 3 – линза;  
 4 – зондирующий источник света; 5 и 7 – светофильтры; 6 – диафрагма;  
 8 – фотоэлектронный фотоумножитель; 9 – монохроматор; 10 – осциллограф;  
 11 – генератор импульсов; 12 – АЦП; 13 – блок памяти; 14 – компьютер; 15 – ЦАП;  
 16 – самописец; 17 – блок питания зондирующего источника; 18 – блок питания лазера;  
 19 – импульсный лазер АИГ – Nd ( $\lambda=532$  нм и  $\lambda=273$  нм,  $\tau_{1/2}=10$  нс,  $E=70$  мДж);  
 20 – блок управления лазером; 21 – блок питания ФЭУ

Из полученных осциллограмм (рис. 2) после обработки, рассмотренной ниже, были получены константы скоростей дезактивации триплетных состояний люминофоров. Осциллограмма процесса триплет-триплетного поглощения (рис. 2, кривая а) представляет собой зависимость отклонения луча осциллографа, вызванного изменением пропускания раствора на данной длине волны под действием световой вспышки, от времени.

Если обозначить  $I_0$  – интенсивность света, прошедшего через кювету до вспышки (рис. 2, кривая а), а  $I_n$  – интенсивность света, прошедшего через неё к моменту времени  $t$  после вспышки, то разность оптических плотностей раствора до и после импульсного фотовозбуждения  $\Delta D$  определяется по формуле:

$$\Delta D = \lg \frac{I_0}{I_n} . \quad (1)$$



Отношение  $\frac{I_0}{I_n}$  можно заменить отноше-

нием отклонений луча осциллографа, поскольку они пропорциональны интенсивности света. Интенсивность  $I$  света, поглощённого образовавшимися после вспышки молекулами люминофоров в триплетных состояниях, определяется соотношением:  $I=I_0-I_n$ . Учитывая это, изменение оптической плотности раствора равно:

$$\Delta D = \lg \frac{I_0}{I_0 - I} \quad (2)$$

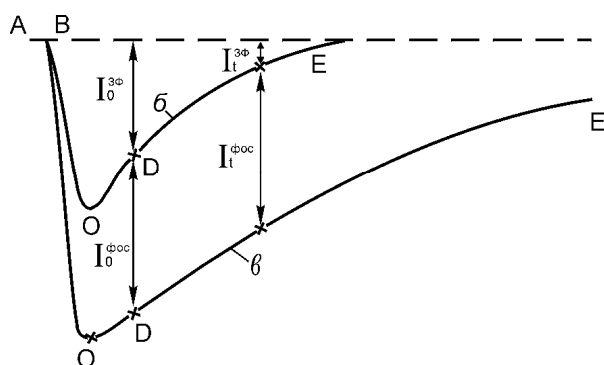


Рис. 2. Типичные осциллограммы дезактивации триплетных молекул люминофоров, зарегистрированные по Т–Т поглощению (а), по затуханию ЗФ (б) и фосфоресценции (в)

Установка, блок-схема которой приведена на рис. 1, применялась также для исследования кинетики дезактивации триплетных состояний люминофоров по затуханию ЗФ и фосфоресценции исследуемых растворов. Типичная осциллограмма затухания длительного свечения приведена на рис. 2, кривые б и в. В случае ЗФ типа Е или фосфоресценции интенсивность регистрируемого свечения пропорциональна концентрации  $[T]$  триплетных молекул. При незначительной концентрации люминофоров, когда концентрационным тушением триплетных молекул можно пренебречь, скорость их дезактивации определяется выражением:

$$\frac{d[T]}{dt} = -\beta[T] - \gamma[T]^2 \quad (3)$$

где  $\beta$  – суммарная константа скорости мономолекулярных и псевдомономолекулярных (тушение примесями) процессов гибели триплетных

молекул;  $\gamma$  – бимолекулярная константа скорости дезактивации триплетных молекул, обусловленная триплет-триплетной аннигиляцией молекул люминофоров. Если триплетные молекулы гибнут в основном в результате реакции первого порядка, то есть  $\beta \gg \gamma [T]$ , то уравнение, описывающее процесс дезактивации энергии триплетных молекул, упрощается:

$$\frac{d[T]}{dt} \cong -\beta[T] \quad (4)$$

Решая уравнение (4) относительно  $[T]$ , получим:

$$[T] \cong [T]_0 e^{-\beta t} \quad (5)$$

где  $[T]_0$  – концентрация триплетных молекул в начальный момент времени.

Перейдем в выражении (5) от концентрации триплетных молекул к оптическим плотностям Т–Т поглощения  $\Delta D = \epsilon_T [T] \ell$ , где  $\epsilon_T$  – коэффициент экстинкции Т–Т поглощения;  $[T]$  – концентрация триплетных молекул;  $\ell$  – длина поглощающего слоя. Тогда выражение (5) запишется следующим образом:

$$\Delta D = \Delta D_0 e^{-\beta t} \quad (6)$$

Логарифмируя (6) с учетом (5), можно записать:

$$2,3 \lg \frac{\Delta D_0}{\Delta D} = \beta t . \quad (7)$$

Следовательно, константа скорости дезактивации энергии триплетных состояний  $\beta$  определяется как угловой коэффициент зависимости (7).

Аналогичным образом обрабатываются осциллограммы затухания интенсивности фосфоресценции триплетных молекул и ЗФ типа  $E$ . Суммарная мономолекулярная константа дезактивации триплетных состояний определялась как угловой коэффициент зависимости  $2,3 \lg \frac{I_0}{I}$  от  $t$ , где  $I_0, I$  – интенсивности свечения в начальный и последующий моменты времени. Для интенсивности ЗФ типа  $E$  известно следующее выражение [7]:

$$I_{3\Phi} \propto [S_1] \propto [T(t)] , \quad (8)$$

откуда

$$I_{3\Phi} \cong A [T]_0 e^{-\beta t} , \quad (9)$$

где  $A$  – аппаратная функция;  $[T]_0$  – концентрация триплетных молекул в начальный момент времени.

Таким образом, обработка осциллограммы, характеризующей изменение  $I_{3\Phi}$  во времени, в координатах  $2,3 \lg \frac{I_{3\Phi}^0}{I_{3\Phi}}$  от  $t$ , позволяет определить суммарную мономолекулярную кон-

станту скорости дезактивации триплетных молекул по кинетике затухания ЗФ. Аналогичным образом обрабатывались осциллограммы зависимости интенсивности фосфоресценции люминофоров от времени после импульсного фотооблучения.

В работе были проведены кинетические исследования особенностей процессов дезактивации энергии электронного возбуждения триплетных состояний молекул люминесцентных зондов, связанных с белками, по сравнению с водными растворами. Люминесцентными зондами служили красители акридинового (трипафлавин, акридин оранжевый), родаминового (родамин В) и ксантенового (эозин, эритрозин) ряда, связанные с белками, в качестве которых были выбраны бычий сывороточный альбумин и сывороточный альбумин человека. При изменении условий эксперимента концентрация триплетных состояний люминофоров, которая отслеживалась по оптической плотности триплет-триплетного поглощения, поддерживалась постоянной.

Установлено, что в качестве люминесцентного зонда для исследований изменений структуры белков наиболее целесообразно применить эозин, относящийся к ксантеновому ряду. Выбор этого красителя обусловлен тем, что он обладает высоким квантовым выходом замедленной флуоресценции и фосфоресценции, продолжительным временем жизни в триплетном состоянии и эффективно связывается с выбранными белками.

Определены константы скорости дезактивации энергии электронного возбуждения триплетных состояний эозина в воде ( $1340 \text{ с}^{-1}$ ) и в водных растворах сывороточного альбумина человека ( $192 \text{ с}^{-1}$ ) при комнатной температуре. Из приведенных значений констант скоростей затухания фосфоресценции эозина можно сделать вывод о значительном возрастании времени жизни триплетных состояний. Кроме того, обнаружено увеличение (на порядок) интенсивности замедленной флуоресценции и фосфоресценции эозина, связанного с белками. Это свидетельствует о жестком закреплении молекул эозина на белках.

Экспериментально установлено, что при добавлении в водный раствор белка поверхностно-активного вещества (ПАВ), в качестве которого были выбраны молекулы додецилсульфата натрия, происходит сокращение времени жизни триплетных состояний и уменьшение интенсивности фосфоресценции эозина. Полученные результаты объясняются изменени-

ем структуры белков под действием молекул ПАВ. Следовательно, кинетика люминесценции зозина позволяет контролировать структурные изменения белков.

В работе проведены исследования влияния тяжелых атомов (таллий, свинец) на излучательные процессы дезактивации триплетных состояний молекул антрацена и 1,2 бензантрацена при лазерном фотовозбуждении. Установлено, что применение эффекта тяжелого атома, для определения ПАУ в водных средах люминесцентными методами с соответствующей пробоподготовкой, позволило значительно (до  $10^{-9}$  М) повысить чувствительность определения 1,2 бензантрацена. Проведенные эксперименты на импульсном флуориметре по определению ПАУ методом сенсibilизированной фосфоресценции, основанным на триплет-триплетном переносе энергии, позволили на два порядка повысить избирательность определения ПАУ по сравнению с регистрацией их фосфоресценции [8].

Таким образом, люминесцентные исследования на импульсном флуориметре с анализом кинетики фотопроцессов позволяют осуществить контроль за состоянием белковых молекул живых организмов, а также могут быть применены для повышения селективности аналитического определения ПАУ в объектах окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриенко С.Г., Косырева О.А., Рунов В.К. Сорбционно-фотометрическое определение кобальта и железа с использованием неполиуретанов // Современные методы аналитического контроля на промышленных предприятиях: Сб. трудов. М., 1991. С.64-66.
2. Паркер С. Фотолюминесценция растворов. М.: Мир, 1972. 476 с.
3. Демченко А.П. Люминесценция и динамика структуры белков. Киев: Наукова думка, 1988. 276 с.
4. Мажуль В.М., Зайцева Е.М., Щербин Д.Г. Внутримолекулярная динамика и функциональная активность белков // Биофизика. 2000. Т.45, В.6. С.965-989.
5. Методы исследования быстрых реакций / Под общ. ред. Г. Хеммиса. М.: Мир, 1979. 716 с.
6. Чибисов А.К. Применение импульсного фотолиза для исследования триплетных состояний органических веществ // Успехи химии. 1970. Т.39. № 5. С.1886-1911.
7. Parker C.A., Hatchard C.G. Delayed Fluorescence from Solutions of Anthracene and Phenanthren // Proc. Roy. Soc. 1962. V.296 A. № 1339. P.574-584.
8. Мельников Г.В., Горячева И.Ю., Штыков С.Н. Фосфоресценция при комнатной температуре, сенсibilизированная триплет-триплетным переносом энергии в мицеллах додецилсульфата натрия // Доклады Российской Академии наук. 1998. Т.361. № 1. С.72-73.

#### **Мельников Геннадий Васильевич –**

доктор химических наук, профессор кафедры «Прикладная физика»  
Саратовского государственного технического университета

#### **Лобачев Михаил Игнатьевич –**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
научно-исследовательского института точной механики и управления, г. Саратов

#### **Мельников Андрей Геннадиевич –**

студент Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

УДК 678:661.183.123

**А.М. Михайлова, Л.В. Никитина, Е.В. Колоколова****ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР НА ОСНОВЕ  
ПРОТОНПРОВОДЯЩИХ ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ**

*Создан электрохимический газоанализатор, предназначенный для контроля концентрации взрывоопасного газа ацетилена в масляной среде энергетического оборудования. Представлена конструкция такого датчика, дана характеристика электродных масс и электролита. Предложена схема механизма гетерогенной каталитической реакции на металлическом электроде с участием ацетилена.*

**A.M. Mikhailova, L.V. Nikitina, E.V. Kolokolova****THE ELECTROCHEMICAL GAS-ANALYZER ON THE BASIC PROTON  
CONDUCTIVE OF THE SOLID ELECTRODES**

*The electrochemical gas-analyzer was created for explosive gas concentration control of acetylene in the oil of energy equipment. The construction of this sensor, the characteristic of the electrolyte and electrodes masses are presented here. The device of mechanism for heterogenic catalytic reaction on metallic electrode with participate acetylene is proposed.*

Анализ аварийности маслонаполненного оборудования, имеющего изоляцию маслобарьерного или бумажно-масляного типа показывает, что основной причиной отказа его работы является нарушение изоляции. Это сопровождается разложением ее на молекулярном уровне либо с образованием твердых, за счет механических воздействий, примесей: волокна целлюлозы, осадков и др.; либо с образованием газообразных продуктов за счет термохимических процессов и частичных электрических разрядов. Основными газовыми компонентами, выделяющимися в масляную среду трансформатора, являются: водород ( $H_2$ ); углеводороды: метан ( $CH_4$ ), ацетилен ( $C_2H_2$ ), этилен ( $C_2H_4$ ) этан ( $C_2H_6$ ); кислород ( $O_2$ ); оксиды углерода  $CO$  и  $CO_2$ ; азот ( $N_2$ ). Согласно данным табл.1, состав газа связан с появлением определенного вида дефекта.

Существуют различные методики для диагностики развивающихся дефектов в маслонаполненном оборудовании (физико-химический анализ масла, диэлькометрические методы, измерение температуры внешней поверхности аппаратов, определение влажности масла, электрической прочности масла и др.). Благодаря этим методам в энергосистеме удастся значительно сократить число аварий, но все же они имеют существенный недостаток: все эти методы могут быть реализованы либо в условиях специально оборудованных физико-химических лабораторий, либо с использованием передвижных высоковольтных лабораторий.

Гораздо удобнее для анализа так называемые экспресс-методы диагностики развивающихся дефектов, которые позволяют проводить измерения некоторых параметров изоляции непосредственно около установленного оборудования без использования сложных контролирующих приборов, в полевых условиях, автономно.

Зависимость характеристики дефекта от состава газовой компоненты

Состав растворенных в масле газов	Вероятные причины появления газов
CO <sub>2</sub> , CO	Трансформатор перегружен; высокая влажность масла; термический дефект, затрагивающий твердую изоляцию
H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	Частичные разряды в масле
H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> – основные газы)	Дуговой разряд высокой энергии, вызывающий разложение масла
H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CO и CO <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> – основные газы)	Высокотемпературное дугообразование, затрагивающее твердую изоляцию
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , CO и H <sub>2</sub> (CO <sub>2</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> – основные газы)	Термический дефект, затрагивающий твердую изоляцию (температура в зоне нагрева до 300°C)

Данная работа посвящена созданию газоанализатора, удовлетворяющего вышеперечисленным условиям контроля масляной среды.

Измерительная цепь, положенная в основу работы датчика, служит для контроля физического явления или химической реакции непрерывно или периодически.

Датчик состава газов должен быть, по мере возможности, избирательным (селективным), реверсивным, точным, быстродействующим (время срабатывания не более 1-3 минут), чувствительным в широком диапазоне концентраций (от  $10^{-4}$  до 100% объема), инертным к условиям окружающей среды, недорогим, миниатюрным. Датчик неотделим от электроники (или оптики) измерения, которые могут обеспечить регистрацию свойств: набор датчиков с малой избирательностью, но с моделированным временем срабатывания может стать избирательным датчиком с универсальными свойствами с использованием микропроцессора. Датчик непрерывного действия, не обладающий достаточной точностью из-за дрейфа, со временем может стать надежным благодаря периодическому опросу.

В основу создания электрохимических датчиков положено использование электрохимической ячейки, включающей чувствительный (рабочий) электрод; электролит в жидкой или твердой фазе и электрод сравнения. Регистрирующий электрический сигнал можно получить при функционировании измерительной ячейки в амперометрическом или потенциометрическом режиме за счет протекания электрохимической реакции на границе трех фаз с участием молекул детектируемого газа – диэлектрика, ионного проводника – электролита и электронного проводника рабочего электрода [1,2].

Наиболее предпочтительно использование электрохимического газоанализатора в потенциометрическом режиме с использованием открытых в конце 60-х годов твердых электролитов, для которых характерен быстрый ионный перенос в твердой фазе. Величина электропроводности их соизмерима со значением электропроводности водных растворов сильных кислот и щелочей и лежит в пределах  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  См/см в соответствующем для основного подвижного иона температурном диапазоне [3]. В потенциометрическом режиме измерительная цепь выдает сигнал без потребления энергии, поскольку потенциал измерительного электрода является функцией концентрации определяемого газообразного вещества, а потенциал электрода сравнения не должен зависеть от состава измеряе-



мой фазы. В этом случае ЭДС цепи может служить мерой этой концентрации. Эффективное функционирование газового датчика зависит от оптимального выбора как электродов, так и твердого электролита.

В данной работе исследовалась возможность создания и использования датчиков на газ ацетилен с использованием твердого протонного электролита.

Основные критерии выбора твердого электролита с проводимостью по протонам  $H^+$  можно сформулировать следующим образом:

- 1) минимальное внутреннее сопротивление датчика и минимальная его зависимость от температуры; максимальная ионная проводимость твердого электролита;
- 2) низкий саморазряд датчика, минимальная электронная составляющая проводимости твердого электролита, что обеспечивает минимальный дрейф потенциала;
- 3) поскольку продуктом электродного процесса в большинстве случаев при определении перечисленных выше газов является  $H_2O$ , и влажность воздуха колеблется в довольно широких пределах, твердый электролит должен быть достаточно индифферентен по отношению к парам  $H_2O$ .

Выбор материала рабочего электрода, так же как и электрода сравнения, определяется требованием стабильности и быстрого установления потенциала при изменении концентрации измеряемой компоненты в газовой фазе. Если проводятся измерения концентрации газовой компоненты на фоне инертного газа-разбавителя, то оба эти требования выполняются при достижении минимальной поляризуемости, то есть максимального тока обмена реакции его окисления-восстановления.

Известно, что наиболее высокие токи обмена для водорода и углеводов имеют металлы платиновой группы. Pt, Pd и др, а также Ni.

Газовые датчики готовили путем последовательного прессования в корпус из текстолита или фторопласта слоя твердого электролита с проводимостью по протону и двух электродов: электрода сравнения и рабочего электрода. Схема датчика представлена на рис. 1.

Для сенсора на ацетилен в качестве электролита использовали кислые соли сульфосалициловой кислоты ( $C_7H_6O_6S \cdot H_2O$ ). Количество воды в твердых гидратах контролировали методом дифференциально-термического анализа с помощью дериватографа Pauling-Pauling Erdejy.

К одной стороне таблетки электролита припрессовывали электрод сравнения. В качестве исходного материала использовали оксид Ni и оксид свинца марки х.ч.

Для измерения разности потенциалов – ЭДС использовали электронный усилитель У5-11 и А7-21 и цифровой вольтметр Щ-3 00; а также блок высокоомного вольтметра потенциостата П-5848. Запись временных откликов на химические газовые импульсы осуществляли с помощью электронного самописца КСП-4.

Результаты измерения зависимости изменения ЭДС ( $\Delta E$ ) от концентрации исследуемого газа с использованием вышеописанной ячейки в воздушной среде представлены в виде калибровочных кривых на рис. 2 и 3.

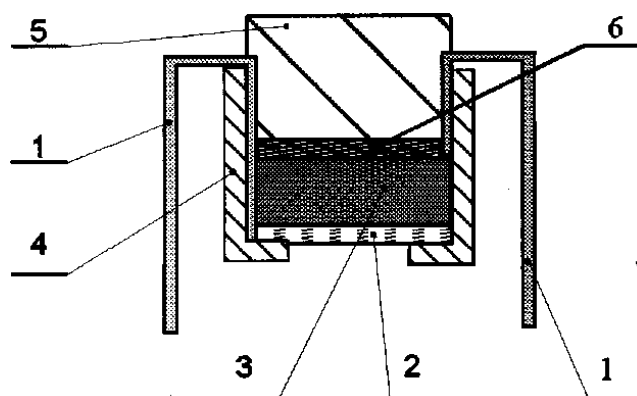


Рис. 1. Газоанализатор:  
1 – токоотводы; 2 – рабочий электрод;  
3 – твердый электролит; 4 – корпус ячейки  
(фторопласт); 5 – прокладка;  
6 – электрод сравнения

В интервале высоких концентраций исследуемых газов (1–10% об.) существует линейная зависимость  $\Delta E$  ячеек от логарифма концентрации (рис. 2), но для газов  $H_2$  и  $CO$  изменение потенциала в этом диапазоне концентраций меньше на порядок и более.

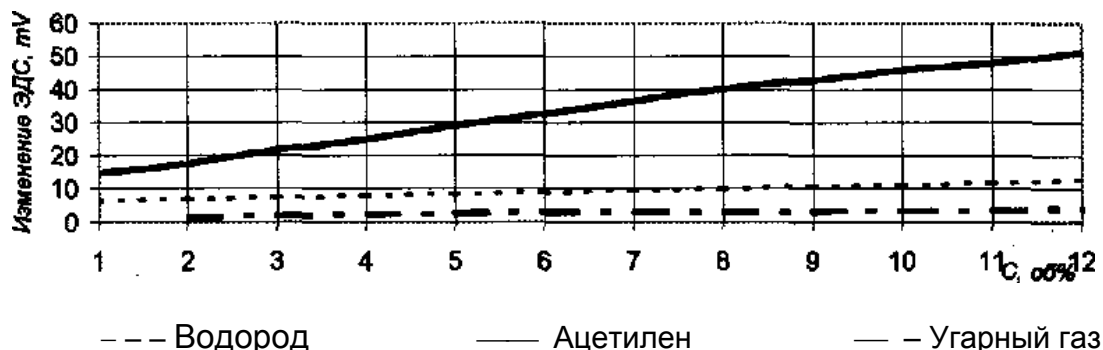


Рис. 2. Зависимость  $\Delta E$  ячеек от логарифма концентрации

В области низких концентраций, в диапазоне  $10^{-4}$ – $10^{-1}$ % об., зависимость  $\Delta E$  от  $lg C$  (рис. 3) для газа ацетилена имеет линейный характер

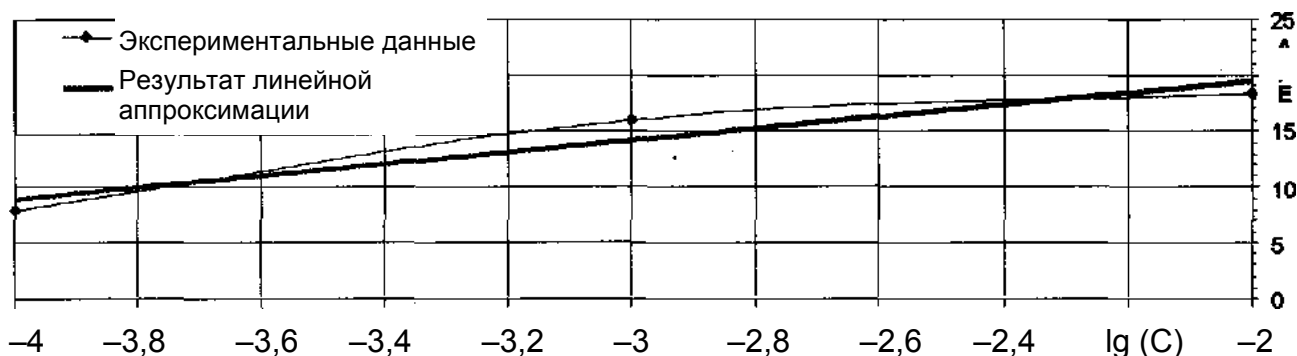


Рис. 3. Зависимость  $\Delta E$  от  $lg C$  в области низких концентраций

Распределенный по углеродной поверхности никель, используемый в качестве рабочего электрода, наибольшую активность проявил по отношению к ацетилену. Скорость электродной реакции, определяемая тангенсом угла наклона  $\Delta E / lg C$ , для каждого газа соответственно равна:

Таблица 2

Значения угловых коэффициентов для различных газов

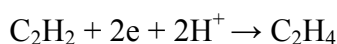
Газ	$H_2$	$C_2H_2$	$CO$
$tg \alpha$	5	30	2,5

На металлическом никеле может протекать каталитический процесс гидрирования ацетилена в соответствии с предполагаемыми стадиями предварительной адсорбции:

1.  $C_2H_2_{газ} \rightarrow (C_2H_2)_{адс}$
2.  $H_{2газ} \rightarrow 2(H)_{адс}$
3.  $(C_2H_2)_{адс} + (H) \rightarrow (C_2H_3)_{адс}$
4.  $(C_2H_3)_{адс} + (H)_{адс} \rightarrow (C_2H_4)_{газ}$

Данный механизм гетерогенной каталитической реакции на металлах представлен схемой Хориучи-Поляни. При этом поверхность катализатора (в нашем случае – никеля) покрывается за счет диссоциативной адсорбции ацетилена прочно связанными углеродистыми остатками ( $C_xH_y$ ). Адсорбция ацетилена, по-видимому, может происходить не на поверхности чистого металла, а на поверхности этих углеродистых остатков. В нашем случае водород в виде иона непосредственно подается из твердого электролита как основной подвижный ион к активному адсорбированному комплексу, а может частично быть в восстановленной форме  $H_2$ . Стадии 3 и 4 соответствуют гидрированию адсорбированной молекулы ацетилена поверхностными соединениями  $C_xH_{y+1}$ . Протекание электрохимических реакций может изменить природу углеродистых остатков на поверхности Ni и, тем самым, влиять на активные центры, то есть на каталитические свойства.

Если учесть, что при протекании основной потенциалобразующей реакции:



участвуют 2 электрона, то согласно уравнению Нернста

$$E = E^\circ + (RT/nF) \cdot \lg [C_2H_2],$$

угловой коэффициент  $RT/nF$  должен быть равен 29 мВ при изменении концентрации на порядок. Согласно табл. 2 угловой коэффициент близок к этому значению в случае, если определяемым газом является ацетилен. Таким образом, данная ячейка является датчиком на ацетилен и имеет нернстовский тип зависимости формирования скачка потенциала. Чувствительность датчика к основным сопутствующим появлению дефектов газам  $H_2$  и CO меньше на порядок.

Следовательно, с помощью разработанных датчиков можно селективно определять ацетилен.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yoo K.-S., Jung H.-I. Gas-sensing characteristics of semiconducting materials based on  $In_2O_3$  depending on composition changes // Sensors and Actuators. 1987. 12. P.285-290.
2. Oyaby T., Ohta Y., Kurobe T. Tin oxide gas sensor and countermeasure system against accidental gas leaks // 1986. 9. P.301-312.
3. Mikhailova A., Spuk I., Nikitina L. Change of Structure of Electrical Double Layer on the Interface Electrode // Solid Electrolyte by Addition of the Solvents into the System and Influence of Mechanical Changes: Abstracts of 12<sup>th</sup> International conference on Solid State Ionics. Creese, 1999. P.645-647.

**Михайлова Антонина Михайловна –**

доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химия»  
Саратовского государственного технического университета

**Никитина Людмила Васильевна –**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия»  
Саратовского государственного технического университета

**Колоколова Елена Викторовна –**

аспирант кафедры «Химия»  
Саратовского государственного технического университета

**Б.К. Сивяков, Ю.А. Беляева**

### **ТЕОРИЯ СПИРАЛЬНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С АЗИМУТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫМ ЭКРАНОМ**

*Развита теория спиральной замедляющей системы с азимутально-неоднородным экраном, основанная на использовании метода дискретизации ЗС в азимутальной плоскости в сочетании с методами эквивалентной схемы и длинной линии, а также модели спирально-проводящего цилиндра. Параметры линии определяются суммированием частичных параметров однородных секторов поперечного сечения ЗС. Учтены размеры ленточной спирали, межвитковая емкость и краевой эффект металлических ребер. Разработана программа проектирования спиральных замедляющих систем. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных характеристик спиральной ЗС с азимутально-неоднородным экраном.*

**B.K. Sivyakov, Ju.A. Belyaeva**

### **THE HELICAL SLOW-WAVE STRUCTURE THEORY WITH THE AZIMUTH INHOMOGENEOUS SHIELD**

*The theory of helical slow-wave structure with the azimuth inhomogeneous shield is described in the article. The theory is based on combination of helical SWS quantization in the azimuth plane method with the method of equivalent long line. Parameters of the line are determined as a sum of partial parameters of homogeneous sectors of SWS transverse cross-section. The accuracy of formulas is increased by account of helical tape thickness, of interwires capacitance and of metal ribs regional effect. The program of helical slow-wave structures design is developed. The comparisons of the theoretical and experimental characteristics of helical SWS with the inhomogeneous and azimuth shield have been done here in this article.*

#### **Введение**

В сверхширокополосных ЛБВ с полосой частот в полторы октавы и более для обеспечения слабой аномальной дисперсии применяют спиральные замедляющие системы (ЗС) с азимутально-неоднородным экраном [1]. Азимутальная неоднородность образована продольными ребрами на внутренней поверхности цилиндрического экрана. Для крепления спирали в экране используются диэлектрические стержни с различной конфигурацией поперечного сечения, которые также создают азимутальную неоднородность окружающего спираль пространства.

Проектирование подобных ЗС вызывает определенные трудности. Применяемые в настоящее время аналитические методы анализа ЗС не позволяют рассчитывать характеристики в широкой полосе частот, а численные модели требуют огромных затрат времени и ресурсов ЭВМ и находятся в стадии развития. Термин «аналитическая теория» является до-

статочным. Он отражает тот факт, что для основных параметров ЗС: замедления, сопротивления связи и затухания получены алгебраические уравнения или аналитические выражения, однако для их вычисления применяются ЭВМ.

В данной статье излагается аналитическая теория спиральной ЗС с азимутально-неоднородным экраном, основанная на использовании предлагаемого метода дискретизации спиральной замедляющей системы в азимутальной плоскости в сочетании с методами эквивалентной схемы и длинной линии, а также модели спирально-проводящего цилиндра.

### 1. Метод дискретизации

Неоднородное в азимутальной плоскости пространство замедляющей системы разбивается на  $N$  секторов, в пределах каждого из которых его можно считать однородным. Для каждого сектора вычисляются эквивалентные частичные погонные индуктивность спирали  $L_n$ , емкости спираль-экран  $C_n$  и межвитковая спирали  $C_{Ln}$ , сопротивления спирали  $r_{Ln}$  и потеря в диэлектрике  $r_{Cn}$ , проводимости межвитковая  $g_{Ln}$  и спираль-экран  $g_{Cn}$ , как части соответствующей спиральной системы с однородным экраном [2].

Соответственно, параметры эквивалентной длинной линии определяются следующими выражениями:

$$L = \sum_{n=1}^N L_n ; \quad C = \sum_{n=1}^N C_n ; \quad C_L = \sum_{n=1}^N C_{Ln} ; \quad G_C = \sum_{n=1}^N g_{Cn} ; \quad G_L = \sum_{n=1}^N g_{Ln} ;$$

$$R_C = \frac{\sum_{n=1}^N (r_{Cn} / x_{Cn}^2)}{\sum_{n=1}^N (1 / x_{Cn}^2)} ; \quad R_L = \sum_{n=1}^N r_{Ln} .$$

Здесь выражения для  $C$  и  $R_C$  получены для случая малых потерь в диэлектрике.

Частичные индуктивность и емкость сектора пропорциональны углу сектора. Для ЗС с однородным диэлектриком:

$$L_n = k_{mn} \cdot \frac{\varphi_n}{360} \cdot L_{0c} \cdot [1 - k_{Ln}^2 (\gamma a, \gamma r_n)] ;$$

$$C_n = \frac{\varphi_n}{360} \cdot C_{0c} \cdot \left[ \frac{1}{[1 - k_{Cn}^2 (\gamma a, \gamma k_{\varepsilon n} r_n)]} [1 + (\varepsilon_n - 1) \cdot D(\gamma a)] \right] ,$$

где  $\varphi_n$  – угловой размер сектора в градусах;  $\varepsilon_n$  – диэлектрическая проницаемость сектора;  $k_{\varepsilon n}$  и  $k_{mn}$  – коэффициенты экранировки электрического и магнитного полей в пазах между ребрами экрана;  $L_{0c}$  и  $C_{0c}$  – эквивалентные погонные индуктивность и емкость спирали в свободном пространстве [3].

$$L_{0c} = \left[ 1 + \left( \frac{k}{\gamma} \right)^2 \right] \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \text{ctg}^2 \psi \cdot I_1(\gamma a) \cdot K_1(\gamma a) ; \quad C_{0c} = \frac{2\pi \varepsilon_0}{I_0(\gamma a) \cdot K_0(\gamma a)} ,$$

где  $I_n(x)$ ,  $K_n(x)$  – модифицированные функции Бесселя и Ханкеля.

Для ЗС со слоистым неоднородным диэлектриком может быть применено следующее выражение для вычисления частичной емкости сектора [4]:

$$C_n = \frac{\varphi_n}{360} \cdot C_{0c} \cdot \frac{P}{Q} ,$$

где  $P = (\gamma a \cdot K_0(\gamma a)) \cdot [(1 - \varepsilon_{r,1}) \cdot I_0(\gamma a) \cdot I_1(\gamma a) \cdot \alpha_1 + (I_1(\gamma a) \cdot K_0(\gamma a) + \varepsilon_{r,1} \cdot I_0(\gamma a) \cdot K_1(\gamma a)) \cdot \beta_1]$  ;  
 $Q = I_0(\gamma a) \cdot \alpha_1 + K_0(\gamma a) \cdot \beta_1$ .

Значения  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  вычисляются по формулам:

а) Для  $1 \leq p \leq S-2$ , где  $p$  – номер слоя и  $S$  – число слоев,

$$\alpha_p = (\varepsilon_{r,p} \cdot I_0(\gamma r_p) \cdot K_1(\gamma r_p) + \varepsilon_{r,p+1} \cdot I_1(\gamma r_p) \cdot K_0(\gamma r_p)) \cdot \alpha_{p+1} + (\varepsilon_{r,p} - \varepsilon_{r,p+1}) \cdot K_0(\gamma r_p) \cdot K_1(\gamma r_p) \cdot \beta_{p+1};$$

$$\beta_p = (\varepsilon_{r,p} - \varepsilon_{r,p+1}) \cdot I_0(\gamma r_p) \cdot I_1(\gamma r_p) \cdot \alpha_{p+1} + (\varepsilon_{r,p} \cdot I_1(\gamma r_p) \cdot K_0(\gamma r_p) + \varepsilon_{r,p+1} \cdot I_0(\gamma r_p) \cdot K_1(\gamma r_p)) \cdot \beta_{p+1};$$

б) Для  $p=S-1$

$$\alpha_p = \alpha_{S-1} = \left[ \varepsilon_{r,S} \left( 1 + \frac{I_1(\gamma r_{S-1}) \cdot K_0(\gamma r_S)}{K_1(\gamma r_{S-1}) \cdot I_0(\gamma r_S)} \right) - \varepsilon_{r,S-1} \left( 1 - \frac{I_0(\gamma r_{S-1}) \cdot K_0(\gamma r_S)}{K_0(\gamma r_{S-1}) \cdot I_0(\gamma r_S)} \right) \right] \cdot K_0(\gamma r_{S-1}) \cdot K_1(\gamma r_{S-1});$$

$$\beta_p = \beta_{S-1} = - \left[ \varepsilon_{r,S} \cdot I_0(\gamma r_{S-1}) \cdot K_1(\gamma r_{S-1}) \cdot \left( 1 + \frac{I_1(\gamma r_{S-1}) \cdot K_0(\gamma r_S)}{K_1(\gamma r_{S-1}) \cdot I_0(\gamma r_S)} \right) + \varepsilon_{r,S-1} \cdot I_1(\gamma r_{S-1}) \cdot K_0(\gamma r_{S-1}) \cdot \left( 1 - \frac{I_0(\gamma r_{S-1}) \cdot K_0(\gamma r_S)}{K_0(\gamma r_{S-1}) \cdot I_0(\gamma r_S)} \right) \right].$$

Приведенные выше формулы были получены для модели спирально-проводящего цилиндра.

## 2. Учет краевых емкостей ребер экрана, межвитковой емкости и эффективного радиуса спирали

Точность расчета ЗС повышена путем учета толщины ленточной спирали в виде межвитковой емкости, не учитываемой в модели спирально-проводящего цилиндра, и краевого эффекта металлических ребер.

В сильно нагруженной ребрами спирали боковой емкостью ребер пренебречь нельзя. Поэтому учет краевого эффекта осуществляется путем разбиения боковых стенок ребер на  $M$  равных частей. Каждый отрезок длиной  $h_p$  представляется в виде дуги определенного радиуса. Таким образом, осуществляется разворот боковой поверхности ребра и эквивалентная замена ее радиально-ступенчатой поверхностью (рис. 1). Величина радиуса ступеньки определяется длиной силовой линии к середине соответствующего отрезка боковой поверхности, что позволяет, конечно, приближенно, сохранить значение емкости.

Для определения радиуса и угла  $m$ -го сектора предлагаются следующие выражения:

$$R_m = a + \Delta g + 2(m-1) \cdot h_p + h_p/2; \quad \varphi_m = h_p/R_m,$$

где  $a$  – средний радиус спирали;  $\Delta g$  – зазор между спиралью и ребром;  $m=1,2,3,\dots,M$  – номер участка разбиения боковой поверхности ребра.

Число эквивалентных секторов  $m'$  находится из условия  $R_m \geq R_{\text{экрана}}$

или

$$2(m'-1) \cdot h_p + h_p/2 = M \cdot h_p,$$

откуда

$$m' = \text{Int} (M/2 + 0,75) .$$

Такой подход позволяет определить значение коэффициента экранировки электрического поля в каждом секторе.

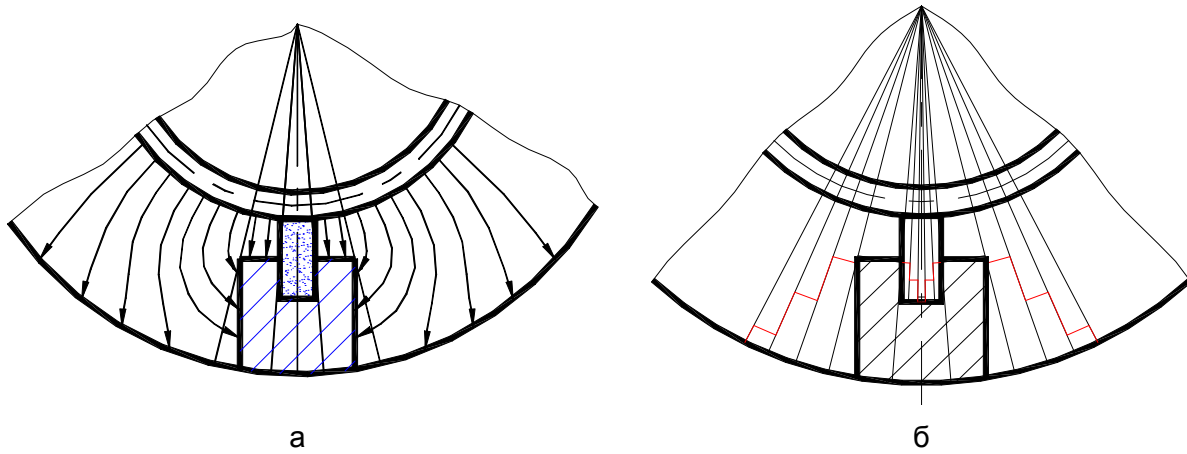


Рис. 1. Поперечное сечение ЗС с разбиением по секторам: а – без учета; б – с учетом краевой емкости ребра (42 сектора)

Для вычисления межвитковой емкости представим два соседних витка спирали как плоский конденсатор. Тогда

$$C_a = 2\pi\epsilon_0 \cdot \frac{a \cdot t}{h^2 (\cos \psi - \delta/h)} .$$

Здесь  $a$  – средний радиус спирали;  $h$  – шаг между витками спирали;  $\psi$  – угол наклона спирали к оси;  $\delta$  – ширина ленты.

Эффективный радиус  $a_e$  спирально-проводящего цилиндра, моделирующего реальную ленточную спираль, может быть определен следующим образом [5] из условия равенства продольных составляющих электрического поля по обе стороны ленты (рис. 2):

$$E_{z1} |_{x=t_1} = E_{z2} |_{x=-t_2} ;$$

$$a_e = a + \frac{t}{2} \cdot e^{-2\gamma_j g_j} ,$$

где  $a$  – средний радиус спирали;  $t$  – толщина ленточной спирали;  $\gamma_j$  – постоянная распространения вдоль оси  $x$   $j$ -й спирали;  $g_j$  – зазор между спиралью и металлическим экраном.

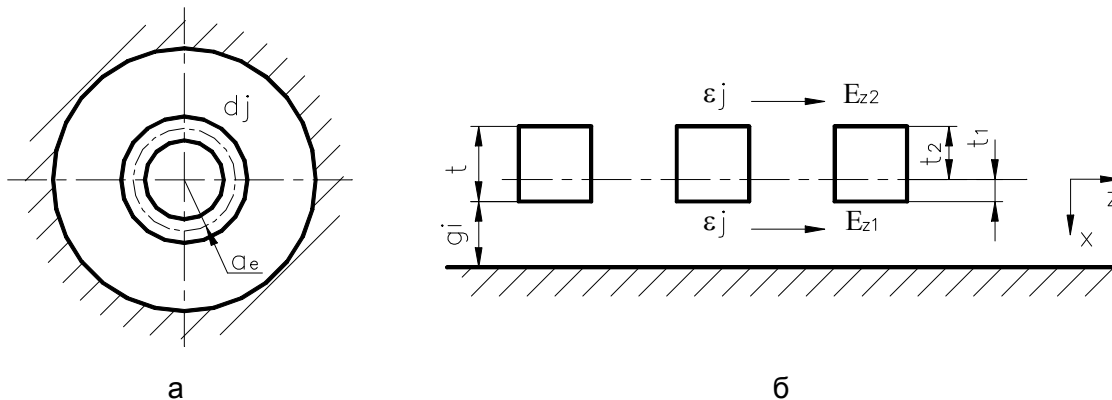


Рис. 2. Эффективный радиус ленточной спирали: а – поперечное сечение; б – ленточная спираль

Приведенные формулы позволяют вычислить реактивные параметры эквивалентной длинной линии. Диссипативные параметры могут быть определены аналитически или экспериментально.

### 3. Расчет характеристик спиральной замедляющей системы

Продольная фазовая постоянная  $\beta$ , постоянная затухания  $\alpha$  и волновое сопротивление  $Z_B$  волны в длинной линии определяются следующими известными выражениями [6]:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} (z_0 y_0 + \omega^2 L_0 C_0 - r_0 g_0)}; \quad \alpha = \sqrt{\frac{1}{2} (z_0 y_0 + r_0 g_0 - \omega^2 L_0 C_0)}; \quad Z_B = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} \cdot e^{j\vartheta},$$

где  $\vartheta = \frac{1}{2} \arctg \frac{\omega(g_0 L_0 - r_0 C_0)}{r_0 g_0 + \omega^2 L_0 C_0}$ ;  $L_0$  и  $r_0$  – продольные индуктивность и сопротивление;  $C_0$  и  $g_0$  – поперечные емкость и проводимость;  $z_0 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}$  – модуль продольного комплексного сопротивления  $Z_0 = r_0 + j\omega L_0$ ;  $y_0 = \sqrt{g_0^2 + \omega^2 C_0^2}$  – модуль поперечной комплексной проводимости  $Y_0 = g_0 + j\omega C_0$ ;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота.

Использованные здесь погонные параметры могут быть выражены через введенные выше параметры эквивалентной ЗС длинной линии:

$$L_0 = \frac{R_L^2 L + \omega^2 L^3 - C_L R_L^4 - 2\omega^2 L^2 R_L^2 C_L - \omega^4 L^4 C_L}{(G_L R_L^2 + \omega^2 L^2 G_L + R_L)^2 + \omega^2 (C_L R_L^2 + \omega^2 L^2 C_L - L)^2}; \quad C_0 = \frac{C}{\omega^2 C^2 R_C^2 + 1};$$

$$r_0 = \frac{G_L R_L^4 + R_L^3 + 2\omega^2 L^2 G_L R_L^2 + \omega^4 L^4 G_L + \omega^2 L^2 R_L}{(G_L R_L^2 + \omega^2 L^2 G_L + R_L)^2 + \omega^2 (C_L R_L^2 + \omega^2 L^2 C_L - L)^2};$$

$$g_0 = \frac{\omega^2 C^2 R_C^2 G_C + \omega^2 C^2 R_C + G_C}{\omega^2 C^2 R_C^2 + 1}.$$

Коэффициенты замедления  $K_3$  и затухания  $L$  электромагнитной волны в ЗС определяются постоянными  $\beta$  и  $\alpha$ :

$$K_3 = \frac{c}{v_\phi} = \frac{c}{\omega} \cdot \beta; \quad L[\text{дБ}] = 8,69 \alpha.$$

Постоянные  $\beta$  и  $\alpha$  находятся в результате решения системы трансцендентных уравнений методом итераций.

Усредненное по сечению электронного потока сопротивление связи выражается через частичные сопротивления связи секторов, на которые разбивается ЗС:

$$Z = \left[ \sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_2} + \dots + \sqrt{Z_N} \right]^2,$$

где  $Z_n = \left[ \frac{\Phi_n}{2\pi} \sqrt{Z_{n0}} \right]^2$  – частичное сопротивление связи  $n$ -го сектора;  $Z_{n0}$  – усредненное сопротивление связи соответствующей однородной ЗС.

Сопротивление связи однородной ЗС находится с помощью модели спирально-проводящего цилиндра. Для учета влияния размеров проводника ленточной спирали на сопротивление связи воспользуемся результатами, приведенными в [7]. Предполагается, что сопротивление связи реальной спиральной ЗС  $Z_{n0}$  настолько же отличается от сопротивления



связи эквивалентной ей модели спирально-проводящего цилиндра  $Z_{n0спц}$ , насколько сопротивление связи многопроводной линии отличается от сопротивления связи соответствующей ей анизотропно-проводящей плоскости, для которых получено аналитическое выражение коэффициента  $\alpha_Z$ , учитывающего ширину ленты проводника спирали. В этом случае

$$Z_{n0} = \alpha_Z Z_{n0спц} .$$

Здесь

$$\alpha_Z = \frac{\sin q\pi}{q\pi P_{-q}(\cos\theta)P_{-q}(\cos\theta')} ,$$

где  $P_{-q}(\cos\theta)$  и  $P_{-q}(\cos\theta')$  – функции Лежандра;  $\theta'=\pi-\theta$ ;  $\theta=\pi\delta / (h \cos \psi)$ ;  $q=\beta a \cos \psi \sin \psi$ .

На основании изложенной теории была разработана программа проектирования спиральных замедляющих систем. Она позволяет рассчитывать частотные характеристики замедления, усредненного по сечению цилиндрического электронного потока сопротивления связи, волнового сопротивления и затухания электромагнитного поля.

По данной программе была рассчитана дисперсионная характеристика ЗС с каналом  $d=3,8$  мм, радиусом экрана  $R=3,95$  мм, средним радиусом спирали  $a=2,05$  мм, шагом спирали  $p=1,4$  мм, зазором между спиралью и ребром  $\Delta g=0,45$  и диэлектрическим стержнем  $0,4 \times 0,9$  мм. Конструкция ЗС с разбиением по секторам представлена на рис. 1,б. В приведенной модели было учтено влияние краевых емкостей металлических ребер экрана и эффективного радиуса спирали. Результаты расчетов и данные, полученные экспериментально в НПЦ «Электронные системы», приведены на рис. 3. Сравнение результатов свидетельствует об адекватности разработанной математической модели в широкой полосе частот.

Таким образом, развита аналитическая теория и построена математическая модель спиральной замедляющей системы с азимутально-неоднородным экраном с учетом размеров ленточной спирали, краевого эффекта металлических ребер и влияния межвитковой емкости, а также различных видов потерь. Разработана программа, обеспечивающая математическое моделирование подобных замедляющих систем для сверхширокополосных ЛБВ.

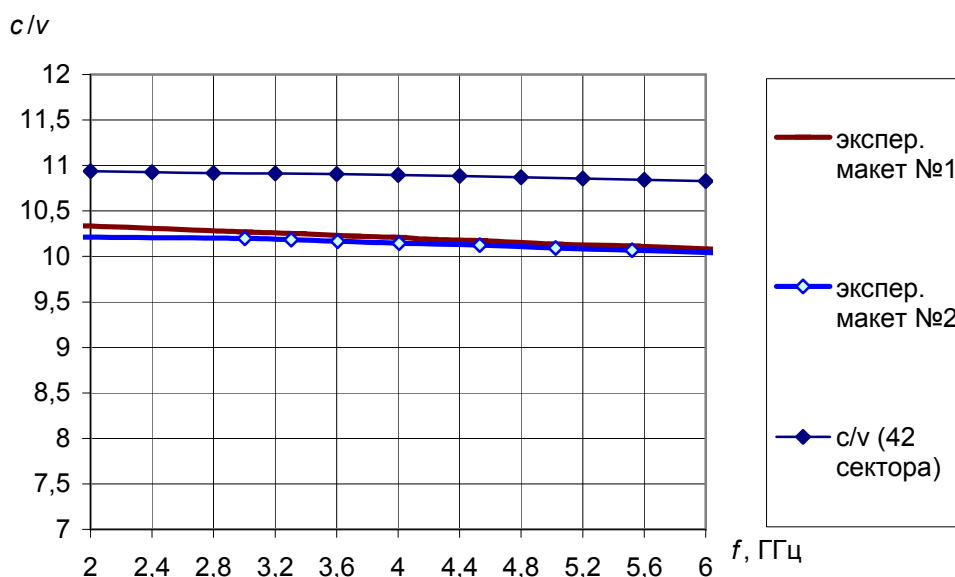


Рис. 3. Дисперсионные характеристики ЗС

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности проектирования широкополосных ламп бегущей волны с аномальной дисперсией и экспериментальные результаты / А.Б. Данилов, Е.М. Ильина, В.В. Пензяков и др. // Радиолокация, навигация, связь: Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2000. Т.3. С.2022-2028.
2. Математическое моделирование спиральных замедляющих систем с азимутально-неоднородным пространством / Б.К. Сивяков, Ю.А. Беляева, С.В. Печерский и др. // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2002. С.112-117.
3. Paik S.F. Design Formulas for Helix Dispersion Shaping // IEEE Transaction on Electron Devices. 1969. Vol. ED 16, № 12. P.1010-1014.
4. Basu B.N., Sinha A.K. Dispersion-Shaping Using Inhomogeneous Dielectric Support for the Helix in a Traveling-Wave Tube // Int. J. Electronics, 1981. Vol.50, № 3. P.235-238.
5. Onodera T., Raub W. Phase Velocity Dispersion of a Generalized Metal-Segment-Loaded Helix as Used in Broad-Band Traveling-Wave Tubes // IEEE Trans. on Electron Devices. 1988. V.35, № 4. P.533-538.
6. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Иокин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. М.: Энергоиздат, 1989. 528 с.
7. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966. 632 с.

**Сивяков Борис Константинович –**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Электротехника и электроника»  
Саратовского государственного технического университета

**Беляева Юлия Александровна –**

аспирантка кафедры «Электротехника и электроника»  
Саратовского государственного технического университета

---

# ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

---

УДК 621.165

**А.И. Андриющенко****СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ  
И ВАЖНЕЙШИЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

*Приведены неотложные задачи реконструкции и создание новых ТЭС и систем теплоснабжения городов. Указаны важнейшие пути решения этих проблем и участие в них преподавателей кафедры теплоэнергетики и научных сотрудников проблемной лаборатории*

**A.I. Andryushchenko****MODERN PROBLEMS OF POWER SYSTEM  
AND THE MAJOR WAYS OF THEIR SOLUTION**

*Urgent tasks of reconstruction and creation of new Thermal power stations and systems of heat supply of cities are given. Major ways of the decision of these problems and participations in them the thermal energy department teachers and problem laboratory scientific employees.*

Теплоэнергетика, как отрасль знаний и промышленного производства, охватывает вопросы теории и практики выработки, преобразования и использования тепловой энергии во всех отраслях народного хозяйства [1]. Теплоэнергетические установки являются основой современных тепловых и атомных электростанций, теплоснабжающих систем и энергоемких технологий. Уровень развития теплоэнергетических установок и систем определяет общий уровень технического прогресса в каждой стране. Это наглядно показывает нынешнее состояние энергетики России. Общий кризис в экономике нашей страны, вызвавший замедление технического прогресса привел к тому, что в РФ на выработку единицы электроэнергии расходуется почти в 1,5 раз больше, а на отопление 1 м<sup>2</sup> жилья в 2 раза больше, чем в соответствующих странах зарубежья. Кроме того, около половины всего действующего оборудования электростанций изношено. Замена его новыми, современными энергоблоками не осуществляется. Отстают разработка и внедрение нового высокоэффективного оборудования тепловых электростанций (ТЭС), основы современной энергетики. Примером этого может служить работа над созданием паротурбинных энергоблоков с электрическим КПД около 45%, хотя за рубежом активно разрабатываются подобные блоки с КПД, превышающим 50% [1]. Не осуществляется необходимый переход на сжигание твердых топлив. В настоящее

время около 2/3 ТЭС работают на природном газе, запасы которого истощаются. Искусственное поддержание внутренней цены на природный газ, на порядок меньшей, чем в Западной Европе, приносит громадный экономический ущерб. Более того, это разрушает угольную промышленность, где себестоимость добычи угля превышает цену на газ. Вообще сжигать природный газ на российских ТЭС с КПД 30%, когда КПД современных парогазовых установок (ПГУ) превышает 52-54% и есть возможность увеличить его до 60%, является недопустимым. Вместе с тем недопустимо повышать цену на газ до мирового уровня по социальным условиям. Надо осуществлять строительство ПГУ, работающих полностью или частично на твердом топливе. В частности, создание таких двухтопливных ПГУ позволяет уменьшить расход природного газа практически в два раза без установки сложных систем газификации углей.

На кафедре теплоэнергетики и в проблемной лаборатории теплоэнергетических установок электростанций (ПНИЛ ТЭУ) СГТУ в течение многих лет успешно проводились фундаментальные исследования по созданию высокоэффективных циклов и тепловых схем ПГУ и оптимизации их параметров. Зарубежный опыт по созданию ПГУ полностью подтвердил все наши рекомендации и расчеты. В последние 10 лет практически полностью прекращено финансирование этих работ. Вместе с тем нам удалось провести ряд работ по созданию газотурбинных блок-ТЭЦ (доцент Е.А. Ларин и другие) малой мощности, обеспечивающих значительное повышение эффективности теплофикации. Однако, отсталость нашего газотурбостроения и продолжающийся кризис экономики РФ не позволяет реализовать эти разработки. В этих условиях весьма актуальной становится проблема модернизации и реконструкции существующих паротурбинных ТЭС и в частности теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), являющихся основой энергетики Поволжья. Весьма эффективные разработки в этом направлении проводятся профессором Ю.М. Хлебалиным. Проблему реконструкции ТЭС на базе использования разработанных в ПНИЛ ТЭУ оребренных поверхностей нагрева успешно решает группа доцента В.А. Медведева. Инновационное предприятие «Градиент-С», созданное в составе технопарка СГТУ, уже осуществило ряд работ по реконструкции паровых котлов на ТЭС «Уралэнерго» и промышленных котельных установок на предприятиях Саратова и области. Ценность достигаемого эффекта такой реконструкции котельных агрегатов ТЭС заключается в одновременном повышении их КПД на 3-5% и мощности до 30%.

Весьма ценными являются разработки ПНИЛ ТЭУ (доцент Ю.Е. Николаев и др.) по проблеме повышения эффективности систем теплоснабжения городов [3]. Реализация этих разработок позволяет увеличить экономию топлива от теплофикации в 1,5-2,0 раза, ликвидировать существующую в ряде мест ее экономическую невыгодность и повысить надежность. Одновременно улучшается экологическое состояние воздушного бассейна городов.

Ряд сотрудников кафедры и ПНИЛ ТЭУ проводят прикладные исследования по энергосбережению в промышленных предприятиях с развитой теплотехнологией. Уменьшение расхода природного газа в городах при уменьшении инвестиций обеспечивает применение разработанной в ПНИЛ ТЭУ системы дальнего низкотемпературного теплоснабжения городов [3]. Увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении здесь достигается понижением расчетной температуры сетевой воды на ТЭЦ с последующим ее догревом в городских отопительных установках, а уменьшение капиталовложений – применением нематаллических однотрубных тепловых сетей. При этом количество сжигаемого топлива в городской черте уменьшается более, чем в 2 раза, а на ТЭЦ появляется возможность сжигания твердых, низкосортных топлив.

Кафедра активно участвует в разрешении 70-летнего спора о разделении расхода топлива на ТЭЦ между электрической и тепловой энергиями, вырабатываемыми комбинированным способом. Получают поддержку обоснования кафедры о ненужности в новых экономических условиях такого распределения, поскольку использование для определения сравни-

тельной эффективности ТЭЦ каким-либо условным методом удельных расходов топлива на каждый вид указанных видов энергий часто приводит к отрицательному экономическому эффекту. Главным показателем эффективности работы ТЭЦ должна быть величина достигаемой экономии топлива, а определяющими показателями – коэффициент использования теплоты топлива, удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении и эксергетический КПД реального цикла ТЭЦ.

Проведенными термодинамическими исследованиями ПНИЛ ТЭУ [4 и другие] показано, что ГТУ, предназначенные для отдельной выработки электроэнергии, мало пригодны для создания на их базе ПГУ-ТЭЦ. Для достижения наибольшей экономии топлива здесь нужно применять в газовой части цикла двухкратный подвод теплоты топлива, а в его паровой части – более высокие параметры пара.

Проведенные первые проработки эффективности двухтопливных ПГУ бинарного типа (доцент А.Б. Дубинин) показывают возможность создания «воздушных котлов» и пиковых ГТУ с КПД, превышающим 45%.

Весьма нужные для современной энергетики исследования по обеспечению надежности тепловых ТЭС, АЭС и теплоснабжающих систем проводятся в ПНИЛ ТЭУ под руководством профессора Р.З. Аминова и доцента Е.А. Ларина. Это позволило сотрудникам совместно с учеными МЭИ, ИАЭ им. Курчатова и ОРГРЭС создать первое в России учебное пособие по этой проблеме [5].

Преподаватели и научные сотрудники кафедры и проблемной лаборатории активно участвуют в российских и некоторых зарубежных (Германия) конференциях, регулярно публикуют результаты своих исследований в научно-технических журналах («Теплоэнергетика», «Промышленная энергетика», «Проблемы энергетики» и другие).

Высокий уровень исследований позволяет успешно готовить научные кадры высшей квалификации. Только за последние 6 лет на кафедре было завершено и защищено 3 докторских диссертации – В.А. Загорский, Б.А. Семенов, Ю.Е. Николаев.

На базе выполненных исследований систематически выпускаются учебные пособия для студентов-теплоэнергетиков. Ранее созданные монографии и учебные пособия с грифом Министерства используются в вузах России и ряде зарубежных стран. В качестве примеров можно привести учебные пособия Андриященко А.И. «Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок», выдержавшее три издания, а также «Теплофикационные установки и их использование» (Андриященко А.И., Аминов Р.З., Хлебакин Ю.М. М.: Высшая школа, 1989. 256 с.), на которые регулярно ссылаются авторы научно-технической и учебной литературы.

### Заключение

Находящаяся в тяжелом кризисном состоянии энергетика России требует неотложной модернизации существующих тепловых электростанций и систем теплоснабжения. В ожидании промышленного подъема необходимо в ближайшие годы не только восполнить убыль мощностей тепловых электростанций, но и увеличить мощность энергосистем не менее, чем на 30-40%. Для этого нужно в самом срочном порядке восстановить отечественное энергомашиностроение, создать современное газотурбостроение и производство высокоэффективных ПГУ, укрепить научно-исследовательские организации этого профиля.

Неотложной является и проблема создания высокоэффективных систем теплоснабжения городов на базе комбинированного производства электрической и тепловой энергии. Необходимо обеспечить высокую надежность и экологичность таких систем.

Научные исследования, проводимые кафедрой теплоэнергетики и ПНИЛ ТЭУ, решают важнейшие проблемы развития энергетики страны, однако нуждаются в значительном усилении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий А.А. Энергетическая стратегия – важнейший фактор социально-экономического развития России // Теплоэнергетика. 2001. № 7. С.2-9.
2. Состояние и перспективы развития парогазовых установок в России/ О.Н. Фаворский, В.И. Длугосельский, Ю.И. Петраев и др. // Теплоэнергетика. 2003. № 2. С.9-15.
3. Принципы создания высокоэкономичных систем централизованного теплоснабжения / А.И. Андрющенко, Ю.Е. Николаев, Б.А. Семенов, А.Г. Гордеев // Промышленная энергетика. 2003. № 5. С.8-12.
4. Андрющенко А.И. О термодинамической эффективности сложных циклов ГТУ в парогазовых установках // Теплоэнергетика. 1998. № 3. С.68-71.
5. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС / Г.П. Гладышев, Р.З. Аминов, А.К. Клемин, Е.А. Ларин и др.; Под ред. А.И. Андрющенко М.: Высшая школа, 1991. 303 с.

**Андрющенко Анатолий Иванович** –  
доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика»  
Саратовского государственного технического университета

---

# ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

---

УДК 001.892

**В.Р. Атоян, Н.В. Казакова**

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ КАПИТАЛ УНИВЕРСИТЕТСКИХ УЧЕБНО-НАУЧНО-ИННОВАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ И ЕГО РОЛЬ В РАЗВИТИИ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКИ**

*Раскрывается сущность учебно-научно-инновационного комплекса (УНИК) как прогрессивной формы трансформации российских технических университетов. Предлагается использовать концепцию управления УНИК. Дается авторская классификация интеллектуального капитала УНИК. Раскрываются основные направления и формы управления интеллектуальной собственностью как элемента управления интеллектуальным капиталом УНИК, характеризуется опыт СГТУ в этой области.*

**V.R. Atoyán, N.V. Казакова**

## **THE INTELLECTUAL CAPITAL OF EDUCATIONAL-RESEARCH-INNOVATIVE UNIVERSITY AND ITS ROLE IN THE INNOVATION ECONOMY DEVELOPMENT**

*This article present the educational-research-innovative complex (ERIU) as one the ways of Russian university transformations. The problems of intellectual capital management as an instrument of an organizational competitiveness improvement in modern economy are described. On the basis of analyzing the relevant research, conceptual frameworks of intellectual capital management in the ERIU are detailed, the author's definition of this process is proposed. The classification of ERIU's intellectual capital is given in this work, author's interpretation of substance of ERIU's intellectual capital and main tasks of its management are presented. The intellectual property as an important element of ERIU's intellectual capital is marked. The key problems of intellectual property management in universities are formulated, the SSTU experience in this field is described.*

Глобальные вызовы конца второго – начала третьего тысячелетия поставили перед обществом новые проблемы и задачи. Среди них – необходимость быстрого реагирования на бурный прогресс науки и технологии, масштабные геополитические и социокультурные сдвиги, неотложная задача поиска своего места в меняющемся мире, удержания позиций в жесткой международной конкуренции.

В этих условиях во главу угла встают инновации как непрерывный систематический процесс, органический элемент любой деятельности. Наивысшей ценностью нового общества становятся инновационно ориентированные, творчески мыслящие, высококвалифицированные специалисты, умеющие аккумулировать и генерировать новые знания. Воспитание специалистов подобного типа – вот первостепенная задача современной системы образования, прежде всего высшего профессионального.

Поставленные задачи определяют направления реформирования системы образования – образовательный процесс должен быть нацелен не столько на передачу студентам готовых знаний, сколько на формирование у них гибкого и самостоятельного творческого мышления, навыков самообучения и мотивации к постоянному профессиональному совершенствованию. Чтобы специалист мог легко воспринимать и самостоятельно генерировать новые идеи и продукты, он еще в процессе обучения должен участвовать в создании и развитии новшеств.

Поэтому образование должно измениться качественно, по форме и содержанию, перейти к инновационным технологиям и принципам обучения. Помимо этого, образовательная, научная и производственная деятельности должны быть интегрированы в единый процесс, подготовку специалистов необходимо осуществлять не только в аудиториях и библиотеках, но и в научных подразделениях и инновационных фирмах, непосредственно в процессе разработки научной и инновационной продукции.

Как показал мировой и отечественный опыт, университетам затруднительно решить данную задачу без коренной модернизации подходов к обучению, научным исследованиям, организации управления и финансирования, работе с кадрами. Подготовка специалистов нового типа требует трансформации традиционного высшего учебного заведения прежде всего в плане расширения границ образовательного процесса на новые сферы деятельности – научную и инновационно-производственную, в которых профессорско-преподавательский состав и студенты являются активными участниками и сотрудниками в процессах создания новых идей и продуктов. Происходит охват всех стадий инновационного цикла – фундаментальных исследований, прикладных исследований, опытно-конструкторских разработок, реализации пробных партий новой продукции. Это, в свою очередь, влечет за собой структурную трансформацию вуза – организацию новых подразделений, включение новых субъектов и создание на базе вуза реального учебно-научно-инновационного комплекса (УНИК) со всеми необходимыми для функционирования данной формы структурными элементами.

К этим элементам относятся кафедры (реализующие в своей деятельности единство учебной и научной деятельности через личное участие преподавателей в НИОКР), научно-исследовательские и научно-технические лаборатории, опытно-конструкторские подразделения, инновационные структуры, производящие и реализующие готовую инновационную продукцию, подразделения, обеспечивающие функционирование УНИК как единого хозяйственного комплекса (от маркетинговых отделов до ремонтных служб).

Создание подобного рода комплексов предусмотрено приказом Министерства образования Российской Федерации от 01.08.2001 г. № 2853 «О проведении эксперимента по разработке моделей и механизмов создания и функционирования университетских комплексов» в целях реализации первоочередных мер в рамках направления Федеральной программы развития образования «Федеральные экспериментальные площадки создания и развития университетских комплексов и исследовательских университетов, включая разработку сопряженных профессиональ-



но-образовательных программ различного уровня», утвержденного приказом Минобразования России от 15.02.2001 г. № 515. Данным приказом ряду вузов России был присвоен статус «Федеральная экспериментальная площадка – Университетский комплекс». В состав этих вузов вошел и Саратовский государственный технический университет<sup>1</sup>.

*Университетский учебно-научно-инновационный комплекс (УНИК)* – это высшее учебное заведение любой формы собственности, независимо от ведомственной принадлежности, осуществляющее все стадии и этапы подготовки специалистов на основе единства образовательной, научно-исследовательской и инновационной деятельности и обеспечивающее социально-экономическое и культурное развитие страны и региона.

Необходимо отметить, что, хотя в зарубежной литературе и практике термин «УНИК» не употребляется, фактически большинство крупных зарубежных университетов – например, университеты Стэнфорда и Массачусетса (США), Бирмингема и Варвика (Великобритания), технические университеты Эйнховена и Дельфта (Нидерланды) и ряд других – можно с полным правом назвать так, поскольку направленность и масштабы их деятельности реально воплощают это понятие. Поэтому проводимая в настоящее время российским правительством реформа системы высшего образования в части создания университетских комплексов соответствует не только насущным национальным потребностям, но и общемировым тенденциям общественного развития, и может в дальнейшем способствовать интеграции России в международное сообщество на началах равноправного взаимовыгодного партнерства.

Учебно-научно-инновационный комплекс ориентирован на выпуск трех типов инновационной продукции:

- 1) высококвалифицированные специалисты нового, инновационного типа как особый вид инновационного продукта;
- 2) информационная продукция – новые фундаментальные и прикладные разработки, программная продукция и т.п.;
- 3) материальный инновационный продукт – практическая реализация научных разработок ученых УНИК в виде коммерчески эффективных партий наукоемкой продукции.

В выпуске всех трех типов инновационной продукции задействована вся совокупность ресурсов, которыми обладает УНИК, но доминирующую роль здесь играют интеллектуальные ресурсы и интеллектуальный труд работников. Поскольку УНИК – сложная система, включающая различные подсистемы и осуществляющая различные виды деятельности, то встает вопрос об управлении всем комплексом интеллектуальных ресурсов как единым целым для повышения эффективности труда творческих работников и качества выпускаемых инновационных продуктов.

Данная задача в современной экономике встает перед многими предприятиями и организациями, деятельность которых все в большей степени основывается на использовании новых знаний и технологий (особенно в наукоемких отраслях). Как эффективное направление ее решения, в мировой практике управления активно развивается концепция управления интеллектуальным капиталом организаций. Мы, ученые СГТУ, предлагаем использовать эту концепцию в качестве методологической базы управления УНИК, адаптировав ее к специфике функционирования российских университетов.

Основоположниками данной концепции интеллектуальный капитал трактуется, во-первых, как *полупостоянная совокупность знаний*, вырастающая вокруг некоей задачи, человека или организации. Это могут быть навыки и связи руководства, знания о технологии производства, правильные представления о нуждах потребителей и т.п. Второй вид интеллектуального капитала – *инструменты, при помощи которых можно увеличить совокупность знаний*.

---

<sup>1</sup> О проведении эксперимента по разработке моделей и механизмов создания и функционирования университетских комплексов. Приказ Министерства образования Российской Федерации от 1 августа 2001 г. № 2853.

Сегодня в мировой литературе существует несколько подходов к структурированию интеллектуального капитала. Разработанные в зарубежной литературе концепции управления знаниями и интеллектуальным капиталом касаются в первую очередь коммерческих организаций, действующих к тому же в условиях развитой рыночной экономики. Очевидно, однако, что структура интеллектуального капитала и характер управления им в УНИК не идентичны существующим в коммерческих фирмах. Это объясняется спецификой УНИК как организации:

а) УНИК – это *государственное* учреждение, деятельность которого финансируется и жестко контролируется государственными органами;

б) УНИК – это *некоммерческое* учреждение, деятельность которого не ориентирована исключительно на получение прибыли, следовательно, ценность интеллектуального капитала определяется не объемом финансовой прибыли, приносимой этими нематериальными активами;

в) УНИК – это *многопрофильное* учреждение, осуществляющее различные виды деятельности и выпускающее разные типы инновационной продукции;

г) в своей деятельности УНИК использует преимущественно *интеллектуальные* ресурсы, информацию и знания различных типов;

д) в процессе деятельности УНИК осуществляется воздействие не только на неодушевленные, но и на *одушевленные объекты воздействия* – студентов, играющих в этом воздействии не пассивную, а активную роль.

Все перечисленные особенности УНИК влияют на выработку концептуальных и методических подходов к классификации и управлению интеллектуальным капиталом. На основе анализа зарубежных концепций и адаптации их к реалиям отечественных университетов нами предлагается следующая структура интеллектуального капитала УНИК:

1) человеческий капитал – совокупность коллективных знаний сотрудников, их творческих способностей, умения решать проблемы, управленческих, руководящих и предпринимательских качеств, поведения в различных ситуациях;

2) структурный капитал – формы, методы, структуры, позволяющие эффективно осуществлять сбор, тестирование, организацию, фильтрацию, сохранение и распределение существующего знания;

3) интеллектуальная собственность;

4) капитал внешних связей – отношения УНИК с внешней средой.

Так как УНИК является многопрофильным учреждением, выпускающим разные типы инновационной продукции, в различных его подсистемах возможна различная структура интеллектуального капитала.

В состав человеческого капитала УНИК входят профессора и преподаватели, научные сотрудники, руководство вуза, административно-хозяйственный и учебно-вспомогательный персонал, докторанты и аспиранты. Открытым здесь остается вопрос о студентах: с одной стороны, они, строго говоря, не относятся к человеческому капиталу, поскольку в учебном процессе являются объектом педагогического воздействия. Но, с другой стороны, инновационные технологии обучения сегодня предполагают активное участие студентов в процессе обучения, большой объем их самостоятельной работы, в том числе и научной, а в УНИК они могут быть вовлечены и в инновационное производство в качестве технического персонала, что также относится к средствам активного обучения – «обучения в действии». Помимо этого, студенты, обучающиеся на коммерческой основе, выступают источником финансового дохода университета. Поэтому включение или невключение студентов в состав человеческого капитала УНИК – это вопрос дальнейшего исследования.

При анализе структурного капитала УНИК необходимо учитывать высокую степень государственного воздействия. Несмотря на академические свободы российских университетов, в систему и культуру управления ими встроено множество руководящих и регулирующих

элементов. Они имеют как внутреннее происхождение – Устав вуза, внутренний регламент деятельности, должностные инструкции и др., так и внешнее – Федеральные законы, нормативные акты Министерства образования РФ и других министерств, регулирующие деятельность учреждений высшего образования, государственные образовательные стандарты и программы, акты субъектов Федерации и органов местного самоуправления и т.д. Перечень этих элементов определен образовательным законодательством Российской Федерации, прежде всего Федеральным законом «О высшем и послевузовском профессиональном образовании», а также подзаконными актами. В силу этого учеными СГТУ предлагается выделить все регулятивные элементы в одну подгруппу в составе структурного капитала, определив их как «регулятивный структурный капитал», и выделить в нем две составные части – внутренний регулятивный структурный капитал и внешний регулятивный структурный капитал.

Также важными составными частями структурного капитала УНИК являются социальный структурный капитал (культура конкретного университета, сложившиеся в нем нормы поведения, неформальные связи, академические свободы), базы знаний, существующие в двух видах – электронном (Интернет и другие системы компьютерной связи, внутренние электронные коммуникации и базы данных), и документарном (библиотеки, отделы научно-технической информации, служебная документация по различным видам деятельности и т.д.).

Одна из самых сложных систем отношений в УНИК – это его отношения с внешней средой. Сюда относятся и взаимосвязи с обществом в целом, и отношения с хозяйствующими субъектами как потребителями продукции УНИК, и отношения с ними же как поставщиками и партнерами в создании этой продукции, и отношения с государством, в первую очередь с органами управления образованием. Поэтому, характеризуя часть интеллектуального капитала УНИК, базирующуюся на его отношениях с внешней средой, стоит объединить весь широкий диапазон внешних отношений в группу, которую можно определить как «капитал внешних связей», и идентифицировать элементы по субъектам взаимодействия (связи с Министерством образования РФ, Министерством финансов РФ, с региональными властями, с предприятиями и организациями, с обществом, международные связи), и по способам взаимодействия (разовые контакты, краткосрочные контракты, долгосрочное сотрудничество, совместные программы и проекты и т.д.). Подробный анализ всех элементов позволит определить степень и характер их влияния на функционирование УНИК и пути их совершенствования.

Подробная структура интеллектуального капитала УНИК изображена на рис. 1.

Мы считаем правомерным выделение интеллектуальной собственности как самостоятельного вида интеллектуального капитала, поскольку создание и использование объектов интеллектуальной собственности (патентуемых технологий и продуктов, научных публикаций и учебников, программной продукции и т.п.) является важным видом деятельности в УНИК.

В рыночной экономике интеллектуальная собственность с экономической и правовой точек зрения выполняет ряд важных функций:

- инструмент технологического превосходства над конкурентами;
- инструмент правовой защиты от конкурентов;
- инструмент стимулирования исследований и разработок за счет обеспечения материального вознаграждения инноватора;
- инструмент передачи технологий;
- инструмент регулирования отношений между создателями и пользователями интеллектуальной собственности.

С учетом этого целенаправленное управление интеллектуальной собственностью УНИК позволяет достичь важных для университета результатов (рис. 2):

– достижение и правовое закрепление интеллектуального превосходства данного университета над остальными субъектами, в том числе другими вузами, научными организациями и т.д.;

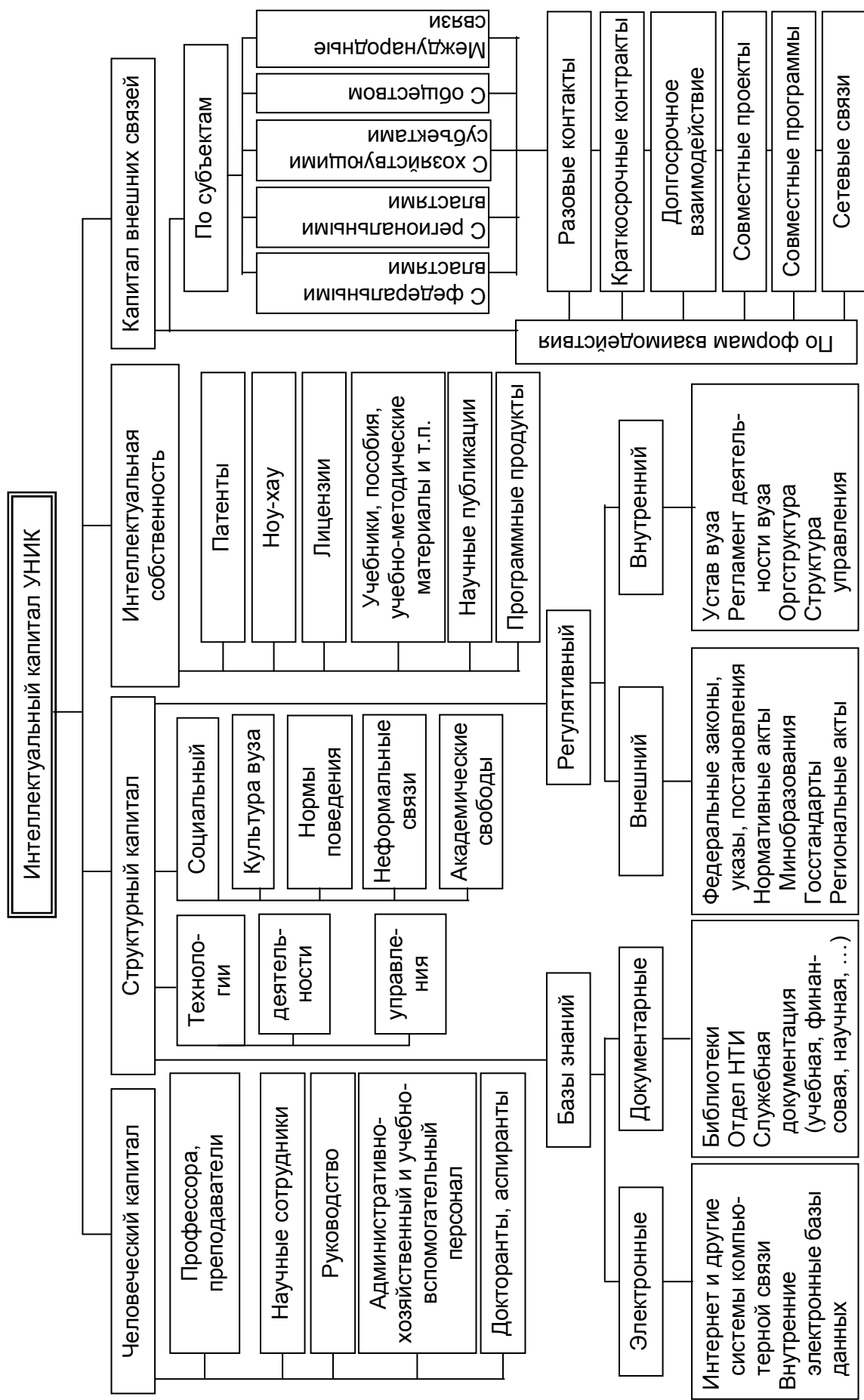
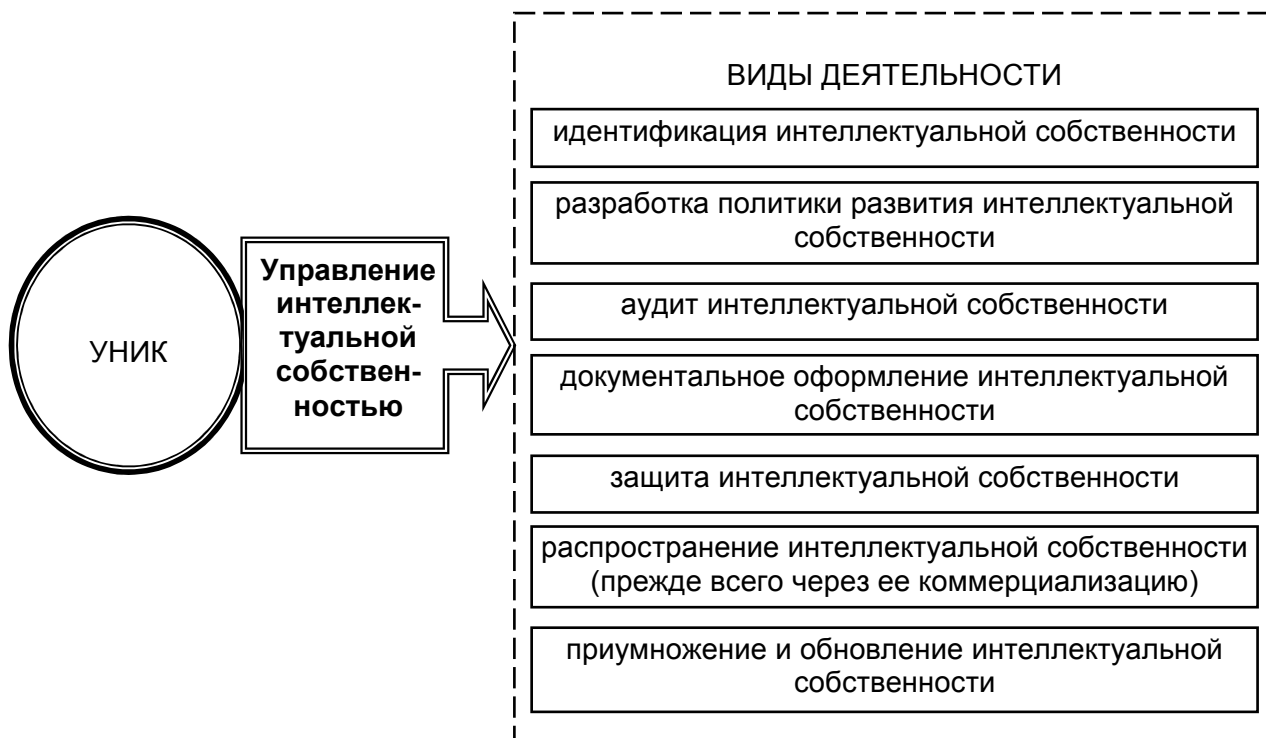
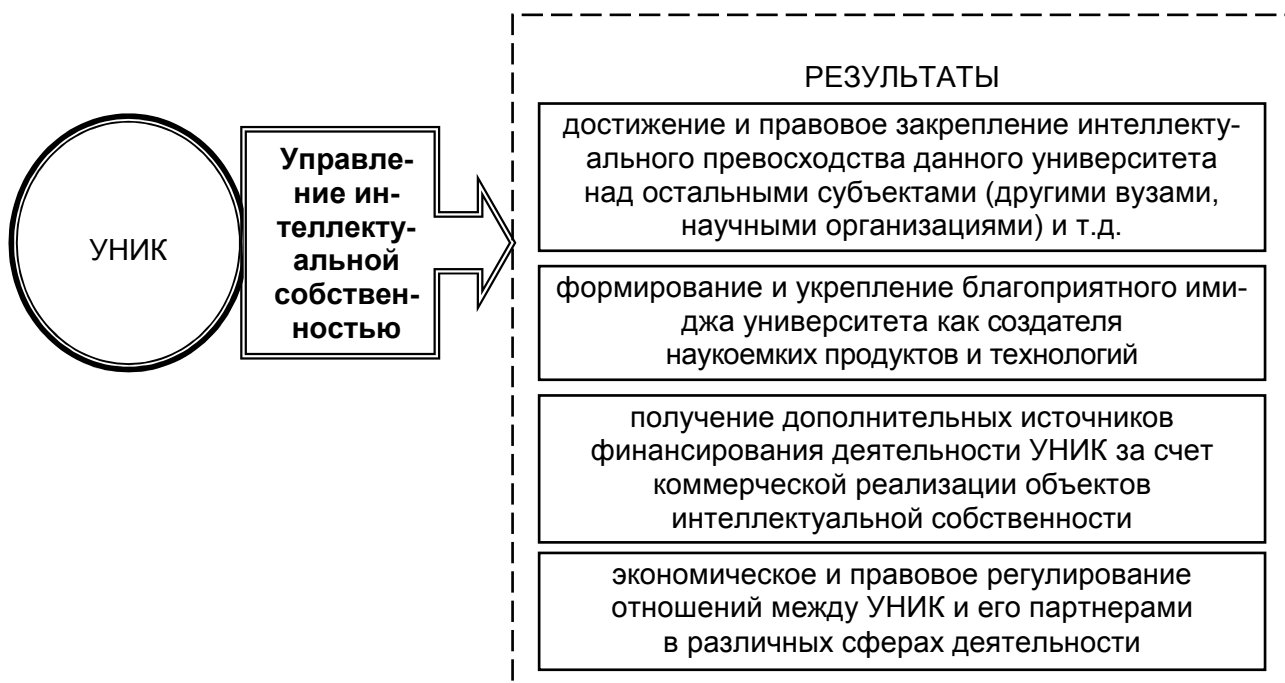


Рис. 1. Структура интеллектуального капитала УНИК



Содержание управления интеллектуальной собственностью как частью интеллектуального капитала УНИК



Результаты управления интеллектуальной собственностью для УНИК

Рис. 2. Виды деятельности и результаты управления интеллектуальной собственностью в УНИК

- формирование и укрепление благоприятного имиджа университета как не только «кузницы кадров», но и создателя наукоемких продуктов и технологий;
- получение дополнительных источников финансирования деятельности УНИК за счет коммерческой реализации объектов интеллектуальной собственности;
- экономическое и правовое регулирование отношений между УНИК и его партнерами в различных сферах деятельности (не только в образовании, но и в научных исследованиях, производстве инновационной продукции).

Для достижения перечисленных результатов необходимо, как уже говорилось, реализовать в рамках УНИК комплексный процесс управления интеллектуальной собственностью. Поскольку она является элементом интеллектуального капитала, то управление ею можно рассматривать в качестве составляющей управления интеллектуальным капиталом. Данный процесс, на наш взгляд, должен включать следующие виды деятельности (рис. 2):

- идентификация интеллектуальной собственности;
- разработка политики развития интеллектуальной собственности;
- аудит интеллектуальной собственности;
- документальное оформление интеллектуальной собственности;
- защита интеллектуальной собственности;
- распространение интеллектуальной собственности (прежде всего через ее коммерциализацию);
- приумножение и обновление интеллектуальной собственности.

Среди этих видов деятельности в России наиболее разработаны меры по защите интеллектуальной собственности и продукции. Несмотря на то, что существует соответствующая государственная законодательная база, каждая организация, имеющая дело с интеллектуальной продукцией, должна проводить собственную политику в этой области. В СГТУ в конце 90-х гг. были разработаны «Положение об изобретательской и патентно-лицензионной работе в структурных подразделениях университета и технопарка «Волга-техника» и «Классификатор товаров и услуг», для которых технопарк «Волга-техника» зарегистрировал товарный знак. На основе проведенных исследований были определены возможности использования результатов законченных разработок их авторами, их продажи-приобретения, переуступки, и другие вопросы управления интеллектуальной собственностью (вознаграждения за ее создание, конфиденциальности, трудовых прав, финансирования научных разработок). Особое внимание при этом было уделено ноу-хау, которые стали объектом купли-продажи на рынке интеллектуальной собственности.

Классификатор инновационных продуктов, разработанный в СГТУ, позволил установить их принадлежность к различным классам, создать основу для управления инновационным производством и его инфраструктурой, формировать стратегию их поддержки, организовывать рекламную и выставочную деятельность и т.д.

Интеллектуальная собственность в УНИК может выступать в качестве актива, находящегося на балансе, но по каким-то причинам не используемого (пассивное владение), и в качестве элемента трансферта технологий из УНИК другим субъектам (активное владение и использование). В процессе технологического трансферта интеллектуальная собственность может быть:

- объектом купли-продажи (например, при продаже патентов);
- объектом, передаваемым во временное использование (при продаже лицензий);
- вкладом в уставный фонд совместных инновационных предприятий.

Последняя форма использования интеллектуальной собственности весьма актуальна в настоящее время, когда растет число различных форм кооперации между участниками инновационных процессов. Среди них – всевозможные варианты сотрудничества университетов и промышленных предприятий, в частности, совместные исследовательские и инновационно-технологические центры.

Создание инновационных центров типа вуз – предприятие более активно вовлекает промышленные предприятия в инновационную деятельность, особенно на ранних стадиях поиска новых технологий, и они, как участники процесса, охотнее осуществляют его материальную и технологическую поддержку. Тесное взаимодействие вуза с промышленными предприятиями различных организационно-правовых форм в рамках ИТЦ или ИПК позволяет не только обеспечить эффективное продвижение разработок на всех стадиях, начиная от определения направления поиска до внедрения законченных разработок в производство, но и привлечь кадровый потенциал и материальную базу последних к процессу подготовки специалистов.

В настоящее время на основе кооперации Саратовского государственного технического университета и промышленных предприятий области создан ряд ИТЦ и ИПК, продемонстрировавших высокую эффективность в сфере разработки новых продуктов и технологий и доведения их до промышленного использования: «ЗАО САЗ» – СГТУ» (1998 г.), ОАО «СПЗ» – СГТУ» (1999 г.), «Прогресс – СГТУ» (1999 г.), ИТЦ «ФГУП НПП «Контакт – СГТУ» (2001 г.), ИТЦ интеллектуальных технологий СГТУ (2001 г.), ИТЦ «Росдортех – СГТУ» (2002 г.). Во всех этих центрах важным компонентом уставного капитала является интеллектуальная собственность СГТУ – запатентованные разработки его ученых.

Таким образом, можно сделать вывод, что в университетских учебно-научно-инновационных комплексах концепция управления интеллектуальным капиталом имеет широкие перспективы использования, поскольку способствует повышению общей эффективности функционирования организаций такого рода. Несмотря на то, что в России, как в промышленности, так и в других областях деятельности, в частности, в образовании, данная концепция теоретически и организационно не разработана, отдельные ее элементы присутствуют и применяются в управленческой практике, особенно в университетах, уделяющих большое внимание развитию инновационной деятельности как базиса совершенствования НИОКР и образования.

**Атоян Вазген Рубенович –**

доктор экономических наук,  
профессор кафедры «Экономика и управление в машиностроении»  
Саратовского государственного технического университета

**Казакова Нина Васильевна –**

доктор экономических наук,  
профессор кафедры «Экономика и управление в машиностроении»  
Саратовского государственного технического университета

УДК 378

**А.А. Захаров**

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
ПРИ ЛИНЕЙНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ШКАЛ**

*Получено семейство уравнений, позволяющих осуществлять взаимное преобразование различных шкал, применяемых в педагогических измерениях. Проведен анализ появления погрешностей при переходе от одной шкалы к другой.*



A.A. Zakharov

**ORIGIN OF INACCURACY UNDER LINEAR TRANSFORMATION  
OF MEASURING SCALES**

*The type of equations allowing to interconversion of different scales applicable in pedagogical measurements is presented here. Analysis of inaccuracy appearance when turning from one scale to another is carried out.*

Трудности анализа погрешностей в педагогических измерениях связаны с ограниченностью градаций шкалы измерений «неудовлетворительно – удовлетворительно – хорошо – отлично», которая нередко трансформируется в двоичную систему «хорошо – отлично» при аттестации одних групп студентов, что чаще всего проявляется на старших курсах, или в систему «хорошо – удовлетворительно» на первых курсах технических специальностей и это приводит к тому, что точность измерений (деление шкалы, величина интервала или бина) ниже, чем ожидаемая погрешность, связанная с конкретным преподавателем.

Фактически в ряде случаев 5-балльная шкала вырождается в 2-балльную типа да – нет, 0-1, что, естественно, не позволяет получить функцию распределения ответов тестируемых определенной формы.

В связи с этим понятно стремление вузов и отдельных преподавателей перейти на более точные шкалы типа 10-, 30- и даже 100-балльных.

Случайная погрешность в более протяженных шкалах может проявиться в связи с тем, что появится возможность попадания результата аттестации однородной группы студентов в некоторый диапазон, который и будет характеризовать случайную погрешность. Здесь трудности возникают в определении понятия однородного контингента по уровню знаний, подготовленности до того, как, собственно, начинаются измерения, аттестация.

Особой проблемой является также соотнесение шкал друг с другом, адаптация одной к другой, поскольку повсеместный переход на определенную единую шкалу не является целесообразным, поскольку существуют различные измерительные ситуации. Растяжение и сжатие шкал – это нормальный процесс и он должен быть адекватен поставленным целям и реализоваться в заданных условиях.

Использование традиционной шкалы не позволяет в принципе применять статистические методы обработки результатов измерений, так как в ней реализованы только два интервала (бина) от 3 до 4 и от 4 до 5.

При любом числе измерений они распределены только среди двух интервалов (бинов) возможных значений, которые реально отсутствуют, и преподаватели вынуждены согласиться с тем, что они оценивают не интервально, а дискретно: 3, 4, 5.

Существенные различия между дискретными точками, как метками уровня знаний, совершенно не раскрывают характер изменения измеряемой величины в диапазоне от 3 до 4 и от 4 до 5. Область прохождения границы между отнесением измеряемой величины к той или другой точке, принятой за оценку, точно не определена. Не известна также интенсивность притягивания, смещения измеряемых величин, попавших в область до точки 3, в точку 3, когда к объективным критериям оценки примыкают и субъективные.

Рассмотрим некоторые особенности использования различных шкал и возможности взаимного преобразования числовых значений различных шкал при их совмещении.

Поскольку цена деления определяет точность измерения, то не стоит приводить доводы о преимуществе шкал с уменьшенной ценой деления на заданном интервале измеряемой величины.

На рис. 1 представлены определенным образом ориентированные друг относительно друга 5 ( $\alpha$ ), 10 ( $\beta$ ), 50 ( $\gamma$ ) и 100 ( $\xi$ )-балльные шкалы. Максимальные значения всех шкал совмещены, совпадают также и минимальные значения  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\xi$  шкал, а минимальные значения  $\alpha$  и  $\beta$  шкал смещены друг относительно друга.

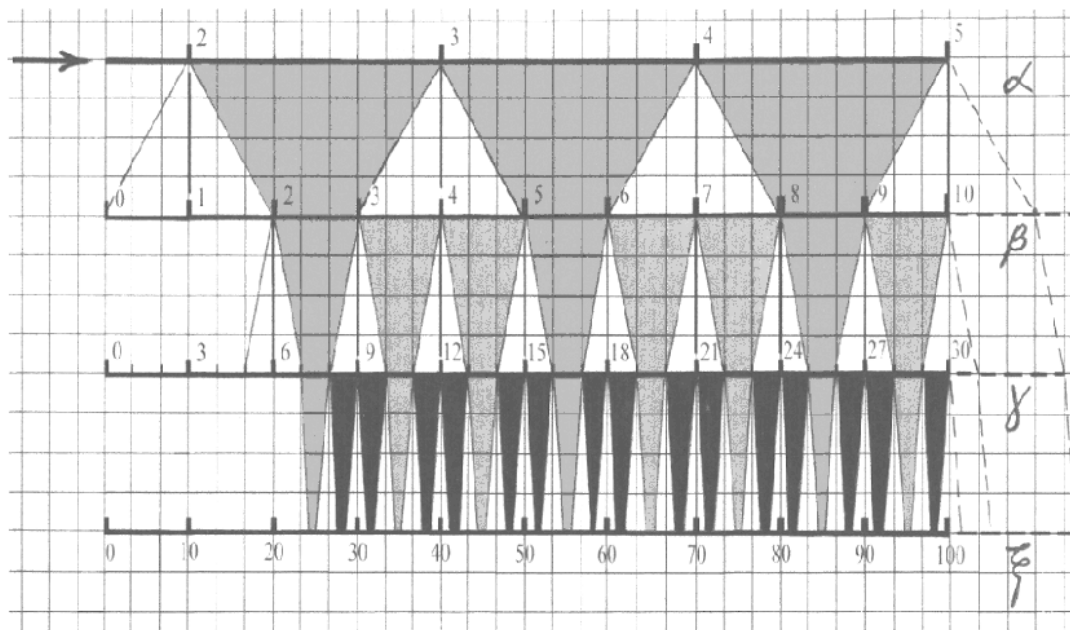


Рис. 1. Преобразование  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\xi$  шкал

Взаимное расположение шкал необходимо связать с понятиями фильтра и порога. Порог связан с тем минимальным значением измеряемой величины, которую можно признать нормой, что характеризует минимальный уровень, например, знаний, гарантирующий успешное обучение и успешную работу в будущем. Таким порогом в 5-балльной шкале (шкала  $\alpha$ ) является значение измеряемой величины в 3 балла, то есть фильтр «пропускания» ограничен диапазоном 3-5 баллов, причем обе точки являются фиксированными и заданными. При переходе к другим шкалам возникает возможность выбора порога, в частности, для шкалы  $\beta$  в диапазоне от 4 до 3 баллов, для шкалы  $\gamma$  в диапазоне от 12 до 8 баллов, а для шкалы  $\xi$  в диапазоне от 40 до 26 баллов. В этом случае мы как бы сохраняем линейность в трансформации шкал, увеличивая их протяженность.

При уменьшении величины бина, то есть переходе к шкалам с меньшим делением, гистограмма  $F(x)$ , где  $F$  – доля соответствующего числа оценок от общего числа, а  $x$  – баллы, принимает определенную форму, как правило, вид нормального распределения, и ее непрерывность тем лучше, чем меньше цена деления шкалы. При большом числе измерений (мы условно допускаем большое количество испытуемых) и большом количестве бинов на заданном участке измерений получается непрерывная кривая, которую можно назвать предельным распределением. Ее в качестве теоретического предела можно получить только при бесконечно большом количестве измерений и бесконечно узких бинах.

Семейство уравнений для соотношения всех четырех рассмотренных шкал, которые можно назвать уравнениями преобразования шкал, можно записать в следующем виде

$$n_{\xi} = n_{\xi_{\max}} - (n_{\gamma_{\max}} - n_{\gamma}) \frac{h_{\xi}}{h_{\gamma}},$$

$$n_{\gamma} = n_{\gamma_{\max}} - (n_{\beta_{\max}} - n_{\beta}) \frac{h_{\gamma}}{h_{\beta}},$$

$$n_{\beta} = n_{\beta_{\max}} - (n_{\alpha_{\max}} - n_{\alpha}) \frac{h_{\beta}}{h_{\alpha}},$$

$$n_{\zeta} = n_{\zeta_{\max}} - (n_{\beta_{\max}} - n_{\beta}) \frac{h_{\zeta}}{h_{\beta}},$$

$$n_{\zeta} = n_{\zeta_{\max}} - (n_{\alpha_{\max}} - n_{\alpha}) \frac{h_{\zeta}}{h_{\alpha}},$$

$$n_{\gamma} = n_{\gamma_{\max}} - (n_{\alpha_{\max}} - n_{\alpha}) \frac{h_{\gamma}}{h_{\alpha}},$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \zeta$  – индексы шкал;  $n_{\alpha_{\max}}, n_{\beta_{\max}}, n_{\gamma_{\max}}, n_{\zeta_{\max}}$  – численные значения меток (делений) шкал, которые изначально противопоставляются друг другу при рассмотрении процедуры соответствия шкал;  $n_{\alpha}, n_{\beta}, n_{\gamma}, n_{\zeta}$  – численные значения меток шкал;  $h_{\alpha}, h_{\beta}, h_{\gamma}, h_{\zeta}$  – цена деления соответствующих шкал.

Сопоставление шкал производилось при использовании соотношения максимальных значений шкал, которые, собственно, положены в основу названия шкал: 5 ( $\alpha$ ), 10 ( $\beta$ ), 30 ( $\gamma$ ), 100 ( $\zeta$ ).

Формально «привязку» можно осуществлять и путем соотношения значений меток соответствующих шкал, отличающихся от максимальных, но для этих случаев такие значения в уравнениях надо рассматривать как максимальные.

Пусть, например, в  $\beta$  шкале при связке  $\alpha$  и  $\beta$  шкал взять число  $n_{\beta_{\max}} = 9$ , то есть мы сместили шкалу  $\beta$  вправо таким образом, чтобы число 5 шкалы  $\alpha$  соответствовало числу 9 шкалы  $\beta$ , тогда картина соответствия численных значений меток шкал  $\alpha$  и  $\beta$  изменится.

$$\text{С учетом соотношения } n_{\beta} = n_{\beta_{\max}} - (n_{\alpha_{\max}} - n_{\alpha}) \frac{h_{\beta}}{h_{\alpha}},$$

где  $n_{\beta_{\max}} = 9$ ,  $n_{\alpha_{\max}} = 5$ ,  $\frac{h_{\beta}}{h_{\alpha}} = 3$ , получаем

$$n_{\alpha} = 5 \rightarrow n_{\beta} = 9,$$

$$n_{\alpha} = 4 \rightarrow n_{\beta} = 6,$$

$$n_{\alpha} = 3 \rightarrow n_{\beta} = 3.$$

Проведенный анализ позволяет осуществить оптимальное преобразование шкал, адаптируя его под соответствующие параметры аттестуемого контингента.

Создается впечатление, что все шкалы имеют на всей протяженности зоны неопределенности, прерываемые тонкими линиями дискретных числовых значений этих шкал. И это впечатление не лишено основания. Анализ характера зон неопределенности показывает, что они разделяются на 2 типа: возникающие в самой зоне и транслируемые из шкал с большим делением шкалы в шкалы с меньшим делением шкалы, то есть с большим количеством бинов.

Единичная протяженность зон неопределенности также изменяется, уменьшаясь от шкалы  $\alpha$  в сторону шкал  $\beta, \gamma, \zeta$ .

В структуре соотнесения шкал появились области в виде «шатра» с «крышей» типа равнобедренного треугольника.

Единичная площадь таких «шатров» уменьшается, и общее количество каждого образца «шатра» увеличивается при рассмотрении всей схемы от  $\alpha$  шкалы до  $\zeta$  шкалы, причем «шатер» между  $\gamma$  и  $\zeta$  шкалой становится фактически одноэтажным, вырождаясь в треугольник.

Из сопоставления  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\zeta$  шкал можно сделать многочисленные выводы и рекомендации. Не вдаваясь в детали и подробности, которые с необходимостью можно выявить, наиболее важным вопросом является вопрос прямого и обратного преобразования шкал, то есть от  $\alpha$  к  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\zeta$  и обратно от  $\zeta$  к  $\gamma$ , от  $\zeta$  к  $\beta$ , от  $\beta$  к  $\alpha$ .

«Шатровые» построения на схеме рис. 1 дают однозначный вывод о возможности трансляции значения верхних шкал в нижние. Так как трехэтажный «шатер» с углами 3 (шкала  $\alpha$ ), 3,5 ( $\beta$ ), 8, 16 ( $\gamma$ ) и 25, 55 ( $\zeta$ ) указывает на то, что весь диапазон чисел (оценок) от 25 до 55 (шкалы  $\zeta$ ) соответствует числу 3 в шкале  $\alpha$ , аналогично (шкала  $\zeta$ ) диапазон чисел от 55 до 85 соответствует оценке 4 в шкале  $\alpha$  и диапазон чисел от 85 до 100 (шкала  $\zeta$ ) соответствует оценке 5 в шкале  $\alpha$ .

По такой же схеме, но используя двухэтажные «шатры» с углами 3 в шкале  $\beta$ , 8 и 10 в шкале  $\gamma$  и 25, 35 в шкале  $\zeta$ , можно получить, что оценкам в шкале  $\zeta$  от 25 до 35 соответствует оценка 3 в шкале  $\beta$ , а оценкам от 35 до 45 ( $\zeta$ ) – оценка 4 ( $\beta$ ) и т.д.

Границы участков в шкале  $\zeta$ , которые мы приняли за 25, 35, 45 и т.д., следует уточнить в связи с дробностью значений шкалы  $\zeta$  в интервалах от 20 до 30, от 30 до 40 и т.д., что будет сделано ниже.

Приведенная схема перевода значений шкалы  $\zeta$  в значения шкалы  $\alpha$  и других шкал вполне однозначна и определяется закономерно, поскольку перевод осуществляется из шкал с большей точностью (с меньшей ценой деления шкалы – бином) в шкалы с меньшей точностью (большие шкальные интервалы).

Единственная неприятность, которая при таком переводе существует – это наличие узких зон неопределенности, например, на шкале  $\zeta$  около точек типа 25, 55 и 85 при соотнесении значений шкалы  $\zeta$  и  $\alpha$ , а также, например, около точек 35 и 45 при переводе значений шкалы  $\zeta$  в шкалу  $\beta$  и т.д.

Часто возникает необходимость обратного (инверсного) преобразования шкал, то есть шкал типа  $\zeta$  в шкалы  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\alpha$ . К таким преобразованиям следует подходить с большой осторожностью, так как они сопряжены с большими ошибками. Это наглядно демонстрируют фигуры в виде «воронок» на рис. 1.

С одной стороны, всему диапазону от 3 до 4 (шкала  $\alpha$ ), который мы назвали зоной неопределенности, соответствует вполне определенная точка  $\sim 55$  на шкале  $\zeta$ , а с другой стороны, дискретной точке, например, 3 на шкале  $\alpha$  как бы противостоит диапазон чисел от 25 до 55 в шкале  $\zeta$ .

Такое противоречие появляется в связи с тем, что трудно сопоставлять измерения с большой погрешностью измерения с малой погрешностью.

Нулевым приближением для разрешения указанного противоречия можно рассматривать преобразования типа  $4(\alpha) \rightarrow 7(\beta) \rightarrow 21(\gamma) \rightarrow 70(\zeta)$ , то есть по вертикальной линии на схеме рис. 1. Однако здесь возникает принципиальное несоответствие, состоящее в том, что те, кто аттестовался по шкале  $\zeta$  и получил, например, 60 баллов с высокой точностью, которые при обратном преобразовании становятся 4 баллами в шкале  $\alpha$ , остаются со своими 60 баллами, в то время как получившие оценку 4 по шкале со значительно меньшей точностью ( $\alpha$ ) получают 70 баллов, а реально, с учетом соотношения точности шкал, их оценка может быть и 55 и 85.

Указанное несоответствие позволяет сформулировать принцип соответствия шкал при их преобразовании от шкал с большей точностью к шкалам с меньшей точностью, то есть в нашем случае от шкалы  $\zeta$  к шкалам  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , а не наоборот.

Как уже отмечалось, необходимо отдельно вычислять значения границ зон неопределенности на шкале  $\zeta$ , так как они являются не целочисленными по сравнению с аналогичными в других шкалах.

Используя вышеприведенное уравнение

$$n_{\zeta} = n_{\zeta_{\max}} - (n_{\gamma_{\max}} - n_{\gamma}) \frac{h_{\zeta}}{h_{\gamma}},$$

получаем для соответствующих точек на оси  $\gamma$

$$n_{\gamma} = 23 \rightarrow n_{\zeta} = 76,67;$$

$$n_{\gamma} = 22 \rightarrow n_{\zeta} = 73,33.$$

Значения  $n_{\zeta}=76,67$  и  $n_{\zeta}=73,33$  являются проекцией на ось  $\zeta$  точек  $n_{\gamma}=23$  и  $n_{\gamma}=22$ , которые расположены на оси  $\gamma$  (рис. 2).

Так как точность шкалы  $\zeta$  определяется ее бином (делением), то есть величиной  $\pm 1$ , то зона неопределенности будет ограничиваться значениями

$$n_{\zeta} = 75,67 \text{ и } n_{\zeta} = 74,33.$$

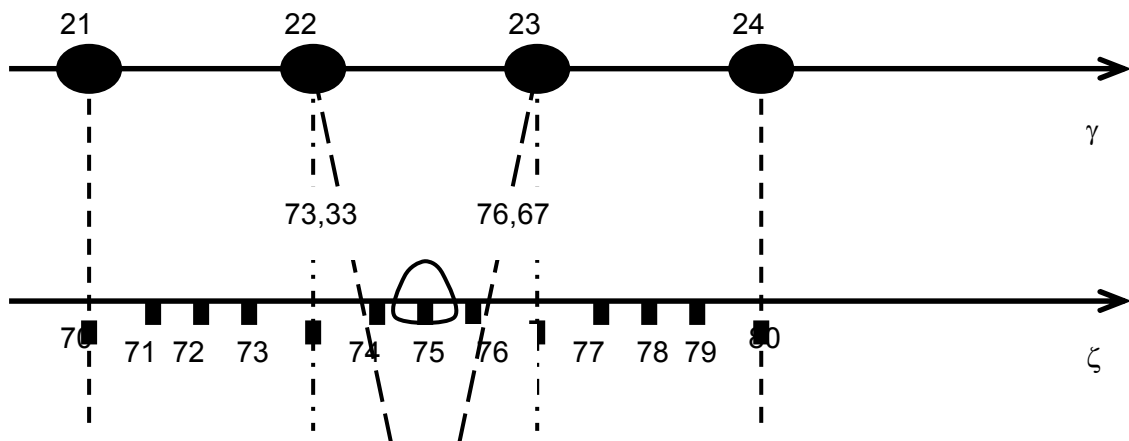


Рис. 2. Совмещенные  $\gamma$  и  $\zeta$  шкалы

Это означает, что оценкам, попавшим в зону  $74,33 < n_{\zeta} < 75,67$ , не соответствуют однозначно оценки в других шкалах. Конечно, можно провести границу по уровню  $n_{\zeta}=75$  и в случае попадания значений  $n_{\zeta}$  в диапазон  $74,33 < n_{\zeta} < 75,00$  считать, что это соответствует  $n_{\alpha}=3$ , а при  $75,0 < n_{\zeta} < 75,67$  оценка в шкале  $\alpha$  будет равна  $n_{\alpha}=4$ .

При этом мы должны согласиться с тем, что незначительные отклонения полученных оценок в шкале  $\zeta$  приводят к существенным изменениям (ошибкам) в шкале  $\alpha$ .

Аналогичные зоны неопределенности существуют и на других участках шкалы  $\zeta$ , порожденные соотношением других шкал со шкалой  $\zeta$ , в частности, зоны неопределенности, порожденные шкалой  $\alpha$ , лежат в области

$$54,33 < n_{\zeta} < 55,67 \text{ и } 84,33 < n_{\zeta} < 85,67.$$

Границы «шатров» можно определить, используя вышеприведенные уравнения. После вычисления, например, при  $n_\alpha=4$  величины  $n_\beta$  в соответствии с первым уравнением  $n_\beta^0 = 7$  проводим поиск границ «шатра» в шкале  $\gamma$ , задавая значения  $n_\beta^{+1} = 8$  и  $n_\beta^{-1} = 6$ .

Используем уравнение для  $n_\gamma$ , подставляя в него вместо  $n_\beta^0$  значения  $n_\beta^{+1} = 8$  и  $n_\beta^{-1} = 6$ , которым будут соответствовать значения  $n_\gamma=24$  и  $n_\gamma=18$ .

Затем, задавая значения  $n_\gamma=24\pm 1$  или  $n_\gamma=18\pm 1$  и подставляя их в уравнение

$$n_\zeta = n_{\zeta_{\max}} - (n_{\gamma_{\max}} - n_\gamma) \frac{h_\zeta}{h_\gamma},$$

получим соответствующие 4 значения в шкале  $\zeta$ , два из которых будут использованы для нахождения границ «шатра» на шкале  $\zeta$  ( $n_\gamma=17$ ,  $n_\gamma=25$ ).

Этим значениям будут соответствовать точки на оси  $\zeta$   $n_\zeta=56,67$  и  $83,33$ , что было получено и при графическом решении задачи при соответствующем сопоставлении шкал.

Для попавших в диапазон значения  $n_\zeta$   $56,67 \leq n_\zeta \leq 83,33$  и с учетом того, что в общем случае значения  $n_\zeta = n_{\zeta 0} \pm 1$ , сжатие шкалы  $\alpha$  относительно шкалы  $\beta$  можно осуществить путем изменения соотношения их бинов (делений). Так, если взять  $\frac{h_\beta}{h_\alpha} = 0,5$ , то получим случай

совмещенных  $\alpha$  и  $\beta$  шкал, то есть когда нулевые точки и максимальные точки будут совпадать.

Необходимость растяжения или сжатия шкалы  $\alpha$  относительно других шкал возникает тогда, когда кривая распределения абитуриентов по баллам смещена вправо или влево относительно центральной области любой из шкал более высокого уровня, чем шкала  $\alpha$ .

В случае, когда кривая распределения очень узкая, даже в шкале  $\zeta$  возникает необходимость перехода к шкалам еще более высокого уровня, например, 1000-балльным шкалам, о применении которых уже достаточно известно.

Проведенный анализ показал сложности в преобразовании шкал и особенности появления ошибок при таких преобразованиях.

**Захаров Александр Александрович** –

кандидат технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета

УДК 008.001

**А.А. Понукалин**

## **О МЕТОДОЛОГИИ ПОЗНАНИЯ**

*Высказывается предположение о существовании в природе множества законов сохранения, образующих иерархию. Обсуждаются различные аспекты действия закона сохранения порядка и аргументы, обосновывающие существование как производного от него закона сохранения жизни, который имеет объяснительную силу в плане изучения основ мироздания.*

A.A. Ponukalin

## METHODOLOGY OF COGNITION

*The author of this article allows the existence of many laws of conservation constituting hierarchy. The different aspects of action the order conservation law in use are considered below. As well as the arguments which prove the existence the life conservation law. This law is derived from the order conservation law which is important from the point of view of the bases of the Universe study as explanation.*

Процессы интеграции естественных и гуманитарных наук составляют одну из характерных тенденций в развитии знания о природе, обществе, человеке в наше время. В качестве примеров можно привести ряд работ [1-4]. Другая тенденция – намечаемый синтез науки и религии, в котором появляется возможность понять, как в психике человека сосуществуют научное и религиозное знания о мире и самом человеке в условиях, когда научное и религиозное знания составляют самостоятельные и отчуждаемые друг от друга формы общественного сознания. В глубокой древности, когда ведическая традиция служила основой психологической культуры общественного бытия, знание (ведание) о мире и человеке было единым, отражающим объективные законы бытия. Ведание строилось на представлении о мироздании, что отражено в первословах, сохранившихся до нашего времени в русском языке в качестве категорий, породивших целые семантические пространства понятий.

Рассматриваемые тенденции обусловлены в определенной степени требованиями общественной практики нашего времени, когда общество приступило к созданию сверхсложных социотехнических систем (например, атомных электростанций, космических кораблей, сети «Интернет»). Уже в наше время человеческая цивилизация стремительно переходит от инженерно-психологического конструирования к проектированию социотехнических систем. При этом к познанию и образованию предъявляются новые требования, отвечающие перспективе организации общества, строящего искусственный мир из материала мира естественного. Востребованным становится целостное знание о реальной действительности как системе с ее объективными и субъективными основаниями.

В познании природы, ее сущности и глубины строения определяющее значение имеет математика, позволяющая строить качественно-количественные модели реальной действительности, причем не только объективной, но и субъективной. Математика как средство познания имеет и основополагающее практическое значение – математические модели служат основой прогнозирования, планирования и управления во многих областях человеческой практики.

С точки зрения сущностного содержания познаваемого в реальной действительности математика отражает тот факт, что материальная природа дискретна, то есть материя структурирована и скорее всего иерархично, когда более сложные структурные единицы образованы менее сложными. Хотя, конечно, такое представление относительно и справедливо, возможно, лишь для определенных областей общей структуры. Более того, всякая математическая модель есть отражение и того факта, что описываемая ей сущность характеризуется взаимодействием отдельных составляющих, о чем свидетельствует знак равенства (неравенства) в модели. Таким образом, все объекты природы взаимодействуют, проявляя при этом свою структуру.

Математическая модель утверждает тот факт, что все структурные единицы находятся в строгом количественном отношении друг с другом, а потому одни из них можно выразить через другие, и это демонстрирует теоретическая физика. Заслуга математики состоит и в том, что она позволяет понять: все взаимодействия основаны на измерениях. Значит, законы

взаимодействия имеют измерительный характер [5], а всякое измерение оперирует единицами, что и свидетельствует о дискретном характере материальных структур. Непрерывность в таком случае можно рассматривать как проблему разрешающей способности измерителя и, следовательно, математика непрерывных величин представляет упрощенные модели реальной действительности.

Наиболее общие из законов взаимодействия – законы сохранения, а все остальные – производные от них. Собственно, знак равенства и есть символ действия закона сохранения. Следовательно, в природе существует множество законов сохранения и вполне возможно, что они образуют некоторый порядок, например, иерархический. Самопроизвольность и спонтанность эффекта «синергии» в тех или иных инстанциях природы могут быть объяснены, если признать, что в природе действует некий закон, контролирующий процессы разупорядочивания-упорядочивания материальных структур на каком-либо уровне материальной организации. В качестве такого закона, наиболее общего в природе, может служить закон сохранения порядка, рассматриваемого как организованность определенной степени. На уровне физической материи этот закон и осуществляет контроль соотношения уровней энтропии-негэнтропии в глобальных областях природы.

Существование такого закона предполагает конечную организованность Природы<sup>1</sup> и возможность перераспределения уровней организованности между ее отдельными областями. Другими словами, когда в одной области уровень организованности возрастает, то в другой (локальной) убывает. Если такой закон существует, то тогда возникают проблемы познания физических механизмов его действия, а также и самих признаков организованности, ее уровней. Возможный подход в разработке таких проблем – системный. Если Природа конечно организована, то она должна быть системной и, следовательно, она представляет собой некое целостное единичное, в свою очередь, образование, обладающее всеми основными признаками любой системы. В этом случае процессы, происходящие в природе, имеют внутрисистемный характер. Если Природа – система (метасистема), то все природные локальные образования являются, в свою очередь, системами (подсистемами метасистемы). Метасистема проявляет себя через всеобщие законы, а значит, существует некий «центр», анализирующий все, происходящее в метасистеме мгновенно, и управляющий ее состояниями. Это уже проблема связи и управления в организованной структуре, то есть – натуркибернетики.

Если Природа конечно организована, то становится невозможной бесконечная эволюция чего-либо в Природе и тогда всякая локальная эволюция подчиняется действию закона перехода количества в качество и наоборот. Действие закона сохранения порядка, возможно, проявляется в механизмах комбинированного закона сохранения энергии, вещества, информации. Это значит, что в метасистеме возможно за счет информации получать вещество и энергию так же, как за счет вещества и энергии получать информацию, а значит, можно получать и вещество за счет энергии и информации на определенных уровнях материальной организации. Проблема «Единого», порождающего все сущее, была известна еще во времена ведизма, остатки которого сохранились в памятниках древней письменности [6].

В «Упанишадах» есть фраза, которая отражает глубокое знание о сущности мироздания, до сотворения мира: «Само собой дышало Единое». Существенным здесь является то, что возможно естественное состояние единства всего потенциально сущего в качестве, например, невозбужденного состояния праматерии (в нынешнем представлении – вакуума либо эфира). В возбужденном состоянии, механизмы чего нам не известны, возникает все сущее и начинается, надо полагать, отсчет физического времени. Еще более важно использованное здесь понятие «дышало», которое приписывает Единому свойства живого. Наконец, что важно в высшей степени, определение «само собой» свидетельствует о непроемкости

---

<sup>1</sup> В силу конечности организации понятие природы становится именованным и потому в дальнейшем это слово пишется с большой буквы в нашей работе.



свойств живого. Живое оказывается имманентным Единому, а значит, и всему сущему, порождаемому им.

Применительно к органической материи закон сохранения порядка, по всей видимости, действует как **закон сохранения жизни**, если жизнь рассматривать более широко, чем как просто способ существования белковых тел. В соответствии с таким законом тогда жизнь, как и энергия, принципиально неуничтожима и может лишь изменять свои формы. Если такой закон существует, то он предполагает, что жизнь человека – это одна из форм жизни как таковой, образовавшейся в определенных материальных условиях. Тогда из закона сохранения жизни следует, что жизнь человека не происходит от чего-либо неживого и может произойти только от живого, приняв одну из потенциально возможных своих форм. Следовательно, метасистема обладает эталонными качествами живого и воспроизводит эталон жизни в тех или иных ее материальных формах. Жизнь никогда не возникала и не исчезала, ее сущность вне времени и пространства.

Выделим в структуре метасистемы (Природы в целом, как мы ее понимаем) Мир воспринимаемый, в котором мы живем. Природа вечна и бесконечна в том смысле, что не познаваема до конца в силу действия иерархии законов сохранения. Наш Мир «сотворен» Природой в соответствии с некоторой философией, которую можно назвать философией материальной жизни. В чем же она состоит? Какие идеи воплощены в феномен материальной жизни? Где в Природе порождается и сохраняется философия жизни вообще? Эти вопросы на сегодня наиболее актуальны в научном познании Природы и ее порождений. Не ответив на эти вопросы, мы не сможем взять на себя ответственность за ход Универсального мирового процесса, ориентирующего человека и общество на эволюционный путь и способ существования.

Возможно предположить, что «хранителем» философии жизни является «Психическое», понимаемое широко, как оно представлено в нашей отдельной работе [7] и монографии [8]. Обобщение представлений о системообразующей функции психики, субъективной форме психических явлений, многообразии образующих психику систем и качественных своеобразий их пересечений позволяет строить концепцию «Психического» в широком смысле как всеобщего, что предполагает необходимость анализа метасистемы «Природа», характеризуемой материальными и идеальными свойствами, энергией и информацией, пространством и временем, сохранением и развитием, причинно-следственными отношениями и взаимодействием. Введение всеобщей категории «Психическое» в аспекте определения некоторой области природных явлений в качестве объекта естественно-научного системного исследования служит альтернативой безысходности, которая возникает в противном случае, когда только остается признать божественное происхождение всего живого в частности, да и мироздания в целом.

В таком подходе возникает возможность выбраться из эпистемологического тупика, если мы не предпочитаем оставаться в условиях концептуального самоограничения, предполагая, что человек есть конечная цель развития природы, не познаваемой в принципе. Исследование категории «Психическое» в системной психологической теории как альтернатива агностицизму предполагает анализ надсистемных качеств человеческой психики, особенностей психического системообразования, фундаментальных свойств важнейших психических подсистем: когнитивной как области явлений познания (информационной интеграции, концентрации и локализации), коммуникативной как области явлений взаимосвязи и взаимодействия, регулятивной как области явлений управления системообразованием и целеобразованием. Необходим также анализ физической, биологической и социальной систем как областей существования психофизических, психобиологических и психосоциальных явлений с их специфическими особенностями и в их системном единстве, которое возникает в материальном развитии, биологической эволюции

и историческом прогрессе как едином природном процессе системообразования, целесообразном и обусловленном фундаментальными законами бытия.

В опыте материальной жизни (в Мире воспринимаемом) человек принимает как должное феномен конечности индивидуального физического существования, а потому для него реальность закона сохранения жизни представляется маловероятной, поскольку действие закона не освоено в человеческом опыте (но представлено в религиозных учениях: человек, будучи по происхождению бессмертным, стал смертным, совершив грех познания добра и зла). Если закон сохранения жизни в Природе принять как аксиому в гносеологических целях, то тогда все равно остаются вопросы о «начале» жизни, причинах ее возникновения, о целесообразности появления человека разумного, законах его эволюции.

Полезно обратить внимание на то, что такие вопросы неосознанно отражают основы вульгарного материалистического мировоззрения – веру в аксиому об органической материи как производной от неорганической. Это устоявшееся представление о том, что живое когда-то (то есть в физическом времени) появилось, в частности, на планете Земля (то есть в физическом пространстве) и произошло от неживого в процессе повышения уровня организации материи, рассматриваемой, в свою очередь, как физическая субстанция (вещество)<sup>1</sup>.

Мир, в котором мы живем, есть некая локальная область Природы, созданная ею для человека в его физической ипостаси. Сущность этого Мира проявляется в триединстве: «энергия-вещество-организация». Собственно жизнь не есть ипостась Мира, но принадлежит Природе. В ней действует закон сохранения жизни, он справедлив для всей природы – вечной, бесконечной, единой. Идеи Декарта о двуедином и Спинозы о едином становятся понятными лишь тогда, когда мы разделяем Природу и Мир, в котором живем. По существу и Декарт, и Спиноза имели в виду Природу, но Декарт разделил единое на две субстанции, образующиеся как результат «сотворения» Мира (его начала).

Поскольку человек воспроизводит закон сохранения жизни в Природе, но пребывает в «сотворенном» мире, то он отражает собой всю Природу в этом Мире (то есть он больше, чем Мир) и несет в себе все принципы, по которым Природа «сотворила» Мир. Например, в человеке, как целостном существе, действует принцип сенсорного ограничения (по физическим модальностям). Значит, и Мир подчиняется такому принципу. Он проявляется в наличии объективных законов существования человека в его физической форме. Собственно, конкретные законы, мировые константы и служат признаками ограниченности свойств созданного Мира, их организованности в некую систему.

Мир строго организован и подчиняется закону сохранения организации, как частному случаю еще более общего закона Природы (возможно, закону единства и борьбы противоположностей). Наш Мир, как ипостась Природы, ограничен в первую очередь физическими законами (в силу того, что человек осваивает физическую форму жизни), тогда как Природа принципиально не ограничена в своих проявлениях по отношению к жизни и человеку – носителю жизни<sup>2</sup>. Отсюда – жизнь человека в Мире целесообразна, а значит и целеустремлена, следовательно, человек предназначен Природой быть кем-то в своей жизни, что проявляется в его призвании. Отсюда возникают научные проблемы смысла жизни, ее целей и образа, лежащих в основе планов жизненного пути каждого человека в отдельности и всего человечества в целом.

Природа имеет базовую субстанцию («тонкий мир») и различные ее формы, производные от базовой субстанции. Все известные на сегодня так называемые всеобщие законы

---

<sup>1</sup> В соответствии с законом сохранения порядка в какой-то области Природы должны были происходить прямо противоположные процессы – вырождения, то есть трансформация органической материи в неорганическую.

<sup>2</sup> Неограниченность Природы проявляется в ряде психических явлений (сновидения, галлюцинации), а также и в паранормальных явлениях.

справедливы для базовой субстанции и в ее производных существуют как частные случаи. Физический Мир в форме вещества («плотного субстрата») есть производный от базовой субстанции Мир (система, область явлений), это одна из его инстанций. Плотность – это сущностная характеристика физического Мира – отсюда понятия «плоти», «плотского» и плотности как параметра вещества.

О производности физического Мира от некоей базовой субстанции свидетельствует эффект гностического предела в познании глубин физического Мира, когда познание определенной ступени глубины строения вещества требует израсходования энергии, способной уничтожить само познаваемое вещество. Чем глубже, тем больше нужно энергии и тем выше неопределенность в организации вещества. Источником концентрированной энергии становится сверхплотное вещество (радиоактивные элементы) и это может свидетельствовать о том, что существует верхняя граница плотности вещества, за которой физический мир исчезает, становясь какой-либо формой базовой субстанции. Это значит, что физический Мир занимает некую «ячейку» Природы, для которой характерны свои законы.

Базовая субстанция порождает в производных субстанциях те или иные формы, отражающие их «прообразы». Например, в физическом Мире любой физический объект (физическое тело) имеет свой «прообраз» в базовой субстанции. «Прообраз» и тело взаимосвязаны и подчиняются действию законов сохранения. «Прообраз» можно представлять как «душу» объекта (тела) и значит, каждый физический объект имеет «душу» в этом смысле, а она имеет свое строение. Чем сложнее (в определенном смысле – степени организации и плотности вещества в единице объема) строение материального объекта, тем сложнее «прообраз». Наиболее сложное строение имеет мозг человека, встроенный в его тело как кибернетическую систему. Значит, «прообразом» этого вещественного объекта является душа живая (или просто психика). Стало быть, психика обеспечивает взаимодействие вещественного тела с базовой субстанцией Природы.

Всякий природный объект (в том числе и физическое тело) образован как материальным субстратом, так и информационным содержанием. Оно проявляется в программе, по которой объект существует, подчиняясь законам способа своего существования. Объект постоянно получает информацию о среде и реагирует на ее изменения в соответствии с программой. Реагируя, он сам производит информацию для других объектов. Обмен информацией, как взаимодействие, для физических тел имеет измерительный характер. Кроме того, всякий объект есть и энергия, существующая каким-либо способом. Таким образом, всякое, даже физическое, тело образовано в физическом и информационном пространствах, обладая качествами энергии, материи, информации.

Если всех людей усреднить по внешнему виду, то получим некий образец человека, абстрактный, выступающий в качестве идеала. Он служит своеобразной моделью (прообразом), по которой производятся все люди с теми или иными отклонениями от идеала. Каждый человек в той или иной мере близок к этой модели. Почему одни люди более привлекательны для большинства, а другие менее или совсем не привлекательны? Наверное, идеал врожден в психику каждого человека как гештальт и воспроизводится в процессе развития психики в онтогенезе, когда ребенок осваивает окружающих и у него сформировывается психическая функция восприятия другого. Осваивая и выстраивая образ себя, человек соотносит его, надо думать с идеалом. Если отличия большие, то образуется комплекс неполноценности и человек стремится в своей жизни (в значительной степени неосознанно) к врожденному идеалу.

«Образец» как явление природы составляет философию человека и проявляется через человека посредством врожденных механизмов психики. Сущность идеала отразилась в понятии идеи как некоего плана, на основе которого возможна материализация идеального содержания. Идеальность относится не только к образу человека, но и к его анатомо-

физиологической конструкции с ее свойствами, а значит, и к здоровью. Поэтому должен существовать и идеал здоровья как эталон, по которому контролируются процессы в организме. Возникает вопрос, где же находится идеал, как он воспроизводится и посредством каких механизмов? Возможно, он «скопирован» в генетическом аппарате, что не очевидно, но существует он в каждом человеке<sup>1</sup>.

Еще более важен вопрос о том, как процессы материализации идеала («прообраза») представлены в сознании человека и какова его природа в контексте закона сохранения жизни? С точки зрения рассматриваемого подхода возможно предположить в познавательных целях, что сознание есть фундаментальная форма жизни, существующей в Природе независимо ни от чего. Сознание не является исключительно атрибутом человека, прошедшего путь социализации и становления личности. В человеческой форме сознание лишь развивается и становится индивидуальным. Как явление природы оно есть базовая форма жизни и подчиняется действию закона сохранения жизни. В человеке образуется локальный паттерн сознания (происходит его индивидуализация). Основание индивидуального сознания уходит своими корнями в базовую субстанцию, существующую в Природе независимо от пространства и времени, от действия физических законов. В индивидуальном развитии на индивидуализированной базе строится собственное «Я»-субъекта, связанное с организмом и наполняющееся опытом индивидуальной жизни. Сознание «Я»-субъекта обладает механизмами воли, направляемой потребностями личности. База индивидуального сознания и «Я»-субъекта находятся в отношениях взаимодействия, когда база служит требованиям «Я»-субъекта. Утрата воли обращает эти отношения.

Одна из проблем теории сознания – проблема связи явлений сознания с физическим Миром. Когда-то физики, в рамках вульгарного материализма, полагали, что физика есть наука обо всем, что имеет место быть в Природе, и следовательно, она должна объяснить любые феномены, наблюдаемые в своих физических проявлениях. По отношению к феномену сознания позиция физики отражена в положении о том, что если физика не может объяснить психофизические явления как часть реальности, то значит, она не полна. Отсюда и разработка проблемы сознания в современной физике как возможность решения ее собственной ключевой теоретической проблемы – соотношения двух видов материи: «грубой» (вещество) и «тонкой» (излучения, эфир) [9]. Как пишут редакторы цитируемого сборника, «Великий синтез» не может быть достигнут без решения психофизической проблемы. Становится необходимым построение физической концепции, в которой сознание и материя рассматриваются в рамках единого подхода.

Такая постановка вопроса предполагает совместное существование материи и сознания. Отсюда один шаг до идеи о том, что материя есть средство реализации физических качеств сознания, возможность проявиться в физическом Мире. Возникает вопрос о месте и роли сознания во Вселенной (Космосе), ответ на который лежит в области объяснения психических феноменов, которые демонстрируют роль сознания в физическом Мире. Но тогда психические феномены должны рассматриваться и как источник уникальных знаний об устройстве Вселенной в целом. В опытах сознание («неуловимый флюид») должно играть ключевую роль, если сознание и материя на глубоком онтологическом уровне образуют единство, что спорно, поскольку это проблема «Единого», как она представлена в «Упанишадах» или у Платона в его работе «Парменид» [10]. Это и проблема противоборства теорий Декарта и Спинозы.

Обращает на себя внимание высказывание о том, что возможностей современной науки недостаточно даже для качественного объяснения психических феноменов. Сделано заключение о том, что проблема соотношения сознания и физического Мира почти всецело

---

<sup>1</sup> В древности понятие идеала стало понятием Бога и в истории мировой религиозной философии можно найти учения, в которых Богу приписывались самые различные качества, исходя из актуальных потребностей – житейских, политических, идеологических и т.д.

находится в компетенции парапсихологии, а уровень «Единого» доступен только ей. С точки зрения современной физики надежды на понимание психофизических явлений возлагаются на феномены полей кручения с их необычными свойствами (то есть в рамках спин-торсионных представлений), которые выводятся лишь из теоретических построений.

Развитие физики достигло такого уровня, на котором объектом ее исследования становятся онтологические структуры, общие как для проявленного (физического Мира), так и для плана сознания [11]. Ставится задача построения естественно-научной картины мира, в которой материя и сознание образуют органическое единство – такое же, как сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия в единой теории поля. Одно из направлений – исследования спин-торсионных взаимодействий. В создании теории сознания должны быть выделены простейшие и наиболее фундаментальные структуры сознания как явления природы так, чтобы они имели точное соответствие физическим структурам законов природы. В частности, выполнена целая серия разработок, базирующихся на теории суперструн.

В результате мы видим, как осуществляется постепенный переход от теоретической физики к теоретической психологии, поскольку оказалось – там, где кончается теоретическая физика, начинается теоретическая психология. В теории строения материи, развивая геометрические идеи А. Эйнштейна, исправив допущенные последним ошибки и дополнив его математические модели своими, Г.И. Шипов разработал физико-математическую теорию семи уровней реальности [12]. На плане «грубой» материи выделяются уровни: твердого тела (земля), жидкости (вода), газа (воздух), плазмы (огонь). Интерпретации уровней даны в соответствии с ведическими представлениями о Миров, в котором живет человек.

Все известные физические теории изучают поведение твердых тел, жидкостей, газов, а также различных полей и элементарных частиц. Элементарные частицы относятся уже к уровню плазмы. Все эти уровни Г.И. Шипов относит к области объективной физики, включая частично и следующий уровень – физического вакуума. Далее же идут уровни, как он полагает, субъективной физики. Это – первичное торсионное поле (поле сознания, или информационное поле) и некое абсолютное «ничто», представляемое как «Божественная монада». Введение этого «высшего» уровня связано с тем, что глубже физического вакуума математическая физика, основанная на геометрическом подходе, оказывается бессильной. Поэтому теоретической физике приходится так же, как и философии в древнейшие времена, вводить когнитивный предел, называемый Богом, который наделяется свойствами, позволяющими через них объяснить все необычное. В наше время между предельными возможностями математической физики и концепцией Бога встраивается теоретическая психология с ее кардинальной проблемой сознания. На его изучение и направила свои усилия теоретическая физика на этапе своего кризиса.

Недостаточность изученности области психических явлений связана с тем, что традиционно психика рассматривается как область производных, вторичных явлений, как следствие неких материальных причин. Такое узкое понимание психического обусловлено особенностями человеческого познания, концепциями биологической эволюции; ограниченностью знаний об уровнях организации и развития материи и цикличности развития в локальных и глобальных областях Природы; человеческой позицией эгоцентризма. Существующее понимание оказывается недостаточно, когда мы обращаемся к изучению отдельных аспектов всеобщей взаимосвязи и взаимодействия в Природе, в которые включены психические явления. Человеческая психика, если ее рассматривать на высоком уровне обобщения области психических явлений, как явлений Природы, представляет собой одну из форм реализации «Психического» в определенных условиях взаимодействия физической, биологической и социальной систем. Психика человека актуализируется посредством биологической формы материи, поэтому биологический организм есть способ и средство материализации «Психического» как всеобщей реальности.

В таком подходе возможно ставить и решать задачи изучения всеобщих взаимосвязей, проявляющихся в области психических явлений. Всеобщие взаимосвязи проявятся в том, что какие-то всеобщие принципы, законы, прообразы, в том или ином виде отраженные в отдельных конкретизациях «Психического», воспроизведутся в каких-либо формах при определенных условиях в реальной действительности. Психологический анализ некоторых проявлений человека позволяет сделать вывод о том, что в них отражены общеприродные законы и принципы, имеющие важнейшее значение для реализации человеком своего способа существования в физической, биологической и социальной системах.

Концепция инвариантности общеприродных законов на множестве конкретизаций «Психического» приводит к предположению о существовании «программных регуляторов», определяющих некоторые аспекты человеческого поведения и жизнедеятельности. Посредством такого рода базисных «программных регуляторов», которые отражают общеприродные законы и принципы, и осуществляются всеобщая взаимосвязь и взаимодействие в конкретном поведенческом содержании. Роль преобразователя программы в регуляцию выполняет психика с ее системообразующей функцией. В зависимости от периода онтогенеза можно выделить две формы преобразования – непосредственную (неосознаваемую) и опосредованную сознанием.

В результате развития субъективной формы психики формируются концепции содержания программ-регуляторов, как существующего объективно и принадлежащего той или иной реальности, осваиваемой в опыте. Концептуальное развитие достигает уровня формирования идей – понимания и осознания абстрактного содержания программ-регуляторов как ипостаси Природы. Идея, как сознательная форма отражения такого содержания, становится важнейшим регулятором произвольного поведения. Она реализуется в целях деятельности, свойствах личности, индивидуальных особенностях поведения. Таким образом, психика человека – это средство, способ «порождения», усвоения, принятия и реализации субъектом идей, которые становятся основными движущими силами человеческой истории, социального бытия. Концепция «программных регуляторов» служит базой для объяснения важнейших функций психики человека как области явлений, реализуемых Природой на пересечении физической, биологической и социальной систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Забродин Ю.М., Лебедев А.Н. Психофизиология и психофизика. М.: Наука, 1977. 287 с.
2. Понукалин А.А. Социальные проблемы искусственного интеллекта // Искусственный интеллект / Под ред А.М. Богомолова. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993. С.102-120.
3. Волошинов А.В. Математика и искусство. М.: Просвещение, 2000. 399 с.
4. Галеев Б.М. О синтезации и синтезе: диалектика прогресс-регрессивных тенденций в искусстве // Перспективы развития современного общества / Под ред. В.В. Лузгина. Казань: КазГТУ, 2003. С.258-265.
5. Понукалин А.А. Измерительный процесс и категория «отражение» // Вопросы кибернетики. Проблемы измерения психических характеристик человека в познавательных процессах / Под ред Ю.М. Забродина. М., 1980. С.36-52.
6. Упанишады // Антология мировой философии. М.: Мысль, 1969. С.75-93.
7. Понукалин А.А. О категории «психическое» // Методология и история психологии: Тезисы к VII съезду Общ. психол. СССР. М., 1989. С.40-41.
8. Понукалин А.А. Системная психологическая теория и общественная практика / Под ред. Б.Ф. Ломова. М.: Ин-т психологии РАН, 1993. 197 с.
9. Сознание и физический мир. М., 1995. Вып.1. 190 с.
10. Платон // Антология мировой философии. М.: Мысль, 1969. С.392-396.

11. Московский А.В., Мирзанис И.В. Сознание и физический мир // Сознание и физический мир. М., 1995. Вып. 1. С.12-47.
12. Шипов Г.И. Теория физического вакуума. Новая парадигма. М.: Н-Т Центр, 1993. 362 с.

**Понукалин Алексей Алексеевич** –

доктор социологических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Психология и акмеология»  
Саратовского государственного технического университета

УДК 42 (075)

**Н.И. Шевченко, С.М. Федюнина**

**ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
КАК ИННОВАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СТРУКТУРА  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*Статья посвящена описанию системы интегрированного лингвистического и лингвориторического образования, разработанной и внедренной в учебный процесс СГТУ учеными и педагогами лингвистического учебно-научного центра. В основе созданной концепции лежит личностно-ориентированный, социально обусловленный подход к подготовке современного профессионала, развитой языковой личности, транслятора не только специальных знаний, но и творческих умений лингвориторического общения – основы гуманитарной культуры.*

**N.I. Shevchenko, S.M. Fedyunina**

**LINGUISTIC EDUCATIONAL-SCIENTIFIC CENTRE AS AN INNOVATIVE  
EDUCATIONAL STRUCTURE OF THE TECHNICAL UNIVERSITY**

*The article gives a detailed description of the system of integrated linguistic and lingua-rhetorical education developed and introduced to the teaching process in Saratov State Technical University by the scientists and leading lecturers of the Linguistic Centre. The developed theoretical conception is based on individually-orientated and socially dependent approach in training modern highly qualified professionals. The authors stress and analyze the topical problem of combining acquisition of special professional knowledge and development of creative skills of lingua-rhetorical cross-cultural communication in technical university education*

Одной из ключевых тенденций мирового и российского образования является инновационное образование, которое отличается от поддерживающего образования так же, как преобразующий интеллект отличается от познающего. Инновационный подход основан на идее центральной роли человека как системообразующего фактора культуры и общества, трансля-

тора социально необходимого знания. Сам процесс обучения все более основывается на социокультурных началах, поскольку социальность задает не только социальные структуры, доминирующие в обществе, но и систему отношений между людьми, между человеком и окружающей средой. Вместе с тем социальность не только фиксирует отношения между людьми, но и формирует определенную грамматику и семантику культурного поля, то есть определенным образом осложняет жизнь человека. Социальная проблемность ищет свое разрешение посредством культуры, однако в разных социокультурных средах господствуют разные типы социальности, через которые, в частности, можно определить «человека дальнего» [1]. Именно социально-культурный подход к проблемам функционирования и реформирования системы высшего образования дает возможность наметить пути ее дальнейшего развития.

Современный процесс реформирования системы высшего образования (а вместе с тем и системы обучения языкам в вузе), начавшийся в 80-90-х гг. XX столетия, был обусловлен изменившейся социально-экономической ситуацией и очевидным несоответствием уровня подготовки специалистов социальному заказу. Главным недостатком оказалось то, что кругозор профильного специалиста, прекрасно разбирающегося в соответствующей сфере производства, оказывался довольно узким, выпускник вуза не обладал достаточной компетенцией, необходимой для развития той отрасли, в которой ему предстояло работать. В значительной мере это касалось профессионально значимых ситуаций межкультурного общения, предполагающих развитие деловых международных контактов, освоение новых технологий, создание совместных предприятий, интенсификацию профессиональной деятельности в тесном контакте с зарубежными коллегами.

Эффективность деловых контактов с представителями иного культурного социума обуславливается рядом факторов, среди которых основными признаются: создание атмосферы психологического комфорта, благожелательности и открытости, а также умение устанавливать и развивать хорошие личные взаимоотношения с зарубежными партнерами. Игнорирование указанных факторов приводит к тому, что международные программы оказываются под угрозой срыва, и очень сложно бывает вызвать новую волну потенциального сотрудничества. Более того, на следующем витке пересечения культур новое поколение расплачивается за грехи предшественников, принимая на себя груз устоявшихся стереотипов. В свою очередь, учет этих факторов возможен лишь на социально-культурной основе.

Большинство людей, населяющих цивилизованные общества открытого типа, потенциально многокультурны, то есть подвержены социально-культурному воздействию различных групп, что и дает возможность выделить ряд характерных параметров культуры, влияющих на речевое поведение индивида, независимо от среды социализации [2]. При этом исследователи исходят из того, что культура передается из поколения в поколение через социальное взаимодействие людей друг с другом. Успешное общение возможно лишь в том случае, если партнеры по общению обладают равноценными знаниями и на этой основе могут прийти к согласию по поводу превосходства одних элементов культуры над другими. Наилучшим способом обучения тому, как достичь взаимопонимания, является организация обмена идеями в рамках проблемной ситуации, диспутов, дискуссий, конференций. Главным и непреложным правилом ведения дискуссии должны быть корректность и равноправие всех членов. Для ведения культурного обсуждения участник дискуссии должен также быть лингвистически целенаправленно подготовлен и оснащен специальным вокабуляром общепринятых терминов. При возникновении кросскультурных проблем появляется необходимость оперировать определенными понятиями и категориями, что также требует наличия соответствующего словарного запаса, чтобы ситуация не вышла из-под контроля и не превратилась в затяжной конфликт взаимопонимания.

В условиях постоянно развивающегося международного сотрудничества владение языком во многих отраслях стало необходимой частью профессиональной компетенции,



причем увеличивается спрос на специалистов, владеющих не только иностранным языком, но и основами речевой культуры, имеющих навыки кросскультурного общения.

Исследователи в различных областях гуманитарного знания признают языковую доминанту в качестве организующего стержня образования [3]. Язык – это структурообразующий элемент образования, интегрирующий многообразие форм, методов и дисциплин. Изучение языка, различные формы работы с языком, языковыми стратами составляют основу образования, пронизывают всю его систему, все ее ступени и нормы вне зависимости от их частного предназначения, специализации и других особенностей [4 и др.].

Учебные дисциплины, раскрывающие сущность языка, формируя основу образования, сами должны быть максимально разнообразны, чтобы открыть его глубину, сделать язык реальной, а не декларируемой основой образования. Значит, образование должно быть пронизано различными лингвистическими дисциплинами, которые послужат отправной точкой образования и его главным результатом. Знание языка – единственная возможность понять все остальные учебные дисциплины.

Центральная роль языкового принципа в организации образовательного процесса связана также с тем, что языковой стержень формирует терминологическую базу всех звеньев образования, играя доминирующую роль в становлении понятийной базы всех учебных дисциплин. Возможность проявить различные особенности словоупотребления, избежать догматизации, основывается на знании живости, подвижности языка, умении почувствовать индивидуальные особенности словоупотребления другого человека.

Преподавание языка, языковых дисциплин в рамках предлагаемого «понимающего» образования создает реальную основу для преодоления разрыва между гуманитарными и естественно-техническими циклами дисциплин, ликвидации глубинной дискретности в структуре современной модели образования. Междисциплинарный комплексный подход в современном образовании малоэффективен, поскольку нет основы, на которой он мог бы базироваться: пока в основу образования не будет положен язык, междисциплинарный комплексный подход останется частной методикой [5].

Кроме того, приоритетное положение языковых дисциплин и методов воспитания, связанных с использованием возможностей языка, позволяет решить и такую проблему современного образования, как активный рост наук, их влияние на образование. В связи с тем, что возрастает степень абстрактного в знании, учебные предметы отдаляются друг от друга из-за увеличения числа специальных терминов, специальных элементов речи. В результате при наличии формального единства внутреннее единство образования разрушается. Однако человек, хорошо владеющий языком и его механизмами, эмоционально воспринимающий термины в силу богатой речевой практики, будет ощущать себя комфортно, так как система образования, в которой он находится, не утратит для него внутреннего единства, будет сохранено чувство целостности.

Между тем система обучения иностранным языкам в России оказалась не готовой к новым задачам, вставшим перед ней, даже при наличии высококвалифицированных специалистов по методике преподавания языков, при обязательности иностранного языка как предмета во всех школах и вузах, при огромном количестве учебных материалов как отечественного, так и зарубежного производства. Причина кроется в том, что вне поля зрения методистов и психологов оказались некоторые фундаментальные научные проблемы, без решения которых невозможно принципиальное обновление методики обучения языкам. Одной из них является проблема интегрированного обучения различным предметам языкового цикла, особенности родному и иностранному языкам [6, с.16].

В 80-90-е годы в России произошла своего рода педагогическая революция. Мы все больше переходим от традиционной унифицированной, догматической, авторитарной школы, односторонне ориентированной на овладение так называемыми ЗУНАМИ (знания, уме-

ния, навыки), к адаптивной, вариативной школе нового типа, развивающей личность обучаемого. В этом контексте ставится вопрос о развитии в процессе обучения личности студента как языковой личности, как субъекта информационной речемыслительной деятельности, совершаемой в рецептивном и продуктивном регистрах, монологическом и диалогическом режимах, устной и письменной формах [7, с.22].

В процессе обучения и социализации человек приобретает, во-первых, *языковую компетенцию* как владение лексическими, грамматическими, фонетическими законами языка, увеличивает свой словарь, упорядочивает нормы словоупотребления и грамматики; во-вторых, он приобретает *коммуникативную компетенцию*, то есть овладевает культурой речи и правилами стилистического выбора для построения адекватного ситуации высказывания и текста; и, наконец, он приобретает *прагматическую компетенцию*, когда набирает социально-культурный опыт, овладевает законами общения, принципами и правилами коммуникативных взаимодействий, стратегиями и тактиками ведения разговора, гибкой системой речевых и коммуникативных актов [8, с.80].

Таким образом, развитую языковую личность характеризуют следующие умения и навыки:

1. Владение системой языка, его грамматическими и лексическими нормами.
2. Владение системой речи на текстовом и стилистическом уровнях.
3. Владение социальными нормами употребления речевых произведений на уровне сферы общения, темы, стиля, жанра.
4. Владение построением сложных текстов и восприятием сложных текстов (научных, официально-деловых, публицистических и других).
5. Владение ролями говорящего и слушающего, социальными и психологическими ролями партнерства в общении.
6. Владение прагматическими законами общения в разных кооперативных и конфликтных коммуникативных эпизодах.
7. Владение этическими и этикетными нормами статусных и ролевых позиций.

Совершенно очевидно, что в рамках лингвистического образования, признанного одной из важнейших составляющих обучения в неязыковом вузе, должно быть предусмотрено развитие названных умений и навыков как в родном, так и в иностранном языках.

Нельзя не учитывать и тот факт, что овладение иностранным языком без ознакомления с культурой страны, с менталитетом людей, говорящих на этом языке, и т.д. не может быть полноценным. Иными словами, нужно освоить не только сам язык, но и «образ мира» говорящего на нем. Представители иной культуры не должны быть для нас психологически «чужими». Следует уметь поставить себя на место иноязычного собеседника, понять логику его поведения, знать и понимать хотя бы минимум того, что окружает его в повседневной, социальной и профессиональной жизни. Иначе, даже говоря на одном и том же языке, мы никогда не сможем договориться [9, с.14-15].

Вот почему в программе особо подчеркивается нацеленность курса на расширение кругозора обучаемых, повышение их общей культуры, развитие культуры мышления, общения и речи [10, с.6]. Внимание акцентируется на том, что важнейшим компонентом содержания обучения должна стать речевая культура своей страны и страны изучаемого языка, их сопоставление и тем самым развитие у студентов способности соотносить языковые средства с нормами речевого поведения, которых придерживаются носители языка.

Для решения всех перечисленных задач в неязыковом вузе должна функционировать интегрированная многоуровневая система лингвистического образования, удовлетворяющая потребности каждого студента и имеющая четкую методологическую основу, определяющую не только структурные, содержательные и функциональные особенности учебного процесса, но и характер учебно-педагогической деятельности. В ее основу может быть положен социально обусловленный и личностно-ориентированный подход к подготовке современного

профессионала, призванного явиться транслятором не только специальных знаний, но и творческих умений лингвориторического общения как основы гуманитарной культуры.

Такая система призвана сформировать устойчивую социально-речевую компетенцию обучающихся, включающую следующие компоненты:

- владение различными способами передачи информации на родном и иностранном языках;
- владение алгоритмами профессионально-речевого поведения в ситуациях общения на родном и иностранном языках;
- владение профессионально-речевым этикетом.

Для создания подобной системы и достижения поставленной цели, очевидно, необходимо определить лингвистические составляющие в подготовке современного специалиста нефилологического профиля, создать основы лингвориторического образования как инновационной педагогической системы в современном негуманитарном вузе и разработать технологию лингвориторического обучения в контексте межличностного кросскультурного общения.

Инновационность такой системы состоит в интеграции всех возможных компонентов обучения культуре общения с целью развития языковой личности. В соответствии с этим должна быть разработана научно-методическая концепция обучения речевой лингвориторической коммуникации, в основу которой были бы положены принципы соотнесенности, взаимосвязи и взаимообусловленности процессов обучения иностранным языкам и кросскультурной коммуникации, родному языку и культуре общения, а также основам лингвистических и риторических знаний. Подобная концепция может служить основой модельного описания системы лингвистической подготовки, структурными компонентами которой являются:

- цели и задачи обучения, рассматриваемые в двуединстве субъектов преподавания и учения;
- содержание обучения, рассматриваемое в совокупности двух составляющих – вариативных программ обучения (материальный компонент) и многоуровневого построения учебного процесса (функциональный компонент);
- инновационные технологии и методы обучения;
- комплекс средств обучения коммуникации, включая основные и вспомогательные средства (аудиовизуальные, компьютерные и т.д.);
- организационные модульно-рейтинговые формы обучения и контроля.

Рациональное построение системы обучения предполагает, прежде всего, выделение этапов достижения основной цели, а затем уточнение иерархии учебных целей, которая определяет динамику и результативность курса. Эти методологические задачи применительно к лингвистическому образованию решаются с учетом современных условий вузовского обучения:

- 1) непрерывность курса обучения на основе соотнесенности довузовской подготовки, вузовского и послевузовского образования;
- 2) личностно-ориентированная многоуровневая система обучения;
- 3) вариативность программ обучения;
- 4) цикличное или модульное построение курсов;
- 5) многоаспектность лингвориторической подготовки;
- 6) социальная ориентированность обучающихся на совершенствование кросскультурной коммуникации.

Уровневое построение курса обучения предусмотрено программой. Первый, «базовый» этап курса вузовского обучения иностранному языку предполагает достижение обучающимися «первого порогового уровня» владения иностранным языком. Второй этап предполагает обучение иностранному языку в объеме, необходимом для подготовки бакалавров, что соответствует уровню, классифицируемому как «второй пороговый уровень». Третий этап предполагает обучение иностранному языку в объеме, необходимом для подготовки дипло-

мированного специалиста/магистра, что соответствует уровню, квалифицируемому как «первый пороговый продвинутый» / «второй пороговый продвинутый».

Таким образом, базовый курс (первые 2 года обучения) соответствует первому уровню и своей целью ставит формирование личности студента, обучение иноязычному устному и письменному общению, приобретение студентом элементарных социокультурной, лингвистической и коммуникативной компетенций.

Второй уровень, по окончании которого присваивается квалификация бакалавра, предполагает наличие социокультурной и коммуникативной компетенций, необходимых для иноязычной деятельности по изучению и творческому осмыслению зарубежного опыта в смежных областях науки и техники, для делового профессионального и культурного общения. Языковой курс подготовки бакалавров, как правило, делится на несколько взаимосвязанных курсов, например: расширенный курс иностранного языка, профессионально ориентированный курс, спецкурсы (в том числе курсы второго иностранного языка, «Культура делового общения», «Страноведение» и т.д.), охватывающие социокультурные и профессиональные интересы студентов. Эти курсы в большинстве вузов не являются обязательными, а выбираются студентами по своим потребностям и интересам [11, с.104].

Третий уровень представлен академическим языковым курсом, обеспечивающим совершенствование коммуникативной компетенции, необходимой для квалифицированной информационной и творческой деятельности в различных сферах и ситуациях делового партнерства, совместной производственной и научной работы, включенного обучения в аспирантуре страны изучаемого языка и т.д. На этой ступени предполагается изучение второго и третьего иностранных языков, защита дипломной работы на базовом иностранном языке, посещение (по выбору) авторских курсов, в том числе лекционных, ведущих преподавателей, направленных на расширение лингвистического образования.

Результаты многочисленных исследований и опыт преподавания в техническом университете позволили коллективу лингвистического учебно-научного центра (ЛУНЦ) СГТУ разработать и частично внедрить систему обучения межкультурному речевому общению, интегрирующую в себе обучение иностранным языкам и лингвориторическую подготовку студентов (см. [12-25]). Этому во многом способствовало расширение спектра лингвистических дисциплин в неязыковых вузах, введение курсов, раскрывающих особенности национальных речевых культур. В частности, был введен обязательный для всех студентов курс «Русский язык и культура речи», а также такие курсы, как «Введение в лингвистику», «Социолингвистика», «Русский язык для профессионального общения», «Интеркультурная риторика», «Лингвистические основы информатики» и другие, обязательные для студентов гуманитарных факультетов и факультативные для других студентов.

Система непрерывной лингвориторической подготовки также является трехступенчатой и предусматривает следующее:

1-я ступень – общий курс обучения культуре речевого общения («Русский язык и культура речи», «Русский язык для профессионального общения»);

2-я ступень – профессионально-ориентированные курсы («Введение в лингвистику», «Компьютерная лингвистика», «Лингвистические основы информатики», «Социолингвистика», «Интеркультурная риторика»);

3-я ступень – курс профессионального педагогического общения – «Педагогическая риторика» (аспирантура, ФПК, центр переподготовки преподавателей).

Соотнесение содержания этих дисциплин с содержанием вышеназванных курсов иностранного языка, а также их соотнесенность по времени в процессе обучения способствуют их взаимообогащению и являются первым шагом на пути создания единой системы интегрированного обучения межкультурному речевому общению. Наиболее ярким примером подобной интеграции может служить элективный авторский курс «Интеркультурная риторика», читаемый как на английском, так и на русском языках.

Функционирование разработанной системы было реализовано через структурную поэтапную реорганизацию подразделений технического университета:

1930 год – образование кафедры иностранных языков;

1992 год – открытие в рамках кафедры иностранных языков лингвоколледжа – центра углубленной подготовки по иностранным языкам для студентов и преподавателей;

1996 год – создание на базе кафедры иностранных языков лингвистического учебно-научного центра – структурного подразделения СГТУ на правах факультета;

1997 год – образование научно-исследовательской лаборатории межкультурного общения и социолингвистики, предназначенной для исследования кросскультурных, национально-специфических и социальных аспектов речевой коммуникации;

1998 год – создание в составе Лингвистического учебно-научного центра кафедры «Русский язык, прикладная лингвистика и методика обучения», работающей по следующим направлениям:

1) русский язык и культура общения (для студентов всех специальностей);

2) русский язык в системе довузовской подготовки;

3) русский язык и методика обучения (для иностранных студентов);

4) лингвистические курсы для гуманитарных специальностей – лингвистические основы информатики, общее языкознание, социолингвистика, компьютерная лингвистика, интеркультурная риторика;

5) педагогическая риторика и методика обучения (для слушателей ФПК, Центра переподготовки преподавателей).

1999 год – получение лицензии и открытие факультативного отделения по дополнительной квалификации «Переводчик в сфере профессиональной коммуникации» (дополнительное высшее образование).

Во всем мире признание определяющей роли творческого и образованного человека диктует динамику преобразований в системе обучения, направленных на создание благоприятных условий для развития интеллектуального, творческого потенциала каждого студента. Соответственно, преобразования в области лингвистического образования в неязыковом вузе способствуют развитию творческой языковой личности будущих специалистов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долженко О.Н. Социокультурные предпосылки становления новой парадигмы высшего образования // *Alma Mater*. 2000. № 10. С.24-52.

2. Cushner K. & Brisein R.W. *Intercultural Interactions // Cross-Cultural Research in Methodology*. Vol. 9. L-New Delhi, 1995. P.12-27.

3. Trim John L.M. Language teaching in the perspective of the predictable requirements of the twenty-first century // *AILA Review*. 1992. № 9. P.7-20.

4. Гадамер Х-Г. Истина и метод: Основы философской герменевтики. М.: Наука, 1988. 275 с.

5. Цатурова И.А. Каким видится языковое образование // *Высшее образование в России*. 2003. № 3. С.105-106.

6. Сулима И.И. Принципы организации образовательного процесса (герменевтический опыт) // *Alma Mater*. 1999. № 1. С.12-17.

7. Ворожбитова А.В. Синергетический аспект вузовского образования в свете лингвориторического подхода // *Alma Mater*. 1999. № 2. С.22-26.

8. Формановская Н.И. Коммуникативно-прагматические аспекты единиц общения. М.: Ин-т рус. яз. им. А.С. Пушкина, 1998. 293 с.

9. Леонтьев А.А. Психолого-педагогические основы обновления методики преподавания иностранных языков // *Alma Mater*. 1989. № 12. С.13-18.

10. Примерная программа дисциплины «Иностранный язык» федерального компонента цикла ОГСЭ в ГОС ВПО второго поколения. М.: МГЛУ, 2000. 23 с.
11. Шестоперова Л.Н. Языковая профессиональная подготовка в техническом университете // Высшее образование в России. 1995. № 3. С.103-108.
12. Шевченко Н.И. Методологические проблемы социологии образования. Саратов: СГТУ, 1997. 220 с.
13. Шевченко Н.И. Социально-философские проблемы языковой подготовки в вузе. Саратов: СГТУ, 1996. 52 с.
14. Шевченко Н.И. Социальная детерминация системы вузовского обучения межкультурному обучению // Социально-педагогические проблемы лингвистического образования в неязыковом вузе: Сб. науч. тр. Всерос. науч.-метод. конф. Саратов: СГТУ, 2000. С.3-8.
15. Шевченко Н.И. Социально-личностная обусловленность современных технологий обучения языкам // Новые технологии коммуникативно ориентированного обучения иностранным языкам в неязыковом вузе: Сб. науч. тр. Вып.449. М.: МГЛУ, 2000. С.31-36.
16. Шевченко Н.И. Система интегрированного обучения межкультурному речевому общению. Современные средства реализации целей обучения иностранному языку по новой программе (неязыковые вузы) // Вестник МГЛУ. Вып.467. М.: МГЛУ, 2002. С.22-32.
17. Шевченко Н.И., Воробьев Р.А. Развитие автономной языковой личности при обучении межкультурному общению // Автономность в практике обучения иностранным языкам и культурам: Сб. науч. тр. Вып.461. М.: МГЛУ, 2001. С.29-38.
18. Shevchenko N., Spitsyna O. Developing Word-Attack Skills in Reading // Language and Communication. Saratov: ISSUES SSU, 2003. P.94-99.
19. Шевченко Н.И., Федюнина С.М. Диалог цивилизаций в сфере языковой межкультурной коммуникации // Диалог и взаимодействие цивилизаций Востока и Запада: альтернативы на XXI век: Материалы 4-й Междунар. Кондратьевской конф. М.: МФК, 2001. С.230-233.
20. Шевченко Н.И., Федюнина С.М. Возможности проблемного подхода в условиях модульного построения курса // Пути реализации проблемного подхода в обучении иностранному языку в неязыковом вузе: Межвуз. науч. сб. М.: МГЛУ, 1994. С.55-60.
21. Федюнина С.М. Коммуникативная функция языка как проводник национально-культурной информации // Человек, общество, мир: Межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1996. С.49-50.
22. Федюнина С.М. Качественная языковая подготовка в системе «Общество – культура – образование» // Теория и практика преподавания иностранных языков в неязыковых вузах: Межвуз. сб. науч. тр. Саратов: СГАП, 1998. С.38-40.
23. Федюнина С.М. Риторический тренинг как компонент комплексной поствузовской педагогической и научно-методической подготовки // Риторика в современном образовании: Межвуз. науч. сб. М.: МГЛУ, 1999. С.63-64.
24. Федюнина С.М. О некоторых кросскультурных аспектах научного стиля общения // Социально-педагогические проблемы лингвистического образования в неязыковом вузе: Сб. науч. тр. Всерос. науч.-метод. конф. Саратов: СГТУ, 2000. С.24-29.
24. Fedyunina S. The Use of Cross-Cultural Training in the Option «Intercultural Rhetoric» // Language and Communication. Saratov: ISSUES SSU, 2003. P.49-54.

**Шевченко Наталья Исмаиловна –**

доктор социологических наук, профессор, заведующая кафедрой «Иностранные языки» Саратовского государственного технического университета.

**Федюнина Светлана Михайловна –** кандидат филологических наук, доцент,

заведующая кафедрой «Русский язык, прикладная лингвистика и методика обучения» Саратовского государственного технического университета.