

**ВЕСТНИК**  
**САРАТОВСКОГО**  
**ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**ТЕХНИЧЕСКОГО**  
**УНИВЕРСИТЕТА**  
**2011**

**№3 (57)**  
**Выпуск 1**

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.  
Выходит один раз в квартал  
Сентябрь 2011 г.

*Журнал включен в перечень ведущих  
рецензируемых журналов и научных изданий,  
утвержденный президиумом ВАК  
Министерства образования и науки РФ,  
в которых публикуются основные научные  
результаты диссертаций на соискание  
ученых степеней доктора и кандидата наук*

**Главный редактор** д.и.н., профессор И.Р. Плеве  
**Зам. главного редактора** д.т.н., профессор А.А. Сытник  
**Ответственный секретарь** д.ф.-м.н., профессор В.В. Астахов

**Редакционный совет:** д.т.н. В.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. Игнатьев, д.т.н. В.В. Калашников, д.т.н. И.А. Новаков,  
д.и.н. И.Р. Плеве (председатель), д.т.н. А.Ф. Резчиков, д. социол. н. С.Б. Суоров,  
д.т.н. А.А. Сытник (заместитель председателя), д.ф.-м.н. Я. Аврейцевич (Польша),  
д.э.н. У. Арнольд (Германия), д.ф.-м.н. Э. Мерсер (Великобритания), д.э.н. Э. де Соузе Феррейра  
(Португалия), д.т.н. Т. Чермак (Чехия), д.э.н. Ю.В. Шленов

**Редакционная коллегия:** д.т.н. В.А. Крысько, д.ф.-м.н. В.В. Астахов, д.х.н. А.В. Гороховский,  
д.т.н. В.Н. Ляников, д.ф.-м.н. Л.А. Мельников, д.т.н. Р.З. Аминов, д.т.н. Ю.Г. Иващенко,  
д.т.н. А.С. Денисов, д.т.н. А.А. Сытник, д.т.н. А.А. Большаков, д.филос.н. Д.В. Михель,  
д.биол.н. Е.И. Тихомирова, д.э.н. А.Н. Плотников, д.и.н. Г.В. Лобачева

Редактор Г.И. Мельникова  
Компьютерная верстка М.И. Балакин

Адрес редакции:  
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77  
Телефон: (845 2) 99-88-27  
E-mail: vestnik @ sstu. ru  
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>  
Факс: (845 2) 52-53-02

Подписано в печать 14.09.11  
Усл. печ. л. 41,5 Уч.-изд. л. 19,0  
Тираж 100 экз. Заказ 239  
Отпечатано в Издательстве ГАУ  
«Саратов-Медиа»,  
410031 г., Саратов, ул. Волжская, 28

Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ  
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU

**Подписной индекс 18378**  
(каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2011 г.)

ISSN 1999-8341

© Саратовский государственный  
технический университет, 2011

**VESTNIK  
SARATOV  
STATE  
TECHNICAL  
UNIVERSITY  
2011**

**№ 3 (57)  
Issue 1**

Scientific Journal

Since 2003  
Once in a quarter  
September 2011

*This journal is included into the list of leading reviewed journals and scientific publications approved by the presidium of Ministry of Education and Sciences of Russian Federation where major scientific thesis's results for academic degree competition for a doctor and a candidate of sciences*

<b>Editor-in-chief</b>	Professor I.R. Pleve
<b>Editor-in-chief assistant</b>	Professor A.A. Sytnik
<b>Executive secretary</b>	Professor V.V. Astakhov

**Drafting committee:** Prof. V.I. Volchihin, Prof. V.A. Golenkov, Prof. V.A. Dines, Prof. V. Zelensky (Poland), Prof. V.A. Ignatyev, Prof. V.V. Kalashnikov, Prof. I.A. Novakov, Prof. I.R. Pleve (Chairman), Prof. A.F. Rezhnikov, Prof. A.A. Sytnik (Vice of the Chairman), Prof. S.B. Surovov, Prof. Y. Avreytsevich (Poland), Prof. U. Arnold (Germany), Prof. A. Merser (UK), Prof. E. D'Sousa Ferreira (Portugal), Prof. T. Chermak (Chezh Republic), Prof. Y.V. Shlenov

**Editorial board:** Prof. V.A. Krysko, Prof. V.V. Astakhov, Prof. A.V. Gorokhovski, Prof. V.N. Lyasnikov, Prof. L.A. Melnikov, Prof. R.Z. Aminov, Prof. Y.G. Ivashchenko, Prof. A.S. Denisov, Prof. A.A. Sytnik, Prof. A.A. Bolshakov, Prof. D.V. Mikhel, Prof. Y.I. Tikhomirova, Prof. A.N. Plotnikov, Prof. G.V. Lobacheva

Editor G.M. Melnikova  
Computer- based page-proof M.I. Balakin

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street  
Saratov, 410054  
Russia  
Telephone: +8452/99-88-27  
E-mail: vestnik @ sstu. ru  
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>  
Fax: +8452/52-53-02

Signed for publishing: 15.06.11  
Apr. tp. l. 41,5 Acc.-pbl. l. 19,0  
Edition 100 psc. Order 239  
Printed in publishing house  
"Saratov-Media",  
28, Volgskaya St., Saratov, 410031,  
Russia

ISSN 1999-8341

© Saratov State Technical University, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

<b>Бережной Д.В., Сагдатуллин М.К., Голованов А.И.</b> Многослойный ортотропный конечный элемент оболочек средней толщины .....	9
<b>Никитин А.А., Цимбалов Г.М.</b> Приближенное аналитическое решение динамических уравнений классической теории упругости для наружного кольца подшипника .....	20
<b>Кириченко В.Ф., Самаркин П.А.</b> Качественный анализ эволюционных уравнений в неклассической теории пологих оболочек с начальными неправильностями .....	33
<b>Савина Т.Ф.</b> Вложения игр с отношениями предпочтения в игры с функциями выигрыша .....	41
<b>Кондратова Ю.Н.</b> Гидроупругость упругой цилиндрической трубы кольцевого сечения при различных ее закреплениях .....	50
<b>Анкилов А.В., Вельмисов П.А.</b> Исследование динамики и устойчивости упругого элемента конструкции при сверхзвуковом обтекании .....	59

### ФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

<b>Мазеев Е.В., Фурсаев М.А.</b> Проектирование СВЧ транзисторного генератора с варакторной перестройкой частоты и моделирование его электрических характеристик .....	68
<b>Гестрин С.Г., Сальникова Е.А.</b> Спиновые колебания, локализованные на точечном дефекте в ферродиелектрике (одномерный случай) .....	73
<b>Гестрин С.Г., Пилипенко Е.А., Щукина Е.В.</b> Математическое моделирование влияния дислокаций на спин-волновой резонанс в ферромагнетиках типа «легкая ось» .....	78
<b>Пулин В.Ф., Элькин П.М., Степанович Е.Ю., Минаев Е.Н.</b> Моделирование структуры и спектров циклозарина .....	86
<b>Пулин В.Ф., Элькин П.М., Эрман М.А.</b> Моделирование адиабатических потенциалов гидроксизамещенных бензола .....	91
<b>Власов А.В., Корнилова Н.В.</b> Оценка осевой компоненты электромагнитного поля при управлении магнитожидкостными сенсорами .....	96
<b>Бондаренко А.Л., Сивяков Б.К., Самуйлов Г.П.</b> Фазовращатели на волноводах сложного сечения с планарными петлями связи и р-і-п-диодами .....	103

### ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<b>Поздеева М.Г., Рябухова Т.О., Окишева Н.А., Ягудина Э.Р.</b> Наномембраны для разделения вторичного молочного сырья .....	113
<b>Рябухова Т.О., Окишева Н.А., Поздеева М.Г., Ягудина Э.Р.</b> Термодинамика адсорбции β-аланина и альбумина на полимерных пленочных мембранах .....	118
<b>Фоменко Л.А., Ловцова Л.Г., Серянов Ю.В.</b> Кинетика локального электрохимического осаждения меди в узких каналах формообразующих углублений под влиянием ультразвуковой кавитации (теоретические исследования) .....	123

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

<b>Серегин А.А.</b> Расчёт профиля эвольвентных зубьев с переменным значением диаметра основной окружности.....	133
<b>Андронов С.П., Браилов И.Г.</b> Переходная поверхность зуба цилиндрических зубчатых колес .....	136

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

<b>Нагар Ю.Н., Ольшанский В.Ю., Серебряков А.В.</b> Анализ переходного процесса в одной модели пьезогироскопа.....	143
<b>Гаврилова М.С., Бутов А.А., Рузов В.И., Разин В.А.</b> Стохастическая модель системы стабилизации систолического артериального давления в моменты стрессовых ситуаций .....	150

## **ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

<b>Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Чашин Е. А.</b> Расчет установившегося режима электроэнергетической системы сочетанием методов первого и второго порядков Ньютона.....	160
<b>Шаронов Г.И., Шаманов Р.С.</b> Алгоритмический метод измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника многополюсной электрической цепи типа звезда.....	169

## **ТРАНСПОРТ**

<b>Денисов А.С., Асоян А.Р., Орлов Н.В.</b> Анализ деформаций и теплонапряженности корпуса турбокомпрессора двигателей Камаз-евро.....	177
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

<b>Безруков А.И., Жилина М.А., Кац А.М.</b> Использование математических методов для оценки качества классификации объектов стандартизации .....	182
<b>Сайкин А.И., Чурикова А.А.</b> Приближенный метод расчета характеристик разомкнутой неэкспоненциальной сети систем массового обслуживания .....	188
<b>Макуха У.К., Кушников В.А., Родичев В.А.</b> Анализ выполнимости планов мероприятий по ликвидации наводнений .....	195
<b>Маршаков Д.В., Фатхи Д.В.</b> Модель аппаратной реализации искусственного нейрона на основе цветных временных сетей Петри .....	201
<b>Митрофанов А.А.</b> Об одном методе оптимизации выбора распознающих признаков при ограниченных ресурсах.....	209

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ**

<b>Зиначков И.Ю.</b> Построение системы управления конфигурацией программного комплекса с применением интеллектуальных агентов .....	213
<b>Ахмадинуров М.М., Тимофеева Г.А.</b> Модели массового обслуживания в задаче оптимизации работы светофора.....	217
<b>Вешнева И.В.</b> Оценка качества социального объекта, основанная на построении многомерного «поля качества» сбалансированной системы показателей с использованием теории нечетких множеств .....	227
<b>Ганюкова Н.П., Ханова А.А.</b> Процессное управление системами корпоративного типа .....	235
<b>Лукина С.В.</b> Автоматизация процедур формирования и выбора структурных компоновок сборных режущих инструментов на этапе технической подготовки производства.....	241

## **ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ**

---

<b>Добрин К.Ю.</b> Феномен социальной нормы.....	248
<b>Смирнова Н.Б.</b> Реализация компонентов содержания непрерывного художественно-педагогического образования Чувашии с использованием педагогического потенциала народного ДПИ.....	254
<b>Захаров А.В.</b> Подготовка мелиораторов в 1960-е – 1970-е гг. (На материалах Волгоградской и Саратовской областей).....	260
<b>Дикун Н.А.</b> Роль семьи в профессиональном образовании молодежи.....	273
<b>Дубровина Н.В.</b> Отражение советской и немецкой ментальности в системе топосов социалистического реализма.....	277
<b>Краснощёков В.А.</b> Особенности традиционных народных форм культуры индустриальных городов Среднего Поволжья на рубеже XIX – XX веков.....	287

## **ЭКОЛОГИЯ**

---

<b>Крупнова Т.Г., Кострюкова А.М., Ракова О.В., Григорьева Е.А.</b> Применение алюмосиликатных сорбентов для доочистки сточных вод от ионов меди (2+) и никеля (2+).....	296
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## **ЭКОНОМИКА**

---

<b>Айриева А.Н.</b> Развитие планирования бюджетных инвестиций на региональном уровне.....	305
<b>Калугина Е.О.</b> Общественное питание как сфера применения логистики .....	314
<b>Подсумкова Л.А.</b> К вопросу о развитии молодежного инновационного предпринимательства.....	320
<b>Верещагина Л.С.</b> Использование контроллинга в механизме управления резервами совершенствования реализационной деятельности промышленных предприятий.....	324
<b>Верещагина Л.С.</b> Выявление резервов повышения эффективности деятельности реализационных подразделений промышленных предприятий с использованием функционально-стоимостного анализа.....	331
<b>Семенов А.И.</b> Развитие методологического инструментария в исследовании национальной инновационной системы .....	336
<b>Плотников А.П., Власова А.Е.</b> Проблемы оценки инновационной активности торговых предприятий.....	346
<b>Арсланов А.В.</b> Формирование эффективной системы управления интеграционным объединением.....	351
<b>Санкова Л.В., Косарева А.В.</b> Оценка эффективности программ активной политики занятости: теория и методология .....	357
<b>Плотников А.Н., Плотников Д.А.</b> Логистика снабжения подрядных организаций материальными и техническими ресурсами .....	368

## CONTENTS

### MATHEMATICS AND MECHANICS

<b>Berezhnoi D.V., Sagdatullin M.K., Golovanov A.I.</b> Multilayer orthotropic finite element of shells of average thickness.....	9
<b>Nikitin A.A., Tshymbalov G.M.</b> The approached analytical decision of the dynamic equations classical theory of elasticity for the external ring of the bearing.....	20
<b>Kirichenko V.F., Samarkin P.A.</b> Qualitative analysis of the evolution equations in nonclassical theory of shallow shells with initial irregularities.....	33
<b>Savina T.F.</b> Inclusion maps of games with preference relations into games with payoff functions .....	41
<b>Kondratova J.N.</b> Hydroelasticity of the elastic cylindrical tube of ring section at its various fixing .....	50
<b>Ankilov A.V., Vel'misov P.A.</b> Investigation of dynamic and stability of elastic element of construction in supersonic flow .....	59

### PHYSICS, RADIOENGINEERING AND ELECTRONICS

<b>Maseev E.V., Fursaev M.A.</b> The modelling of electrical characteristics of microwave transistor oscillator with a varactor frequency tuning .....	68
<b>Gestrin S.G., Salnikova E.A.</b> The spin oscillations localized on the dot defect in the ferroelectric (one-dimensional case).....	73
<b>Gestrin S.G., Pilipenko E.A., Schukina E.V.</b> Mathematical simulation of dislocations' influence on spin-wave resonance in ferromagnetic with the axis of slight magnetization .....	78
<b>Pulin V.F., Elkin P.M., Stepanovith E. Yu., Minaev E.N.</b> Structural-dynamic models of cyclozarine.....	86
<b>Pulin V.F., Elkin P.M., Erman M.A.</b> Modelling of adiabatic potential for hydroxy substituted benzenes.....	91
<b>Vlasov A.V., Kornilova N.V.</b> Assessment of axial component of electromagnetic fields by management of magnetic-fluid sensors.....	96
<b>Bondarenko A.L., Sivyakov B.K., Samuilov G.P.</b> Phase shifter based on complicated cross section waveguides with planar coupling loops and p-i-n-diodes .....	103

### CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES

<b>Pozdeeva M.G., Ryabuhova T. O., Okisheva N.A., Yagudina E.R.</b> Nanomembranes for the separation of secondary raw milk .....	113
<b>Ryabuhova T. O., Okisheva N.A., Pozdeeva M.G., Yagudina E.R.</b> Thermodynamics of adsorption of $\beta$ -alanine and albumin polymer film membranes.....	118
<b>Fomenko L.A., Lovtsova L.G., Seryanov Yu.V.</b> Kinetics of local electrochemical deposition of copper in narrow channels shaping the recesses under the influence of ultrasonic cavitation.....	123

### ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

<b>Seregin A.A.</b> Profile calculation evolvent's teethes with variable value diameter of the basis circle .....	133
<b>Androsov S.P., Brailov I.G.</b> Fillet surface of cylindrical gears.....	136

### MEASURING ENGINEERING AND INSTRUMENTATION ENGINEERING

<b>Nagar Yu.N., Olshanskiy V.Yu., Serebryakov A.V.</b> Analysis of the transition process in a piezogyroscope model .....	143
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

<b>Gavrilova M.S., Butov A.A., Ruzov V.I., Razin V.A.</b> Stochastic model of stabilizing system of systolic blood pressure at the time of stress .....	150
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## **POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING**

<b>Hachatryan V. S., Badalyan N. P., Chaschin E. A.</b> Calculation of being fixed mode electropower system combination of methods of first and second of orders of Newton .....	160
<b>Sharonov G.I., Shamanov R.S.</b> The algorithmic method of measurement of parameters of the passive complex dipole of multi-pole electrical circuit type-star .....	169

## **TRANSPORT**

<b>Denisov A.S., Asoyan A.R., Orlov N.V.</b> Analysis of deformation and thermal stress shell of turbocarger of engines Kamaz-euro .....	177
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## **INFORMATION TECHNOLOGIES**

<b>Bezrukov A.I., Zhilina M.A., Katz A.M.</b> Use of mathematical methods for a quality rating of standardization's objects classification.....	182
<b>Saikin A.I., Churikova A.A.</b> Approximate method of calculating of characteristics of open nonexponential network of queuing systems .....	188
<b>Makukha U.K., Kushnikov V.A., Rodichev V.A.</b> The analysis of feasibility of the plans of measures on liquidation of flooding .....	195
<b>Marshakov D.V., Fatkhi D.V.</b> The model of the hardware implementation of artificial neuron based on coloured timed Petri nets .....	201
<b>Mitrofanov A.A.</b> On one optimization method of the choice of recognizing signs at the limited resources.....	209

## **AUTOMATION AND CONTROL**

<b>Zinakov I.U.</b> Construction of the system software configuration management platform using intelligent agents .....	213
<b>Ahmadinurov M.M., Timofeeva G.A.</b> Queuing theory models in optimization problem of traffic lights.....	217
<b>Veshneva I.V.</b> Estimation of the quality of social object based on the balanced score card multidimensional "quality field" construction using fussy sets theory .....	227
<b>Ganyukova N.P., Khanova A.A.</b> Process management of socio-economic systems of the corporate type.....	235
<b>Lukina S.V.</b> Automating procedures for formation and choice of structural component layout of modular cutting tools in step of technical preparation production.....	241

## **PHILOSOPHY, SOCIOLOGY AND CULTUROLOGY**

<b>Dobrin K.Yu.</b> Phenomenon of social norm .....	248
<b>Smirnova N.B.</b> Realisation of the components of the content of the continuous art-pedagogical education with the use of the pedagogical potential of the national arts and crafts.....	254
<b>Zaharov A.V.</b> Preparation of reclamation in the 1960's – 1970's (on materials of volgograd and saratov regions).....	260
<b>Dikun N.A.</b> Role of family in professional education of youth.....	273
<b>Dubrovina N.V.</b> The soviet and german mentalities reflection in system of the topics of socialist realism.....	277
<b>Krasnoschyokov V.A.</b> Features of traditional national forms of culture of industrial cities of the central Volga region on the boundary XIX – the XX-th centuries .....	287

## **ECOLOGY**

---

<b>Krupnova T.G., Kostryukova A.M., Rakova O.V., Grigorieva E.A.</b> Using aluminosilicate sorbents for tertiary wastewaters treatment from ion copper (2+) and nickel (2+) .....	296
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## **ECONOMICS**

---

<b>Ayrieva A.N.</b> Development planning budget investments at the regional level.....	305
<b>Kalugina E.O.</b> Catering as a scope of application of logistics .....	314
<b>Podsumkova L.A.</b> About question of development of young people's innovative entrepreneurial activity .....	320
<b>Vereschagina L.S.</b> The controlling of the improving opportunities of the sales systems in the industrial enterprises.....	324
<b>Vereschagina L.S.</b> The analyze of the improving opportunities of the sales systems in the industrial enterprises using activity based costing .....	331
<b>Semenov A.I.</b> Development of methodological toolkit in research national innovative system.....	336
<b>Plotnikov A.P., Vlasova A.E.</b> Problems of the estimation of innovative activity of trade enterprises.....	346
<b>Arslanov A.V.</b> Building of the efficient corporation management system.....	351
<b>Sankova L.V., Kosareva A.V.</b> Evaluation of the active labor market policy: theory and methodology.....	357
<b>Plotnikov A.N., Plotnikov D.A.</b> Logistics supply contractors material and technical resources .....	368



УДК 539.3

Д.В. Бережной, М.К. Сагдатуллин, **А.И. Голованов****МНОГОСЛОЙНЫЙ ОРТОТРОПНЫЙ КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ  
ОБОЛОЧЕК СРЕДНЕЙ ТОЛЩИНЫ**

*В данной работе опубликован алгоритм построения многослойного ортотропного конечного элемента для определения напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций. Использована гипотеза малости напряжений обжатия. Рассмотрен метод двойной аппроксимации, при этом использована техника «понижения порядка аппроксимации» деформаций поперечного сдвига. Решены тестовые задачи.*

Конечный элемент, ортотропность, многослойность, метод двойной аппроксимации

**D.V. Berezhnoi, M.K. Sagdatullin, **A.I. Golovanov******MULTILAYER ORTHOTROPIC FINITE ELEMENT OF SHELLS  
OF AVERAGE THICKNESS**

*In the given work the algorithm of construction multilayer orthotropic a finite element for definition of the stress-strain station of thin-shell constructions is published. The hypothesis of infinitesimality of compression stress is used. The method of double approximation is considered, thus the technique of approximation order reduction deformations of cross-section shift is used. Test examples are solved.*

Finite element, orthotropy, multilayer, method of double approximation

**Введение**

При построении физических моделей многослойных ортотропных оболочек вводятся всевозможные подходы, основанные как на различных гипотезах для каждого слоя оболочки [1-3], так и на единых гипотезах для всех слоев тонкостенной конструкции [2, 4-9]. В первом случае порядок разрешающей системы зависит от количества слоев. Во втором случае порядок системы не зависит от числа слоев, что открывает, в частности, возможности для эффективного применения метода конечных элементов (МКЭ) в расчетах ортотропных многослойных оболочек. Данный ортотропный многослойный конечный элемент (КЭ) получен на основе трехмерного изотропного восьмиузлового КЭ оболочки [10], состоящего в дискретизации трехмерных уравнений теории упругости в криволинейной системе координат и использовании некоторых оболочечных гипотез. Применению подобных подходов к расчету оболочек средней толщины посвящены работы [11-15], введение ортотропности в расчетную схему оболочек описано в публикациях [14-18], использование модели для расчета многослойных оболочек дано в работах [14-18].

В настоящей работе вводятся аппроксимации радиус-вектора, ковариантных и контравариантных базисных векторов, метрических тензоров, перемещений, тензоров деформаций и напряжений. Технология использования метода двойной аппроксимации по точкам суперсходимости и методика «понижения порядка аппроксимаций» деформаций поперечного сдвига в трехмерной постановке подробно описаны в [10]. Гипотеза малости

напряжений обжатия описана в приближенном виде, «упрощенный закон Гука», связывающий напряжение обжатия с деформацией обжатия, не используется.

Определяется матрица упругих констант для ортотропного материала. Упругие характеристики и угол намотки могут быть в общем случае различны для каждого слоя конечного элемента. Описаны соотношения сборки матрицы жесткости для многослойного ортотропного КЭ.

Решено несколько тестовых задач, на которых апробируется работоспособность предложенного КЭ и проходит верификация с решениями других авторов. Результаты показывают приемлемость применения данной методики для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкостенных конструкций. Для иллюстрации приведены результаты статического расчета руля высоты легкомоторного самолета, состоящего из многослойных оболочек.

### 1. Кинематические соотношения

В пределах каждого элемента вводится локальная система координат  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ , переводящая искривленный параллелепипед в единичный куб. Определим вектор-функцию произвольной материальной точки тонкостенной конструкции:

$$\vec{R} = X^i(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \vec{e}_i, \quad (1)$$

которая бы обеспечивала непрерывность её и её первых производных, т.е. базисных векторов, при переходе межэлементных границ. Проекция радиус-вектора аппроксимируем следующим образом:

$$X^i(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \sum_{t=1}^8 X_t^i N_t(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \quad (2)$$

где  $N_t(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  - функции формы КЭ оболочки.

Определим ковариантные базисные векторы:

$$\vec{R}_k = \frac{\partial X^i}{\partial \xi^k} e_i = R_k^i \vec{e}_i. \quad (3)$$

Компоненты соответствующего базиса запишем в виде:

$$R_k^i = \sum_{t=1}^8 X_t^i \frac{\partial N_t}{\partial \xi^k}, \quad (4)$$

а ковариантный базис вычислим по формулам:

$$\vec{R}^k = \frac{\partial \xi^k}{\partial X^i} = R^{k,i} \vec{e}_i. \quad (5)$$

Метрические тензоры в различных базисах, характеризующие геометрию, можно представить в виде следующих соотношений:

$$G_{ij} = \vec{R}_i \vec{R}_j = \sum_m R_i^m R_j^m, \quad (6)$$

$$G^{ij} = \vec{R}^i \vec{R}^j = \sum_m R^{i,m} R^{j,m}. \quad (7)$$

Введем аппроксимации вектора  $\vec{U}$  и градиента вектора  $\vec{U}_i$  перемещений:

$$\vec{U} = U^m (\xi_1, \xi_2, \xi_3) \vec{e}_m, \quad (8)$$

$$\vec{U}_i = \vec{e}_m \sum_{s=1}^8 U_s^m \frac{\partial N_s}{\partial \xi^i}. \quad (9)$$

Компоненты тензора деформаций определим в следующем виде:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\vec{U}_i \vec{R}_j + \vec{R}_i \vec{U}_j) = \sum_{r=1}^8 \sum_m^3 U_r^m E_{ij}^{r,m}, \quad (10)$$

где

$$E_{ij}^{r,m} = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^8 X_s^m \left( \frac{\partial N_r}{\partial \xi^i} \frac{\partial N_s}{\partial \xi^j} + \frac{\partial N_s}{\partial \xi^i} \frac{\partial N_r}{\partial \xi^j} \right). \quad (11)$$

Технология понижения порядка аппроксимации для деформаций поперечного сдвига  $\varepsilon_{i3}$ , где  $i=1,2$ , подробно описана в [10].

Обобщенный закон Гука запишем в следующем виде:

$$\sigma_{ij} = D_{ijmn} \varepsilon_{mn}. \quad (12)$$

Введем гипотезу малости напряжений обжатия:

$$\sigma_{33} = 0. \quad (13)$$

Используя соотношение (12), запишем выражение (13) в следующем виде:

$$D_{33mn} \varepsilon_{mn} = 0. \quad (14)$$

Представим (14) в виде выражения:

$$\begin{aligned} & D_{3311} \varepsilon_{11} + D_{3312} \varepsilon_{12} + D_{3313} \varepsilon_{13} + D_{3321} \varepsilon_{21} + D_{3322} \varepsilon_{22} + \\ & + D_{3323} \varepsilon_{23} + D_{3331} \varepsilon_{31} + D_{3332} \varepsilon_{32} + D_{3333} \varepsilon_{33} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Выразим из (15) деформацию обжатия:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{33} = & - (D_{3311} \varepsilon_{11} + D_{3312} \varepsilon_{12} + D_{3313} \varepsilon_{13} + D_{3321} \varepsilon_{21} + \\ & + D_{3322} \varepsilon_{22} + D_{3323} \varepsilon_{23} + D_{3331} \varepsilon_{31} + D_{3332} \varepsilon_{32}) / D_{3333}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя (16) в (12), получим:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^* = & D_{ij11} \varepsilon_{11} + D_{ij12} \varepsilon_{12} + D_{ij13} \varepsilon_{13} + D_{ij21} \varepsilon_{21} + D_{ij22} \varepsilon_{22} + D_{ij23} \varepsilon_{23} + \\ & + D_{ij31} \varepsilon_{31} + D_{ij32} \varepsilon_{32} - D_{ij33} (D_{3311} \varepsilon_{11} + D_{3312} \varepsilon_{12} + D_{3313} \varepsilon_{13} + \\ & + D_{3321} \varepsilon_{21} + D_{3322} \varepsilon_{22} + D_{3323} \varepsilon_{23} + D_{3331} \varepsilon_{31} + D_{3332} \varepsilon_{32}) / D_{3333}. \end{aligned} \quad (17)$$

Запишем (17) в более простом виде:

$$\sigma_{ij}^* = D_{ijmn}^* \varepsilon_{mn} = \left( D_{ijmn} - \frac{D_{ij33} D_{33mn}}{D_{3333}} \right) \varepsilon_{mn}, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned}
 D_{ij11}^* &= D_{ij11} - \frac{D_{ij33}D_{3311}}{D_{3333}}, D_{ij12}^* = D_{ij12} - \frac{D_{ij33}D_{3312}}{D_{3333}}, D_{ij13}^* = D_{ij13} - \frac{D_{ij33}D_{3313}}{D_{3333}}, \\
 D_{ij21}^* &= D_{ij21} - \frac{D_{ij33}D_{3321}}{D_{3333}}, D_{ij22}^* = D_{ij22} - \frac{D_{ij33}D_{3322}}{D_{3333}}, D_{ij23}^* = D_{ij23} - \frac{D_{ij33}D_{3323}}{D_{3333}}, \\
 D_{ij31}^* &= D_{ij31} - \frac{D_{ij33}D_{3331}}{D_{3333}}, D_{ij32}^* = D_{ij32} - \frac{D_{ij32}D_{3332}}{D_{3333}}, D_{3333}^* = D_{3333}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Записанная в таком виде гипотеза малости напряжений обжатия позволяет в явном виде ввести в расчетную схему физические постоянные как для изотропного, так и для ортотропного материала.

## 2. Ортотропность и многослойность

Среди множества способов расчета слоистых композитных оболочек особое место занимают численные методы, в частности МКЭ. Главное достоинство подобных алгоритмов состоит в возможности расчета тонкостенных конструкций сложной геометрии с переменными механическими характеристиками под действиями различных нагрузок.

Для анизотропного материала в общем случае соотношения теории упругости имеют довольно сложную структуру и записываются в виде компонент матрицы упругих констант  $D$  размерностью  $6 \times 6$ .

Обобщенный закон Гука для ортотропного тела имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{11} &= \frac{1}{E_1}(\sigma_{11} - \mu_{12}\sigma_{22} - \mu_{13}\sigma_{33}), \varepsilon_{22} = \frac{1}{E_2}(\sigma_{22} - \mu_{23}\sigma_{33} - \mu_{21}\sigma_{11}), \\
 \varepsilon_{33} &= \frac{1}{E_3}(\sigma_{33} - \mu_{32}\sigma_{11} - \mu_{32}\sigma_{22}), \gamma_{12} = 2\varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}}, \gamma_{23} = 2\varepsilon_{23} = \frac{\sigma_{23}}{G_{23}}, \\
 \gamma_{31} &= 2\varepsilon_{31} = \frac{\sigma_{31}}{G_{31}}.
 \end{aligned} \tag{20}$$

Здесь упругие постоянные выражены через применяемые в технике показатели: модули упругости  $E$  и сдвига  $G$ , а также коэффициента поперечной деформации  $\mu$ .

Таким образом, для установления связей между тензорами напряжений и деформаций необходимо 12 упругих постоянных, из которых 9 постоянно независимы. При этом коэффициенты Пуассона и модули упругости связаны соотношениями:

$$\frac{\mu_{12}}{E_1} = \frac{\mu_{21}}{E_2}, \frac{\mu_{23}}{E_2} = \frac{\mu_{32}}{E_3}, \frac{\mu_{31}}{E_3} = \frac{\mu_{13}}{E_1}. \tag{21}$$

Тогда компоненты матрицы упругости для ортотропного материала запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 D_{1111} &= \frac{1}{AE_2} \left( \frac{1}{E_3} - \frac{\mu_{23}^2}{E_2} \right), D_{2222} = \frac{1}{AE_3} \left( \frac{1}{E_1} - \frac{\mu_{31}^2}{E_3} \right), D_{3333} = \frac{1}{AE_1} \left( \frac{1}{E_2} - \frac{\mu_{12}^2}{E_1} \right), \\
 D_{1122} &= D_{2211} = \frac{1}{AE_3} \left( \frac{\mu_{31}\mu_{23}}{E_2} + \frac{\mu_{12}}{E_1} \right), D_{1133} = D_{3311} = \frac{1}{AE_2} \left( \frac{\mu_{12}\mu_{23}}{E_1} + \frac{\mu_{31}}{E_3} \right), \\
 D_{2233} &= D_{3322} = \frac{1}{AE_1} \left( \frac{\mu_{12}\mu_{31}}{E_3} + \frac{\mu_{23}}{E_2} \right), D_{1212} = G_{12}, D_{2323} = G_{23}, D_{3131} = G_{31},
 \end{aligned} \tag{22}$$

где

$$A = \frac{1}{E_1 E_2 E_3} \left( 1 - 2\mu_{12}\mu_{23}\mu_{31} - \frac{E_1}{E_3} \mu_{31}^2 - \frac{E_2}{E_1} \mu_{12}^2 - \frac{E_3}{E_2} \mu_{23}^2 \right). \tag{23}$$

Наиболее часто в практике расчетов многослойных конструкций встречается преобразование коэффициентов матрицы упругости ортотропного тела при повороте системы координат вокруг своей оси  $Oe_3'$  (которая совпадает с нормалью к плоскости слоя) на угол  $\varphi$  (рис. 1).

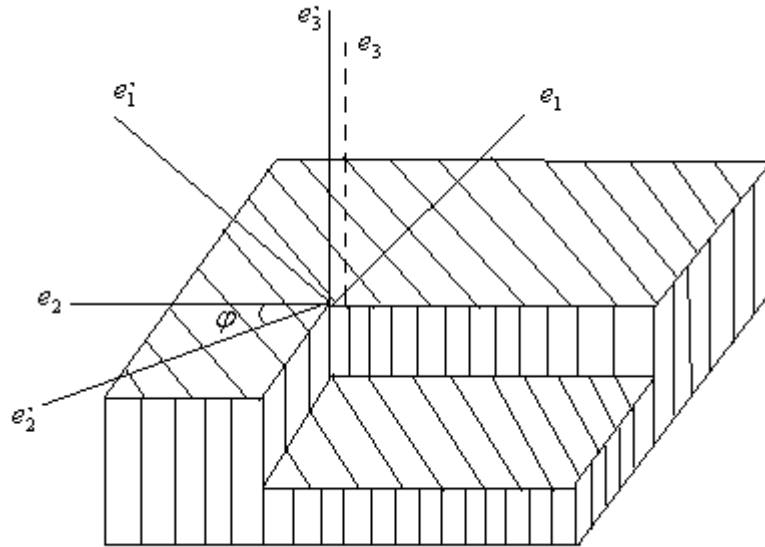


Рис. 1. Поворот системы координат вокруг нормали к плоскости слоя

Матрица коэффициентов упругости  $D$  в осях слоя  $Oe_1'e_2'e_3'$  имеет вид (22), (23). Преобразование коэффициентов упругости осуществляется следующим образом:

$$D^{**} = \beta^T D^* \beta, \tag{24}$$

где для случая поворота вокруг оси  $Oe_3'$  коэффициенты матрицы угла поворота  $\beta$  имеют следующий вид:

$$\beta = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 0 & sc & 0 & 0 \\ s^2 & c^2 & 0 & -sc & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2sc & 2sc & 0 & c^2 - s^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c & -s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s & c \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где

$$c = \text{Cos}\varphi, s = \text{Sin}\varphi. \quad (26)$$

Подставив (25) в (24), получим следующие соотношения для ненулевых компонентов симметричной матрицы  $D^{**}$ :

$$\begin{aligned} D_{1111}^{**} &= D_{1111}^* c^4 + D_{2222}^* s^4 + 2(D_{1122}^* + 2D_{1212}^*) s^2 c^2, \\ D_{1122}^{**} &= D_{1122}^* (c^4 + s^4) + (D_{1111}^* + D_{2222}^* - 4D_{1212}^*) s^2 c^2, \\ D_{1133}^{**} &= D_{1133}^* c^2 + D_{2233}^* s^2, D_{3333}^{**} = D_{3333}^*, D_{3312}^{**} = (D_{1133}^* - D_{2233}^*) sc, \\ D_{1112}^{**} &= [D_{1111}^* c^2 + (D_{1122}^* + 2D_{1212}^*)(s^2 - c^2) - D_{2222}^* s^2] sc, \\ D_{2222}^{**} &= D_{1111}^* s^4 + D_{2222}^* c^4 + 2(D_{1122}^* + 2D_{1212}^*) s^2 c^2, \\ D_{2233}^{**} &= D_{1133}^* s^2 + D_{2233}^* c^2, D_{2323}^{**} = D_{2323}^* c^2 + D_{3131}^* s^2, \\ D_{2212}^{**} &= [D_{1111}^* s^2 + (D_{1122}^* + 2D_{1212}^*)(c^2 - s^2) - D_{2222}^* c^2] sc, \\ D_{1212}^{**} &= (D_{1111}^* - 2D_{1122}^* + D_{2222}^*) s^2 c^2 + D_{1212}^* (c^2 - s^2)^2, \\ D_{2331}^{**} &= (-D_{2323}^* + D_{3131}^*) sc, D_{3131}^{**} = D_{2323}^* s^2 + D_{3131}^* c^2. \end{aligned} \quad (27)$$

Так как на практике большинство материалов имеют слоистую структуру с различными по толщине механическими характеристиками, в общем случае не симметричными, то целесообразнее применять многослойный конечный элемент. Значения толщин каждого слоя  $h_k$  удобнее задавать в виде их относительных значений:

$$\Delta_k = \frac{h_k}{h}, h = \sum_{k=1}^N h_k, \sum_{k=1}^N \Delta_k = 1, \quad (28)$$

где  $N$  – количество слоев. Если толщина каждого слоя одинакова, то:

$$\Delta_k = \frac{1}{N}. \quad (29)$$

Межслойные координаты по толщине внутри КЭ можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= -1, \zeta_2 = -1 + 2\Delta_1, \zeta_3 = -1 + 2\Delta_1 + 2\Delta_2, \\ \dots, \zeta_k &= -1 + 2\sum_{k=1}^{n-1} \Delta_k, \dots, \zeta_{N+1} = 1. \end{aligned} \quad (30)$$

При вычислении матрицы жесткости применяется квадратурная формула Гаусса-Лежандра порядка  $2 \times 2 \times N$ , где  $N$  – количество слоев. Таким образом, координаты квадратурных точек в направлении оси  $\zeta$  определяются в середине толщины каждого слоя:

$$\zeta_k^* = \frac{1}{2}(\zeta_k + \zeta_{k+1}). \quad (31)$$

Тогда компоненты матрицы жесткости можно вычислить следующим образом:

$$D_{ab}^{rc} = G^{oi} G^{pj} D_{ijmn}^{**} E_{mn}^{ra} E_{op}^{cb} \sqrt{G} 2\Delta_k, \quad (32)$$

где  $r, c = 1, 8, a, b, i, j, m, n, o, p = 1, 3$ .

Компоненты напряжений вычисляются в четырех квадратурных точках, определенных в середине каждого слоя, и далее интерполируются в узлы. Так как при расчете НДС тонкостенных конструкций используется однослойная аппроксимация, то приемлемая точность достигается уже при количестве слоев  $N \geq 3$ .

### 3. Тестовые задачи

Для верификации оболочечного конечного элемента рассмотрим ряд тестовых задач [19]. Используем модели изотропного и ортотропного тела. Для изотропного тела примем модуль Юнга  $E = 200 \text{ ГПа}$ , коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Для ортотропного тела:  $E_1 = E_3 = 20 \text{ ГПа}; E_2 = 200 \text{ ГПа}; \mu_{12} = \mu_{23} = \mu_{31} = 0,03; G_{12} = G_{23} = G_{31} = 28,6 \text{ ГПа}$ .

Приведем сравнение с аналитическим решением [19] и с ППП ANSYS.

Рассмотрим квадратную пластинку, длина стороны которой  $a = 0,4 \text{ м}$ , толщина  $h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Из условий симметрии рассматривается четверть пластинки. Представим следующие способы нагрузки:

1) Шарнирно – опертая пластинка, нагруженная в центре сосредоточенной силой  $P = 500 \text{ Н}$ . Найдем прогиб  $w$  (см) точки приложения силы  $P$ . Результаты расчета представлены в табл. 1, табл. 2. В качестве точного решения принято аналитическое решение [19].

Таблица 1

Значения прогибов при сосредоточенной нагрузке для изотропного материала

$W_{теор}$ (см)	Сетка	$2 \times 2$	$3 \times 3$	$4 \times 4$	$5 \times 5$	$10 \times 10$
0.00633	Program	0.0063	0.0063	0.0063	0.0063	0.00633
	ANSYS	0.006586	0.006461	0.006412	0.006388	0.00635

Таблица 2

Значения прогибов при сосредоточенной нагрузке для ортотропного материала

$W_{теор}$ (см)	Сетка	$2 \times 2$	$3 \times 3$	$4 \times 4$	$5 \times 5$	$10 \times 10$
0.0145	Program	0.0163	0.0167	0.0169	0.017	0.0171
	ANSYS	0.017188	0.016984	0.016997	0.017027	0.017106

2) Шарнирно – опертая квадратная пластинка, нагруженная распределенной нагрузкой  $q = 1,25 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ . Результаты расчета представлены в табл. 3, табл. 4. В качестве точного решения принято аналитическое решение [19].

Таблица 3

Значения прогибов при равномерной нагрузке для изотропного материала

$W_{теор}$ (см)	Сетка	2×2	3×3	4×4	5×5	10×10
0.0087	Program	0.0087	0.0088	0.0088	0.0088	0.0089
	ANSYS	0.008378	0.008646	0.008744	0.00879	0.008851

Таблица 4

Значения прогибов при равномерной нагрузке для ортотропного материала

$W_{теор}$ (см)	Сетка	2×2	3×3	4×4	5×5	10×10
0.0214	Program	0.0216	0.0218	0.0219	0.0219	0.022
	ANSYS	0.021007	0.021526	0.021729	0.021822	0.021951

Для определения границ применимости описанной выше модели относительно геометрических размеров и различий жесткостных характеристик слоев, с учетом ортотропной структуры материала, проводилось сравнение конечно – элементного решения задачи изгиба трехслойной квадратной шарнирно – опертой пластины под синусоидальной и равномерно – распределенной нагрузкой со следующими параметрами:

$$E_1 = E_3 = 172 \cdot 10^3 \text{ МПа}, E_2 = 6.9 \cdot 10^3 \text{ МПа}, G_{12} = G_{13} = 3.45 \cdot 10^3 \text{ МПа},$$

$$G_{23} = 1.38 \cdot 10^3 \text{ МПа}, \mu_{12} = \mu_{23} = \mu_{31} = 0.01, q_1 = q_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}, q_2 = q_0.$$

С учетом симметрии рассматривалась четверть пластины. Рассматривался следующий вариант укладки слоев трехслойной пластины с углами  $\psi = 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$  и толщинами  $\frac{h}{4}, \frac{h}{2}, \frac{h}{4}$ . Верификация проводилась с другими приближенными решениями авторов и с использованием ППП ANSYS.

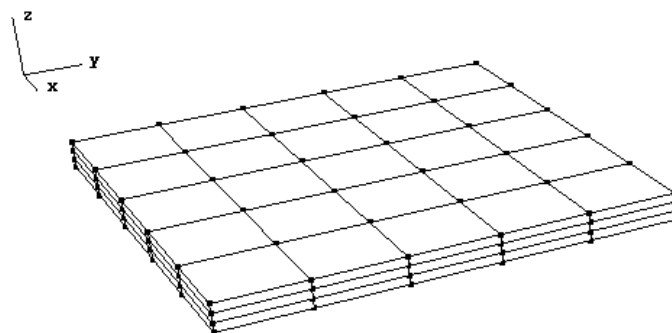


Рис. 1. Конечно-элементное разбиение многослойной пластины

В табл. 5 (при синусоидальной нагрузке) и в табл. 6 (при равномерно распределенной нагрузке) представлены безразмерные величины:



$$w^* = \frac{wQ}{q_0 h} \left(\frac{h}{a}\right)^4, \sigma^* = \frac{\sigma}{q_0} \left(\frac{h}{a}\right)^2, \tau^* = \frac{\tau}{q_0} \left(\frac{h}{a}\right)^2,$$

$$Q = \frac{\pi^4}{12} \left[ 4G_{12} + \frac{1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} (E_1 + (1 + 2\mu_{12})E_2) \right],$$

где  $q_0 = 1$  – интенсивность поперечной нагрузки,  
 $a$  – линейный размер пластины,  
 $h$  – толщина пластины.

Таблица 5

Значения прогибов и напряжений при синусоидальной нагрузке

$a/h$	Тип решения	$w^*$ $\left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{h}{2}\right)$	$\sigma_x^*$ $\left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{h}{2}\right)$	$\tau_{xy}^*$ $\left(0, 0, \frac{h}{2}\right)$
100	Program	1,06	0,482	0,0196
	[20]	1,008	0,539	0,0214
	[21]	1,003	0,566	0,0223

Таблица 6

Значения прогибов и напряжений при равномерной нагрузке

$a/h$	Тип решения	$w^*$ $\left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{h}{2}\right)$	$\sigma_x^*$ $\left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{h}{2}\right)$	$\sigma_y^*$ $\left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{h}{2}\right)$	$\tau_{xy}^*$ $\left(0, 0, \frac{h}{2}\right)$
100	Program	1,7	0,7	0.0347	0.0385
	ANSYS	1,6	0,8	0.0304	0.0367

В качестве примера приведен расчет НДС руля высоты легкомоторного самолета. Руль высоты представляет собой сложную оболочечную конструкцию, усиленную корневой нервюрой и лонжеронами, конечно-элементное разбиение которой приведено на рис. 2.

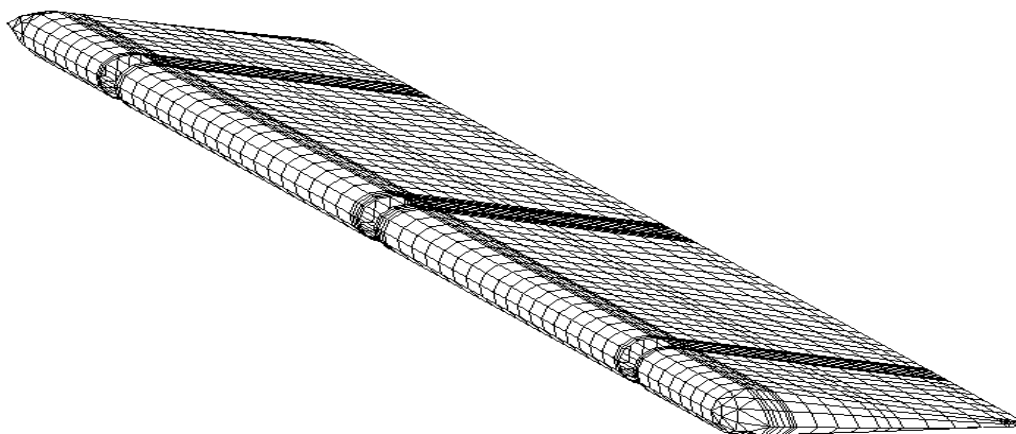


Рис. 2. Конечно-элементное разбиение руля высоты легкомоторного самолета

На рис. 3 приведено распределение прогибов  $W$  (см) для случая равномерного нагружения по внешней лицевой поверхности руля высоты (из-за условий симметрии приводится половина конструкции).

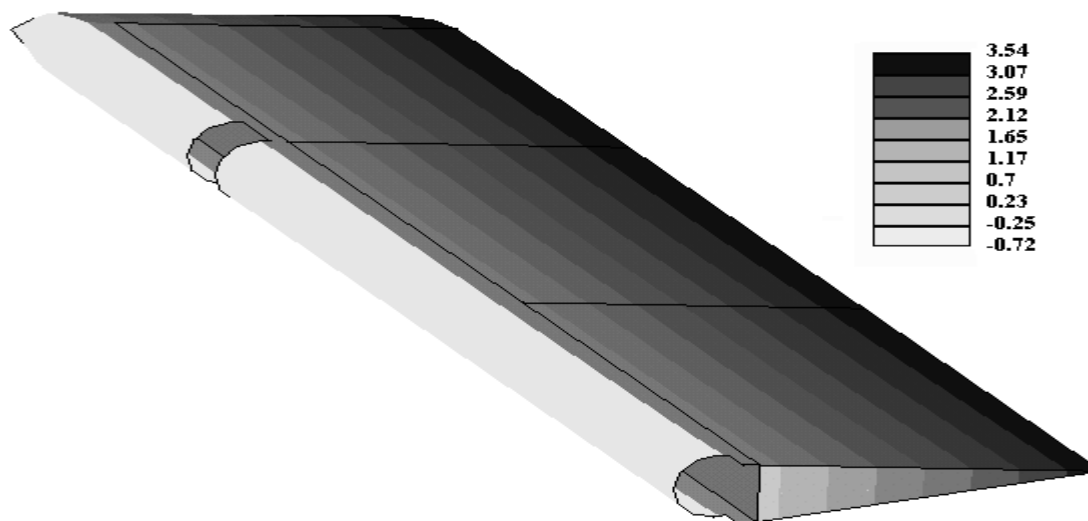


Рис. 3. Распределение прогибов  $W$  для случая равномерного нагружения по внешней лицевой поверхности руля высоты

По результатам экспериментальных данных  $W_{max}^{эсп} = 3.39$  см.

#### 4. Выводы

Исходя из полученных результатов, следует отметить, что разработанная численная методика исследования напряженно-деформированного состояния ортотропных многослойных оболочек сложной геометрии дает результаты, хорошо согласующиеся с данными натурных испытаний. Следовательно, на ее основе можно рассчитывать подобные конструкции и получать достоверные результаты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1980. 375 с.
2. Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин. М.: Машиностроение, 1988. 288 с.
3. Соловьев С.С. Конечноэлементная модель многослойной оболочки с анизотропными слоями переменной толщины // Известия Вузов. Авиационная техника. 1989. №4. С. 71-75.
4. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
5. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 270 с.
6. Григоренко Я.М., Василенко А.Т., Голуб Г.П. Статика анизотропных оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. Киев: Наукова Думка, 1987. 216 с.
7. Пискунов В.Г. Расчет неоднородных оболочек и пластин методом конечных элементов. Киев: Вища Школа, 1987. 200 с.
8. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Знание, 1988. 284 с.
9. Рассказов А.О., Соколовская И.И., Шульга Н.А. Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек. Киев: Вища школа, 1986. 191 с.

- 10 Голованов А.И., Сагдатуллин М.К. Трехмерный конечный элемент для расчета тонкостенных конструкций // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физ. – мат. наук. Казань, 2009. Т. 151, кн. 3. С. 121-129.
11. Бурман Я.З., Соловьев С.С. Расчет упругопластического деформирования оболочек на основе теории течения и МКЭ. Исследования по теории пластин и оболочек. Казань: Изд-во КГУ, 1990. №22. С. 98-107.
12. Parish H.A. Critical survey of the J-node degenerated shell element with special emphasis on thin shell application and reduced integration. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1979. Vol. 20. №3. P. 323-350.
13. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Too J.M. Reduced integration technique in general analysis of plates and shells // Int. J. Num. Meth. Eng., 1971. V.3. P. 275-290.
14. Голованов А.И., Песошин А.В., Тюленева О.Н. Современные конечно-элементные модели и методы исследования тонкостенных конструкций. Казань: КГУ, 2005. 442 с.
15. Голованов А.И., Тюленева О.Н., Шигабутдинов А.Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 392 с.
16. Голованов А.И., Бережной Д.В. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел. Казань: Издательство «ДАС», 2001. 301 с.
17. Попов Б.Г. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ, 1993. 294 с.
18. Хечумов Р.А., Кеплер Х., Прокопьев В.И. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций: Учебное пособие для технических вузов. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1994. 353 с.
19. Шлычков С. В. Оценка точности расчетной модели напряженно-деформированного состояния тонкостенных элементов музыкальных струнных инструментов // Исследовано в России. 2000. С. 245-262.
20. Пагано Н., Хэтфилд С. Упругое поведение многослойного двунаправленного композиционного материала // Ракетная техника и космонавтика. 1972. Т. 10. № 7. С. 98–101.
21. Panda S., Natarajan R. Finite element analysis of laminated composite plates // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1979. V. 14. №1. P. 69–79.

**Бережной Дмитрий Валерьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, механико-математический факультет

**Berezhnoi Dmitri Valerjevich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department “Mechanics and Mathematics”, Kazan (Volga region) Federal University

**Сагдатуллин Марат Камилевич** – аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, механико-математический факультет

**Sagdatullin Marat Kamilevich** – Post-graduate Student of the Department “Mechanics and Mathematics”, Kazan (Volga region) federal university

*Статья поступила в редакцию 12.05.2011 , принята к опубликованию 15.08.2011*

УДК 621.822.6

**А.А. Никитин, Г.М. Цимбалов**

**ПРИБЛИЖЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ  
КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ НАРУЖНОГО КОЛЬЦА  
ПОДШИПНИКА**

*Сформулированы граничные условия для системы уравнений упругости в перемещениях. Приведено построение аналитического решения этой системы. Определены произвольные постоянные упругих смещений кольца.*

Кольца подшипника, граничные условия, аналитические вычисления

**A.A. Nikitin, G.M. Tshymbalov**

**THE APPROACHED ANALYTICAL DECISION OF THE DYNAMIC EQUATIONS  
CLASSICAL THEORY OF ELASTICITY FOR THE EXTERNAL RING  
OF THE BEARING**

*Boundary conditions for system of the equations of elasticity in movings are formulated. Construction of the analytical decision of this system is resulted. Any constants of elastic displacement of a ring are defined.*

Ring of the bearing, boundary conditions, analytical decision

В работе [1] было показано, что для определения упругих смещений кольца необходимо решить систему из двух уравнений:

$$\rho\gamma_7 \frac{\partial^2 U_r}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{U_r}{r^2} + \gamma_6 \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} + \gamma_5 \frac{\partial^2 U_z}{\partial r \partial z} + \gamma_7 F_r(r, t) \delta(r - R_1); \quad (1)$$

$$\rho\gamma_7 \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \gamma_6 \left( \frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) + \gamma_5 \left( \frac{\partial^2 U_r}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + \gamma_7 F_z(z, t) \delta(r - R_1) + W_z \gamma_7; \quad (2)$$

$$R_1 < r < R_2; \quad 0 < z < h.$$

Физический смысл величин, входящих в уравнения (1–2), определен в [1]. Как известно, структура решения уравнений (1–2) определяется не только видом этих уравнений, но и типом граничных условий, которым эти решения должны удовлетворять. Поэтому имеет смысл рассмотреть этот вопрос подробно.

**1. Формулировка граничных условий.** Из общей теории решения дифференциальных уравнений в частных производных известно, что установившееся во времени решение системы (1–2) должно содержать совокупность произвольных постоянных, для определения которых необходимо задать восемь граничных условий (начальные условия в этом случае не играют роли, поэтому они, при отыскании решения уравнений (1–2), не учитываются).

Четыре граничных условия должны быть заданы на поверхностях  $r = R_1$  и  $r = R_2$ . Еще четыре – на торцах кольца (поверхности  $z = 0$  и  $z = h$ ). При их задании необходимо учитывать следующие соображения. Наружное кольцо подшипника нигде не закреплено. Оно

удерживается в пространстве за счет взаимодействия сил, поддерживающих его динамическое равновесие. Последнее означает, что на всех границах должны быть заданы силы. В классической теории упругости в таком случае граничные условия задаются следующим образом. Пусть внешние силы на границах упругого тела описываются вектором поверхностной плотности силы  $\bar{Q}$ . Тогда на границе с единичным нормальным вектором  $\bar{n}$  граничные условия записываются так:

$$\sum_{k=1}^3 \sigma_{ik} n_k = Q_i,$$

где  $n_k, Q_i$  – компоненты векторов  $\bar{n}$  и  $\bar{Q}$ ;  
 $\sigma_{ik}$  – компоненты тензора напряжений.

Этим выражением мы и будем руководствоваться при задании граничных условий на поверхностях наружного кольца подшипника.

При общей постановке задачи мы включили силы на границе, обусловленные движением шариков, в уравнения (1–2) в качестве объемных источников. Поэтому эту границу будем считать свободной от нагрузок и соответственно этому граничные условия запишем в виде:

$$\sigma_{rr}(R_1, z, t) = 0; \quad \sigma_{rz}(R_1, z, t) = 0. \quad (3)$$

Граница  $r = R_2$  по условиям эксперимента также свободна от нагрузок (свободное вращение подшипника на валу). Однако чтобы обеспечить неподвижность наружного кольца, на эту границу может быть приложена слабая прижимная нагрузка. Поэтому в самом общем случае граничные условия на поверхности  $r = R_2$  следует задать в виде:

$$\sigma_{rr}(R_2, z, t) = Q_r = \text{const}; \quad \sigma_{rz}(R_2, z, t) = Q_z = \text{const}. \quad (4)$$

При свободном вращении подшипника на валу на торцевые поверхности кольца также могут быть наложены нормальные прижимные усилия. Учитывая это, запишем первую пару граничных условий на торцах в виде:

$$\sigma_{zz}(0, r, t) = -T_1 = \text{const}; \quad \sigma_{zz}(h, r, t) = T_2 = \text{const}, \quad (5)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – средняя поверхностная плотность прижимных усилий на границах  $z = 0$  и  $z = h$  соответственно.

Вторая пара торцевых граничных условий должна учитывать отсутствие касательных напряжений на торцевых поверхностях, т.е. должны выполняться равенства:

$$\sigma_{rz}(0, r, t) = 0; \quad \sigma_{rz}(h, r, t) = 0. \quad (6)$$

Выражения (3–6) образуют систему из восьми граничных условий, которым должны удовлетворять перемещения наружного кольца свободно вращающегося подшипника. Если в них подставить значения компонент тензора напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &= E\gamma_1 \left[ \gamma_2 \frac{\partial U_r}{\partial r} + \gamma_3 \left( \frac{U_r}{r} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \right], \\ \sigma_{zz} &= E\gamma_1 \left[ \gamma_2 \frac{\partial U_r}{\partial r} + \gamma_3 \left( \frac{U_r}{r} + \frac{\partial U_r}{\partial r} \right) \right], \\ \sigma_{rz} = \sigma_{rz} &= E\gamma_4 \left[ \frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\gamma_1 = \frac{1}{1-2\sigma}$ ;  $\gamma_2 = \frac{1-\sigma}{1+\sigma}$ ;  $\gamma_3 = \frac{\sigma}{1+\sigma}$ ;  $\gamma_4 = \frac{1}{2(1+\sigma)}$ ,

$E$  – модуль упругости,  
 $\sigma$  – коэффициент Пуассона,

то получим так называемые смешанные граничные условия, содержащие неизвестную функцию и ее пространственные производные.

**2. Построение аналитического решения системы (1–2).** В соответствии с представлением компонент вектора плотности силы  $\bar{F}(t, z)$  в виде рядов, приведенных в предыдущей статье этого сборника, решение уравнений (1–2) следует искать в виде:

$$U_r = U_r^{(1)} + U_r^{(2)} + C_4 r z; \quad U_z = U_z^{(1)} + U_z^{(2)} - \frac{\gamma_5}{2\gamma_6 C_4 r^2} - \frac{1}{2} W_z \gamma_7 z^2; \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} U_r^{(1)} &= \sum_{m=0}^{\infty} a_m^{(1)}(r, z) \cos v_m t; & U_r^{(2)} &= \sum_{m=1}^{\infty} a_m^{(2)}(z, r) \sin v_m t; \\ U_z^{(1)} &= \sum_{m=0}^{\infty} b_m^{(1)}(r, z) \cos v_m t; & U_z^{(2)} &= \sum_{m=1}^{\infty} b_m^{(2)}(z, r) \sin v_m t, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $C_4$  – произвольная постоянная;

$$\gamma_5 = \frac{1}{2(1-\sigma)}; \quad \gamma_6 = \frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)}.$$

Подставим (8–9) в (1–2), получим две независимые системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -v_m^2 \rho \gamma_7 a_m^{(1)} &= \frac{\partial^2 a_m^{(1)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial a_m^{(1)}}{\partial r} - \frac{a_m^{(1)}}{r^2} + \gamma_6 \frac{\partial^2 a_m^{(1)}}{\partial z^2} + \gamma_5 \frac{\partial^2 b_m^{(1)}}{\partial r \partial z} + \gamma_7 \sum_{n=1}^{\infty} A_{nm}^{(r)} \sin k_n z \delta(r - R_1); \\ m &= 0, 1, 2, \dots \\ -v_m^2 \rho \gamma_7 b_m^{(1)} &= \frac{\partial^2 b_m^{(1)}}{\partial z^2} + \gamma_6 \left( \frac{\partial^2 b_m^{(1)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial b_m^{(1)}}{\partial r} \right) + \gamma_5 \left( \frac{\partial^2 a_m^{(1)}}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial a_m^{(1)}}{\partial z} \right) + \\ &+ \gamma_7 \sum_{n=1}^{\infty} A_{nm}^{(z)} \sin k_n z \delta(r - R_1); \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} -v_m^2 \rho \gamma_7 a_m^{(2)} &= \frac{\partial^2 a_m^{(2)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial a_m^{(2)}}{\partial r} - \frac{a_m^{(2)}}{r^2} + \gamma_6 \frac{\partial^2 a_m^{(2)}}{\partial z^2} + \gamma_5 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}}{\partial r \partial z} + \gamma_7 \sum_{n=1}^{\infty} B_{nm}^{(r)} \sin k_n z \delta(r - R_1); \\ m &= 1, 2, \dots \\ -v_m^2 \rho \gamma_7 b_m^{(2)} &= \frac{\partial^2 b_m^{(2)}}{\partial z^2} + \gamma_6 \left( \frac{\partial^2 b_m^{(2)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial b_m^{(2)}}{\partial r} \right) + \gamma_5 \left( \frac{\partial^2 a_m^{(2)}}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial a_m^{(2)}}{\partial z} \right) + \\ &+ \gamma_7 \sum_{n=1}^{\infty} B_{nm}^{(z)} \sin k_n z \delta(r - R_1); \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\gamma_7 = \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)};$$

Наиболее полное решение системы (10–11) записывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} a_m^{(1)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{nm}^{(1)}(r) \sin k_n z + \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_{nm}^{(2)}(r) \cos k_n z; \\ b_m^{(1)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{nm}^{(3)}(r) \sin k_n z + \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_{nm}^{(4)}(r) \cos k_n z; \\ m &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} a_m^{(2)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \omega_{nm}^{(1)}(r) \sin k_n z + \sum_{n=0}^{\infty} \omega_{nm}^{(2)}(r) \cos k_n z; \\ b_m^{(2)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \omega_{nm}^{(3)}(r) \sin k_n z + \sum_{n=0}^{\infty} \omega_{nm}^{(4)}(r) \cos k_n z; \\ m &= 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Подставим (12) в (10), получим систему из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка для определения функций  $\varphi_{nm}^{(i)}(r)$ :

$$\frac{d^2 \varphi_{nm}^{(1)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_{nm}^{(1)}}{dr} + \left[ (v_m^2 \gamma_8 - k_n^2 \gamma_6) - \frac{1}{r^2} \right] \varphi_{nm}^{(1)} - \gamma_5 k_n \frac{d\varphi_{nm}^{(4)}}{dr} + \gamma_7 A_{nm}^{(r)} \delta(r - R_1) = 0; \quad (14)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots$$

$$\frac{d^2 \varphi_{nm}^{(2)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_{nm}^{(2)}}{dr} + \left[ (v_m^2 \gamma_8 - k_n^2 \gamma_6) - \frac{1}{r^2} \right] \varphi_{nm}^{(2)} + \gamma_5 k_n \frac{d\varphi_{nm}^{(3)}}{dr} = 0; \quad (15)$$

$$m = 1, 2, \dots; n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\frac{d^2 \varphi_{nm}^{(3)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_{nm}^{(3)}}{dr} + \left[ \frac{v_m^2 \gamma_8 - k_n^2}{\gamma_6} \right] \varphi_{nm}^{(3)} - \frac{\gamma_5}{\gamma_6} k_n \left[ \frac{d\varphi_{nm}^{(2)}}{dr} + \frac{1}{r} \varphi_{nm}^{(2)} \right] + \frac{\gamma_7}{\gamma_6} A_{nm}^{(z)} \delta(r - R_1) = 0; \quad (16)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots$$

$$\frac{d^2 \varphi_{nm}^{(4)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_{nm}^{(4)}}{dr} + \left[ \frac{v_m^2 \gamma_8 - k_n^2}{\gamma_6} \right] \varphi_{nm}^{(4)} + \frac{\gamma_5}{\gamma_6} k_n \left[ \frac{d\varphi_{nm}^{(1)}}{dr} + \frac{1}{r} \varphi_{nm}^{(1)} \right] = 0; \quad (17)$$

$$m = 1, 2, \dots; n = 0, 1, 2, \dots$$

где  $\gamma_8 = \gamma_7 \rho$ .

Для значений  $m=0$  и  $n=0$  получаем такую систему уравнений с неизвестными  $\varphi_{00}^{(2)}$  и  $\varphi_{00}^{(4)}$ :

$$\frac{d^2 \varphi_{00}^{(2)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_{00}^{(2)}}{dr} - \frac{1}{r^2} \varphi_{00}^{(2)} = 0; \quad (18)$$

$$\frac{d^2 \varphi_{00}^{(4)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_{00}^{(4)}}{dr} = 0; \quad (19)$$

Из (9), (12), (18–19) следует, что:

$$\begin{aligned} U_r^{(1)} &= C_1 r + \frac{C_2}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{n0}^{(1)}(r) \sin\{k_n z\} + \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{n0}^{(2)}(r) \cos\{k_n z\} + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (\varphi_{nm}^{(1)}(r) \sin k_n z + \varphi_{nm}^{(2)}(r) \cos k_n z) \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \varphi_{0m}^{(2)}(r) \cos v_m t, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} U_z^{(1)} &= C_3 \ln \left( \frac{r}{R_1} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{n0}^{(3)}(r) \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{n0}^{(4)}(r) \cos k_n z + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (\varphi_{nm}^{(3)}(r) \sin k_n z + \varphi_{nm}^{(4)}(r) \cos k_n z) \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \varphi_{0m}^{(4)}(r) \cos v_m t, \end{aligned} \quad (21)$$

Точно так же из (9), (13) получаем:

$$U_r^{(2)} = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (\omega_{nm}^{(1)}(r) \sin k_n z + \omega_{nm}^{(2)}(r) \cos k_n z) \right\} \sin v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \omega_{0m}^{(2)}(r) \sin v_m t; \quad (22)$$

$$U_z^{(2)} = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (\omega_{nm}^{(3)}(r) \sin k_n z + \omega_{nm}^{(4)}(r) \cos k_n z) \right\} \sin v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \omega_{0m}^{(4)}(r) \sin v_m t; \quad (23)$$

Дифференциальные уравнения для определения функций аналогичны уравнениям (14–17), только следует провести замену коэффициентов  $A_{nm}^{(r)}, A_{nm}^{(z)}$  на  $B_{nm}^{(r)}, B_{nm}^{(z)}$  и исключить уравнение с индексом  $m=0$ . Учитывая это, мы в дальнейшем будем рассматривать только решение системы (14–17), опуская все выкладки, связанные с определением функций  $\omega_{nm}^{(\beta)}$ , так как они полностью идентичны.

Решения (8–9), (20–23) построены путем точных аналитических вычислений. С помощью них нам удалось свести задачу по решению системы из двух линейных уравнений второго порядка в частных производных (1–2) к задаче решения системы из четырех линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка вида (14–17). Однако как построить точное аналитическое решение этой, казалось бы, достаточно простой системы, мы не знаем. Следовательно, предстоит довольно трудная задача найти адекватный способ упрощения системы (14–17), позволяющий построить ее аналитическое решение и в то же время сохраняющий характерные особенности упругих колебаний, свойственных полуму цилиндру.

**3. Модификация системы (14–17) и ее решение.** Не трудно видеть, что препятствием для точного аналитического решения системы (14–17) являются слагаемые, учитывающие кривизну цилиндрической оболочки. Представим систему (14–17), выделяя указанные слагаемые в отдельную группу и обозначая их через  $\Psi_i(r)$ :

$$\frac{d^2\varphi_{nm}^{(1)}}{dr^2} + a_1\varphi_{nm}^{(1)} + a_3\delta(r - R_1) + \Psi_1(r) = 0; \quad \Psi_1(r) = \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \varphi_{nm}^{(1)} - \gamma_5 k_n \varphi_{nm}^{(4)} \right]; \quad (24)$$

$$\frac{d^2\varphi_{nm}^{(2)}}{dr^2} + a_1\varphi_{nm}^{(2)} + \Psi_2(r) = 0; \quad \Psi_2(r) = \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \varphi_{nm}^{(2)} - \gamma_5 k_n \varphi_{nm}^{(3)} \right]; \quad (25)$$

$$\frac{d^2\varphi_{nm}^{(3)}}{dr^2} + a_2\varphi_{nm}^{(3)} + a_4\delta(r - R_1) + \Psi_3(r) = 0; \quad \Psi_3(r) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ \varphi_{nm}^{(3)} - \frac{\gamma_5}{\gamma_6} k_n r \varphi_{nm}^{(2)} \right]; \quad (26)$$

$$\frac{d^2\varphi_{nm}^{(4)}}{dr^2} + a_2\varphi_{nm}^{(4)} + \Psi_4(r) = 0; \quad \Psi_4(r) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ \varphi_{nm}^{(4)} - \frac{\gamma_5}{\gamma_6} k_n r \varphi_{nm}^{(1)} \right]; \quad (27)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= v_m^2 \gamma_8 - \gamma_6 k_n^2; & a_2 &= (v_m^2 \gamma_8 - k_n^2) / \gamma_6; \\ a_3 &= \gamma_7 A_{nm}^{(r)}; & a_4 &= \gamma_7 A_{nm}^{(z)} / \gamma_6. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Для упрощения записи формул мы опустили индексы  $n$  и  $m$  у величин  $\Psi_i$  и  $a_j$ . Этот прием мы будем использовать и в дальнейшем, не всегда оговаривая это особо.

Запись уравнений (14–17) в форме (24–27) отчетливо показывает, что функции  $\Psi_i(r)$ , наряду с шариками (их влияние учитывается через коэффициенты  $a_3$  и  $a_4$ ), являются своеобразными источниками, влияющими на величину амплитуд  $\varphi_{nm}^{(i)}$  пространственных гармоник упругих колебаний кольца. Природа этих источников чисто геометрическая, вызванная кривизной полого цилиндра. Упрощение системы (24–27), которое мы будем использовать, заключается в замене функций  $\Psi_i(r)$  их средними по сечению кольца значениями:

$$\begin{aligned} \Psi_1(r) \approx \bar{\Psi}_1 &= \frac{1}{R} \int_{R_1}^{R_2} \Psi_1(r) dr = \frac{1}{R} \left[ \frac{\varphi_{nm}^{(1)}(R_2)}{R_2} - \frac{\varphi_{nm}^{(1)}(R_1)}{R_1} - \gamma_5 k_n \varphi_{nm}^{(4)}(R_2) + \gamma_5 k_n \varphi_{nm}^{(4)}(R_1) \right] = \text{const}; \\ \Psi_2(r) \approx \bar{\Psi}_2 &= \frac{1}{R} \left[ \frac{\varphi_{nm}^{(2)}(R_2)}{R_2} - \frac{\varphi_{nm}^{(2)}(R_1)}{R_1} + \gamma_5 k_n (\varphi_{nm}^{(3)}(R_2) - \varphi_{nm}^{(3)}(R_1)) \right] = \text{const}; \end{aligned} \quad (29)$$



$$\Psi_3(r) \approx \bar{\Psi}_3 = \frac{1}{S_0} \int_{R_1}^{R_2} r \Psi_3(r) dr = \frac{1}{S_0} \left[ \varphi_{nm}^{(3)}(R_2) - \varphi_{nm}^{(3)}(R_1) - \frac{\gamma_5}{\gamma_6} k_n (R_2 \varphi_{nm}^{(2)}(R_2) - R_1 \varphi_{nm}^{(2)}(R_1)) \right] = \text{const};$$

$$\Psi_4(r) \approx \bar{\Psi}_4 = \frac{1}{S_0} \left[ \varphi_{nm}^{(4)}(R_2) - \varphi_{nm}^{(4)}(R_1) + \frac{\gamma_5}{\gamma_6} k_n (R_2 \varphi_{nm}^{(1)}(R_2) - R_1 \varphi_{nm}^{(1)}(R_1)) \right] = \text{const};$$

где  $R = R_2 - R_1$ ;  $S_0 = (R_2^2 - R_1^2)/2$ .

После такой замены аналитические решения (24–27) найти не трудно. Не останавливаясь на технических подробностях его получения, приводим конечный результат:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{nm}^{(1)} &= D_{nm}^{(1)} f_1(r', a_1) + D_{nm}^{(2)} f_2(r', a_1) - \frac{(\tilde{\Psi}_1 + a_3/2R)}{a_1} + \frac{a_3}{R} f_3(r', a_1); \quad m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots \\ \varphi_{nm}^{(2)} &= D_{nm}^{(3)} f_1(r', a_1) + D_{nm}^{(4)} f_2(r', a_1) - \tilde{\Psi}_2/a_1; \quad m = 1, 2, \dots; n = 0, 1, 2, \dots \\ \varphi_{nm}^{(3)} &= D_{nm}^{(5)} f_1(r', a_2) + D_{nm}^{(6)} f_2(r', a_2) - \frac{(\tilde{\Psi}_3 + a_4/2R)}{a_2} + \frac{a_4}{R} f_3(r', a_2); \quad m = 0, 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots \\ \varphi_{nm}^{(4)} &= D_{nm}^{(7)} f_1(r', a_1) + D_{nm}^{(8)} f_2(r', a_1) - \tilde{\Psi}_4/a_2; \quad m = 1, 2, \dots; n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

где  $D_{nm}^{(i)}$  – произвольные постоянные;  $r' = r - R_1$ ; функции  $f_j(r', a)$  задаются выражениями:

$$f_1(r', a) = \begin{cases} \exp\{-\sqrt{|a|} |R - r'\}, & \text{для } a < 0 \\ \cos\{\sqrt{a} r'\}, & \text{для } a > 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$f_2(r', a) = \begin{cases} \exp\{-\sqrt{|a|} |r'\}, & \text{для } a < 0 \\ \sin\{\sqrt{a} r'\}, & \text{для } a > 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$f_3(r', a) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[ R \exp\{-\sqrt{|a|} |r'\} \frac{1 + \exp\{-2\sqrt{|a|} |R - r'\}}{\sqrt{|a|} (1 - \exp\{-2\sqrt{|a|} |R\})} - \frac{1}{|a|} \right], & \text{для } a < 0 \\ -\frac{1}{2} \left[ R \frac{\cos\{\sqrt{|a|} |R - r'\}}{\sqrt{|a|} \sin\{\sqrt{|a|} |R\}} - \frac{1}{|a|} \right], & \text{для } a > 0 \end{cases} \quad (33)$$

Естественно может возникнуть вопрос: какую ошибку вносит в расчет упругих колебаний кольца замена (29)? Оценить эту ошибку априори невозможно. Интуитивно можно предположить, что ошибка тем меньше, чем сильнее выполняется неравенство  $R < R_1$ . В большинстве случаев для колец подшипника это неравенство выполняется достаточно хорошо.

Получив решение (30), можем сразу записать выражения для вычисления функций  $\omega_{nm}^{(i)}(r)$ :

$$\left. \begin{aligned} \omega_{nm}^{(1)} &= Q_{nm}^{(1)} f_1(r', a_1) + Q_{nm}^{(2)} f_2(r', a_1) - \frac{(\tilde{\Phi}_1 + a'_3/2R)}{a_1} + \frac{2a'_3}{R} f_3(r', a_1); \quad m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots \\ \omega_{nm}^{(2)} &= Q_{nm}^{(3)} f_1(r', a_1) + Q_{nm}^{(4)} f_2(r', a_1) - \tilde{\Phi}_2/a_1; \quad m = 1, 2, \dots; n = 0, 1, 2, \dots \\ \omega_{nm}^{(3)} &= Q_{nm}^{(5)} f_1(r', a_2) + Q_{nm}^{(6)} f_2(r', a_2) - \frac{(\tilde{\Phi}_3 + a'_4/2R)}{a_2} + \frac{2a'_4}{R} f_3(r', a_2); \quad m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots \\ \omega_{nm}^{(4)} &= Q_{nm}^{(7)} f_1(r', a_1) + Q_{nm}^{(8)} f_2(r', a_1) - \tilde{\Phi}_4/a_2; \quad m = 1, 2, \dots; n = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

где  $Q_{nm}^{(i)}$  – произвольные постоянные; коэффициенты  $\tilde{\Phi}_i$  – введены в решение (34) по той же схеме, что и коэффициенты  $\tilde{\Psi}_i$  в решении (30) и вычисляются они по формулам аналогичным (29), только в них функции  $\varphi_{nm}^{(i)}$  надо заменить на  $\omega_{nm}^{(i)}$ . Обращаем

внимание, что  $a'_3$  и  $a'_4$  в решении (34) отличаются от постоянных  $a_3$  и  $a_4$  решения (30):

$$a'_3 = \gamma_7 B_{nm}^{(r)}, \quad a'_4 = \gamma_7 B_{nm}^{(z)} / \gamma_6.$$

Таким образом, мы закончили построение аналитического решения системы (1–2). Оно полностью определяется выражениями (9), (20–23), (30) и (34). Полученное решение содержит шесть совокупностей произвольных постоянных:  $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ ;

$$\{D_{0m}^{(3)}, D_{0m}^{(4)}, D_{0m}^{(7)}, D_{0m}^{(8)}\}; \{Q_{0m}^{(3)}, Q_{0m}^{(4)}, Q_{0m}^{(7)}, Q_{0m}^{(8)}\}; \{D_{n0}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, 8\}; \{D_{nm}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, 8\}; \{Q_{nm}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, 8\},$$

значения которых мы должны однозначным образом определить из граничных условий (3–6). Техника определения указанной совокупности произвольных постоянных очень сложна и чрезвычайно громоздка. Тем не менее, на ее изложении необходимо остановиться подробнее, ибо это самая важная часть работы по расчету упругих колебаний наружного кольца подшипника.

#### 4. Определение произвольных постоянных из граничных условий (3–4). Решения

(30) и (34) содержат коэффициенты  $\tilde{\Psi}_i$  и  $\tilde{\Phi}_i$ , которые в свою очередь зависят от произвольных постоянных  $D_{nm}^{(i)}$  и  $Q_{nm}^{(i)}$ . Характер этой зависимости определяется выражениями (29). Поэтому, прежде чем начать процедуру определения произвольных постоянных, необходимо получить явную зависимость величин  $\tilde{\Psi}_i$  и  $\tilde{\Phi}_i$  от постоянных  $D_{nm}^{(i)}$  и  $Q_{nm}^{(i)}$ . Мы рассмотрим получение таких зависимостей для коэффициентов  $\tilde{\Psi}_i$ . Зависимости  $\tilde{\Phi}_i$  от  $Q_{nm}^{(i)}$  имеют ту же самую структуру и на их определении мы не будем останавливаться.

При  $r = R_2$  и  $r = R_1$  переменная  $r'$  принимает значения  $r' = R$  и  $r' = 0$ . Используя (31–33), вычисляем при этих значениях  $r'$  такие величины:

$$\left. \begin{aligned} d_1 = f_1(R, a_1); d_2 = f_1(R, a_2); d_3 = f_1(0, a_1); d_4 = f_1(0, a_2); \\ d_5 = f_2(R, a_1); d_6 = f_2(R, a_2); d_7 = f_2(0, a_1); d_8 = f_2(0, a_2); \\ d_9 = f_3(R, a_1); d_{10} = f_3(R, a_2); d_{11} = f_3(0, a_1); d_{12} = f_3(0, a_2). \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Введем для упрощения дальнейших записей такие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} z_1 = D_{0m}^{(3)}; z_2 = D_{0m}^{(4)}; z_3 = D_{0m}^{(7)}; z_4 = D_{0m}^{(8)}; \quad (m = 1, 2, \dots) \\ x_i = D_{nm}^{(i)}; \quad (i = 1, 2, \dots, 8; n = 1, 2, \dots; m = 1, 2, \dots) \\ y_i = D_{n0}^{(i)}; \quad (i = 1, 2, \dots, 8; n = 1, 2, \dots) \\ \xi_1 = Q_{0m}^{(3)}; \xi_2 = Q_{0m}^{(4)}; \xi_3 = Q_{0m}^{(7)}; \xi_4 = Q_{0m}^{(8)}; \quad (m = 1, 2, \dots) \\ \eta_i = Q_{nm}^{(i)}; \quad (i = 1, 2, \dots, 8; n = 1, 2, \dots; m = 1, 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

При этом необходимо помнить, что  $x_i$  и  $\eta_i$  зависят от  $n, m$ ;  $y_i$  от  $n$ ; а  $z_\beta$  и  $\xi_\beta$  – от  $m$ . Из решения (30) получаем такие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{nm}^{(1)}(R_2) = x_1 d_1 + x_2 d_5 + a_5 - \tilde{\Psi}_1 / a_1; \\ \varphi_{nm}^{(2)}(R_2) = x_3 d_1 + x_4 d_5 - \tilde{\Psi}_2 / a_1; \\ \varphi_{nm}^{(3)}(R_2) = x_5 d_2 + x_6 d_6 + a_6 - \tilde{\Psi}_3 / a_2; \\ \varphi_{nm}^{(4)}(R_2) = x_7 d_2 + x_8 d_6 - \tilde{\Psi}_4 / a_2; \\ \varphi_{nm}^{(1)}(R_1) = x_1 d_3 + x_2 d_7 + a_7 - \tilde{\Psi}_1 / a_1; \\ \varphi_{nm}^{(2)}(R_1) = x_3 d_3 + x_4 d_7 - \tilde{\Psi}_2 / a_1; \\ \varphi_{nm}^{(3)}(R_1) = x_5 d_4 + x_6 d_8 + a_8 - \tilde{\Psi}_3 / a_2; \\ \varphi_{nm}^{(4)}(R_1) = x_7 d_4 + x_8 d_8 - \tilde{\Psi}_4 / a_2, \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_5 &= \frac{a_3}{R} [d_9 - 1/2a_1]; & a_6 &= \frac{a_4}{R} [d_{10} - 1/2a_2] \\ a_7 &= \frac{a_3}{R} [d_{11} - 1/2a_1]; & a_8 &= \frac{a_4}{R} [d_{12} - 1/2a_2] \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Подставим зависимости (37) в (29), получим систему алгебраических уравнений для определения коэффициентов  $\tilde{\Psi}_\beta$ . Решая ее, находим искомые зависимости:

$$\tilde{\Psi}_\beta = \alpha_{\beta i} x_i + \alpha_{\beta 0}, \quad (\beta = 1, 2, 3, 4; i = 1, 2, \dots, 8), \quad (39)$$

где коэффициенты  $\alpha_{\beta i}$  и  $\alpha_{\beta 0}$  зависят от геометрических и механических параметров подшипника. Они вычисляются по громоздким формулам. Экономя место, мы их здесь не приводим.

Аналогично, точно таким же методом, получаем вторую группу зависимостей:

$$\tilde{\Phi}_\alpha = \beta_{\alpha j} \eta_j + \beta_{\alpha 0}. \quad (40)$$

Выражения, подобные (39–40), получаем и для  $m = 0$  при  $n = 1, 2, \dots$ , а также для  $n = 0$  при  $m = 1, 2, \dots$ . При этом в первом случае  $x_\beta$  надо заменить на  $y_\beta$ , во-втором – на  $z_\beta$ .

Теперь непосредственно можно приступить к определению произвольных постоянных  $\{C_\beta\}$ ,  $\{x_i\}$ ,  $\{z_\beta\}$ ,  $\{\varphi_i\}$ ,  $\{y_i\}$ ,  $\{\eta_i\}$  и  $\{\xi_\beta\}$ . Для этого необходимо получить явную зависимость компонент тензора напряжений (7) от функций  $\varphi_{nm}^{(i)}$ ,  $\omega_{nm}^{(i)}$  и их производных.

Используя решения (9), (20–23), (30) и (34), вычисляем производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_r}{\partial r} &= C_1 - \frac{C_2}{r^2} + C_4 z + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\varphi_{n0}^{(1)}}{dr} \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\varphi_{n0}^{(2)}}{dr} \cos k_n z + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\varphi_{nm}^{(1)}}{dr} \sin k_n z + \frac{d\varphi_{nm}^{(2)}}{dr} \cos k_n z \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{d\varphi_{0m}^{(2)}}{dr} \cos v_m t + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\omega_{nm}^{(1)}}{dr} \sin k_n z + \frac{d\omega_{nm}^{(2)}}{dr} \cos k_n z \right\} \sin v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{d\omega_{0m}^{(1)}}{dr} \sin v_m t; \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_r}{\partial z} &= C_4 z + \sum_{n=1}^{\infty} k_n \varphi_{n0}^{(1)}(r) \cos k_n z - \sum_{n=1}^{\infty} k_n \varphi_{n0}^{(2)}(r) \sin k_n z + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} k_n (\varphi_{nm}^{(1)}(r) \cos k_n z - \varphi_{nm}^{(2)}(r) \sin k_n z) \right\} \cos v_m t + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} k_n (\omega_{nm}^{(1)}(r) \cos k_n z - \omega_{nm}^{(2)}(r) \sin k_n z) \right\} \sin v_m t; \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_z}{\partial r} &= C_3 r - \frac{\gamma_5}{\gamma_6} r C_4 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\varphi_{n0}^{(3)}}{dr} \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\varphi_{n0}^{(4)}}{dr} \cos k_n z + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\varphi_{nm}^{(3)}}{dr} \sin k_n z + \frac{d\varphi_{nm}^{(4)}}{dr} \cos k_n z \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{d\varphi_{0m}^{(4)}}{dr} \cos v_m t + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\omega_{nm}^{(3)}}{dr} \sin k_n z + \frac{d\omega_{nm}^{(4)}}{dr} \cos k_n z \right\} \sin v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{d\omega_{0m}^{(4)}}{dr} \sin v_m t; \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_z}{\partial z} = & -\omega_z \gamma_7 z + \sum_{n=1}^{\infty} k_n \varphi_{n0}^{(3)}(r) \cos k_n z - \sum_{n=1}^{\infty} k_n \varphi_{n0}^{(4)}(r) \sin k_n z + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} k_n (\varphi_{nm}^{(3)}(r) \cos k_n z - \varphi_{nm}^{(4)}(r) \sin k_n z) \right\} \cos v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} k_n (\omega_{nm}^{(3)}(r) \cos k_n z - \omega_{nm}^{(4)}(r) \sin k_n z) \right\} \sin v_m t. \end{aligned} \quad (44)$$

Учитывая зависимости (9), (20), (22) и (41–44), получим из (7) такие выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} = E\gamma_1 \left[ \sigma_1(r, z) + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(1)}(r) \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(2)}(r) \cos k_n z + \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (\Phi_{nm}^{(1)}(r) \sin k_n z + \Phi_{nm}^{(2)}(r) \cos k_n z) \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_{0m}^{(2)}(r) \cos v_m t + \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (T_{nm}^{(1)}(r) \sin k_n z + T_{nm}^{(1)}(r) \cos k_n z) \right\} \sin v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} T_{0m}^{(2)}(r) \sin v_m t \right]; \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} = E\gamma_1 \left[ \sigma_2(z) + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(3)}(r) \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(4)}(r) \cos k_n z + \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (\Phi_{nm}^{(3)}(r) \sin k_n z + \Phi_{nm}^{(4)}(r) \cos k_n z) \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_{0m}^{(4)}(r) \cos v_m t + \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (T_{nm}^{(3)}(r) \sin k_n z + T_{nm}^{(4)}(r) \cos k_n z) \right\} \sin v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} T_{0m}^{(4)}(r) \sin v_m t \right]; \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zr} = \sigma_{rz} = E\gamma_4 \left[ \sigma_3(z) + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(5)}(r) \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(6)}(r) \cos k_n z + \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (\Phi_{nm}^{(5)}(r) \sin k_n z + \Phi_{nm}^{(6)}(r) \cos k_n z) \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_{0m}^{(6)}(r) \cos v_m t + \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (T_{nm}^{(5)}(r) \sin k_n z + T_{nm}^{(6)}(r) \cos k_n z) \right\} \sin v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} T_{0m}^{(6)}(r) \sin v_m t \right], \end{aligned} \quad (47)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1(r, z) &= (\gamma_2 + \gamma_3)(C_1 + C_4 z) + \frac{(\gamma_3 - \gamma_2)}{r^2} C_2 \\ \Phi_{nm}^{(1)}(r) &= \gamma_2 \frac{d\varphi_{nm}^{(1)}}{dr} + \frac{\gamma_3}{r} \varphi_{nm}^{(2)}(r) - \gamma_3 k_n \varphi_{nm}^{(4)}; \\ \Phi_{nm}^{(2)}(r) &= \gamma_2 \frac{d\varphi_{nm}^{(2)}}{dr} + \frac{\gamma_3}{r} \varphi_{nm}^{(2)}(r) - \gamma_3 k_n \varphi_{nm}^{(3)}; \\ \Phi_{0m}^{(2)}(r) &= \gamma_2 \frac{d\varphi_{0m}^{(2)}}{dr} + \frac{\gamma_3}{r} \varphi_{0m}^{(2)}(r), \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_2(z) &= 2\gamma_3(C_1 + C_4 z) - \gamma_2 \gamma_7 w_z z \\ \Phi_{nm}^{(3)}(r) &= \gamma_3 \left( \frac{d\varphi_{nm}^{(1)}}{dr} + \frac{1}{r} \varphi_{nm}^{(1)}(r) \right) - \gamma_2 k_n \varphi_{nm}^{(4)}(r); \\ \Phi_{nm}^{(4)}(r) &= \gamma_3 \left( \frac{d\varphi_{nm}^{(2)}}{dr} + \frac{1}{r} \varphi_{nm}^{(2)}(r) \right) + \gamma_2 k_n \varphi_{nm}^{(3)}(r); \\ \Phi_{0m}^{(4)}(r) &= \gamma_3 \left( \frac{d\varphi_{0m}^{(2)}}{dr} + \frac{1}{r} \varphi_{0m}^{(2)}(r) \right), \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_3(r) &= (1 - \frac{\gamma_5}{\gamma_6})C_4 r + \frac{C_3}{r} \\ \Phi_{nm}^{(5)}(r) &= \frac{d\varphi_{nm}^{(3)}}{dr} - k_n \varphi_{nm}^{(2)}(r); \\ \Phi_{nm}^{(6)}(r) &= \frac{d\varphi_{nm}^{(4)}}{dr} + k_n \varphi_{nm}^{(2)}(r); \\ \Phi_{0m}^{(6)}(r) &= \frac{d\varphi_{0m}^{(4)}}{dr}. \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

Выражения для вычисления компонент  $T_{nm}^{(j)}(r)$  получаются из (48–50) путем замены  $\varphi_{nm}^{(\alpha)}$  на  $\omega_{nm}^{(\alpha)}$ .

Подставим зависимости (45) и (47) в граничные условия (3–4). Приравнявая нулю слагаемые, стоящие при  $\cos v_{mt}$  и  $\sin v_{mt}$ , получим уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1(R_1, z) + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(1)}(R_1) \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(2)}(R_1) \cos k_n z &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} [\Phi_{nm}^{(1)}(R_1) \sin k_n z + \Phi_{nm}^{(2)}(R_1) \cos k_n z] + \Phi_{0m}^{(2)}(R_1) &= 0; \\ \sigma_3(R_1) + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(5)}(R_1) \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(6)}(R_1) \cos k_n z &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} [\Phi_{nm}^{(5)}(R_1) \sin k_n z + \Phi_{nm}^{(6)}(R_1) \cos k_n z] + \Phi_{0m}^{(6)}(R_1) &= 0; \\ \sigma_1(R_2, z) + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(1)}(R_2) \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(2)}(R_2) \cos k_n z &= \frac{Q_r}{E\gamma_1}; \\ \sum_{n=1}^{\infty} [\Phi_{nm}^{(1)}(R_2) \sin k_n z + \Phi_{nm}^{(2)}(R_2) \cos k_n z] + \Phi_{0m}^{(2)}(R_2) &= 0; \\ \sigma_3(R_2) + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(5)}(R_2) \sin k_n z + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n0}^{(6)}(R_2) \cos k_n z &= \frac{Q_z}{E\gamma_4}; \\ \sum_{n=1}^{\infty} [\Phi_{nm}^{(5)}(R_2) \sin k_n z + \Phi_{nm}^{(6)}(R_2) \cos k_n z] + \Phi_{0m}^{(6)}(R_2) &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} [T_{nm}^{(1)}(R_1) \sin k_n z + T_{nm}^{(2)}(R_1) \cos k_n z] + T_{0m}^{(2)}(R_1) &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} [T_{nm}^{(5)}(R_1) \sin k_n z + T_{nm}^{(6)}(R_1) \cos k_n z] + T_{0m}^{(6)}(R_1) &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} [T_{nm}^{(1)}(R_2) \sin k_n z + T_{nm}^{(2)}(R_2) \cos k_n z] + T_{0m}^{(2)}(R_2) &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} [T_{nm}^{(5)}(R_2) \sin k_n z + T_{nm}^{(6)}(R_2) \cos k_n z] + T_{0m}^{(6)}(R_2) &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

Разложим функции  $\sigma_1(R_1, z)$ ,  $\sigma_3(R_1)$ ,  $\sigma_1(R_2, z)$  и  $\sigma_3(R_2)$  в тригонометрический ряд по  $\sin k_n z$  в области  $0 < z < h$ :

$$\begin{aligned} \sigma_1(R_1, z) &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu_1^{(n)} \sin k_n z; \quad \mu_1^{(n)} = \frac{2}{h} \int_0^h \sigma_1(R_1, z) \sin k_n z dz; \\ \sigma_3(R_1) &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu_2^{(n)} \sin k_n z; \quad \mu_2^{(n)} = \sigma_3(R_1) \mu_n; \\ \sigma_1(R_2, z) &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu_3^{(n)} \sin k_n z; \quad \mu_3^{(n)} = \frac{2}{h} \int_0^h \sigma_1(R_2, z) \sin k_n z dz; \\ \sigma_3(R_2) &= \sum_{n=1}^{\infty} \mu_4^{(n)} \sin k_n z; \quad \mu_4^{(n)} = \sigma_3(R_2) \mu_n, \end{aligned} \tag{53}$$

где 
$$\mu_n = \frac{2}{h} \int_0^h \sin k_n z dz = \frac{2[1 - (-1)^n]}{n\pi}.$$

Подставим эти разложения в (51). Тогда, приравнявая к нулю слагаемые при  $\sin k_n z$  и  $\cos k_n z$ , получим три системы, каждая из которых состоит из восьми уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{n0}^{(1)}(R_1) + \mu_1^{(n)} = 0; \Phi_{n0}^{(2)}(R_1) = 0; \Phi_{n0}^{(5)}(R_1) + \mu_2^{(n)} = 0; \Phi_{n0}^{(6)}(R_1) = 0; \\ \Phi_{n0}^{(1)}(R_2) + \mu_3^{(n)} = \frac{Q_r \mu_n}{E\gamma_1}; \Phi_{n0}^{(2)}(R_2) = 0; \Phi_{n0}^{(5)}(R_2) + \mu_4^{(n)} = \frac{Q_z \mu_n}{E\gamma_4}; \Phi_{n0}^{(6)}(R_2) = 0; \end{aligned} \right\} \tag{54}$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{nm}^{(1)}(R_1) + \Phi_{0m}^{(2)}(R_1) \mu_n = 0; \Phi_{nm}^{(2)}(R_1) = 0; \Phi_{nm}^{(5)}(R_1) + \Phi_{0m}^{(6)}(R_1) \mu_n = 0; \Phi_{nm}^{(6)}(R_1) = 0; \\ \Phi_{nm}^{(1)}(R_2) + \Phi_{0m}^{(2)}(R_2) \mu_n = 0; \Phi_{nm}^{(2)}(R_2) = 0; \Phi_{nm}^{(5)}(R_2) + \Phi_{0m}^{(6)}(R_2) \mu_n = 0; \Phi_{nm}^{(6)}(R_2) = 0; \end{aligned} \right\} \tag{55}$$

$$\left. \begin{aligned} T_{nm}^{(1)}(R_1) + T_{0m}^{(2)}(R_1) \mu_n = 0; T_{nm}^{(2)}(R_1) = 0; T_{nm}^{(5)}(R_1) + T_{0m}^{(6)}(R_1) \mu_n = 0; T_{nm}^{(6)}(R_1) = 0; \\ T_{nm}^{(1)}(R_2) + T_{0m}^{(2)}(R_2) \mu_n = 0; T_{nm}^{(2)}(R_2) = 0; T_{nm}^{(5)}(R_2) + T_{0m}^{(6)}(R_2) \mu_n = 0; T_{nm}^{(6)}(R_2) = 0. \end{aligned} \right\} \tag{56}$$

Из системы (54) находим зависимость  $D_{n0}^{(i)}$  от постоянных  $C_1-C_4$ :

$$D_{n0}^{(i)} = \alpha_{i\beta}^{(n)} C_\beta + \alpha_{i0}^{(n)}, \quad (i = 1, 2, \dots, 8; \beta = 1, 2, 3, 4; n = 1, 2, \dots). \tag{57}$$

Решая систему (55), находим зависимость  $D_{nm}^{(i)}$  от постоянных  $z_\beta$ :

$$D_{nm}^{(i)} = \alpha_{i\beta}^{(nm)} z_\beta + \alpha_i^{(nm)}, \quad (i = 1, 2, \dots, 8; \beta = 1, 2, 3, 4; n, m = 1, 2, \dots). \tag{58}$$

Из системы (56) получаем:

$$T_{nm}^{(i)} = \beta_{i\alpha}^{(nm)} \xi_\alpha + \beta_i^{(nm)}, \quad (i = 1, 2, \dots, 8; \alpha = 1, 2, 3, 4; n, m = 1, 2, \dots). \tag{59}$$

Чтобы получить явный вид коэффициентов  $\alpha_{i\beta}^{(n)}, \alpha_{i0}^{(n)}, \alpha_{i\beta}^{(nm)}, \alpha_i^{(nm)}, \beta_{i\alpha}^{(nm)}, \beta_i^{(nm)}$ , необходимо проделать очень громоздкие вычисления по такой схеме. Сначала, подставляя в (48–50) значения  $\Phi_{nm}^{(\beta)}$  из (37), получим, с учетом выражений (39), явную зависимость функций  $\Phi_{nm}^{(i)}(r)$  от постоянных  $D_{nm}^{(i)}$ . Аналогично получаем зависимости функций  $T_{nm}^{(i)}(r)$  от постоянных  $Q_{nm}^{(i)}$ . Затем полученные выражения подставляем в системы (54–56). После приведения подобных получаем три линейные системы алгебраических уравнений восьмого порядка с неизвестными  $D_{n0}^{(i)}, D_{nm}^{(i)}$  и  $T_{nm}^{(i)}$ . Решая каждую из этих систем отдельно, получаем зависимости (57–59). Для определения оставшихся 12 постоянных:  $C_\beta, z_\beta,$  и  $\xi_\beta, \beta = 1, 2, 3, 4,$  необходимо использовать граничные условия (5–6).

**5. Определение произвольных постоянных из граничных условий (5–6).** Нетрудно убедиться, что граничные условия (5–6) не могут быть выполнены локально для любого значения  $z$ . Это связано с тем, что мы получили решение уравнений (1–2), в котором влияние кривизны кольца учитывалось не локально, а только в среднем. Соответственно, чтобы получить адекватную этому упрощению систему граничных условий, необходимо (5–6)

усреднить по сечению кольца. Таким образом, вместо уравнений (5–6) мы должны использовать уравнения:

$$\frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \sigma_{zz}(0, r, t) r dz = -T_1; \quad \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \sigma_{zz}(h, r, t) r dr = T_2; \quad (5')$$

$$\int_{R_1}^{R_2} r \sigma_{rz}(0, r, t) dz = 0; \quad \int_{R_1}^{R_2} r \sigma_{rz}(h, r, t) dz = 0. \quad (6')$$

Подставим в (5'–6') значения  $\sigma_{zz}$  и  $\sigma_{rz}$  из (46–47), получим уравнения:

$$\begin{aligned} & \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2} \sigma_2(0) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{n0}^{(4)}(r) r dr \right\} + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{nm}^{(4)}(r) r dr \right\} \cos v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{0m}^{(4)}(r) r dr \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \int_{R_1}^{R_2} T_{nm}^{(4)}(r) r dr \right\} \sin v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} T_{0m}^{(4)}(r) r dr \right\} \sin v_m t = -T_1 \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2E\gamma_1}; \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2} \sigma_2(h) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{n0}^{(4)}(r) r dr \right\} + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{nm}^{(4)}(r) r dr \right\} \cos v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{0m}^{(4)}(r) r dr \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{R_1}^{R_2} T_{nm}^{(4)}(r) r dr \right\} \sin v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} T_{0m}^{(4)}(r) r dr \right\} \sin v_m t = T_2 \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2E\gamma_1}; \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} & \int_{R_1}^{R_2} \sigma_3(r) r dr + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{n0}^{(6)}(r) r dr \right\} + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{nm}^{(6)}(r) r dr \right\} \cos v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{0m}^{(6)}(r) r dr \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \int_{R_1}^{R_2} T_{nm}^{(6)}(r) r dr \right\} \sin v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} T_{0m}^{(6)}(r) r dr \right\} \sin v_m t = 0; \end{aligned} \quad (62)$$

$$\begin{aligned} & \int_{R_1}^{R_2} \sigma_3(r) r dr + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{n0}^{(6)}(r) r dr \right\} + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{nm}^{(6)}(r) r dr \right\} \cos v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{0m}^{(6)}(r) r dr \right\} \cos v_m t + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{R_1}^{R_2} T_{nm}^{(6)}(r) r dr \right\} \sin v_m t + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} T_{0m}^{(6)}(r) r dr \right\} \sin v_m t = 0; \end{aligned} \quad (63)$$

Приравнявая к нулю слагаемые при  $\cos v_m t$  и  $\sin v_m t$ , из (61–63), получаем три системы, каждая из которых содержит четыре уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2} \sigma_2(0) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{n0}^{(4)}(r) r dr \right\} &= -T_1 \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2E\gamma_1}; \\ \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2} \sigma_2(h) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{n0}^{(4)}(r) r dr \right\} &= T_2 \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2E\gamma_1}; \\ \int_{R_1}^{R_2} \sigma_3(r) r dr + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{n0}^{(6)}(r) r dr \right\} &= 0; \\ \int_{R_1}^{R_2} \sigma_3(r) r dr + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{n0}^{(6)}(r) r dr \right\} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{nm}^{(4)}(r) r dr \right\} + \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{0m}^{(4)}(r) r dr &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{nm}^{(4)}(r) r dr \right\} + \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{0m}^{(4)}(r) r dr &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{nm}^{(6)}(r) r dr \right\} + \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{0m}^{(6)}(r) r dr &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{nm}^{(6)}(r) r dr \right\} + \int_{R_1}^{R_2} \Phi_{0m}^{(6)}(r) r dr &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} T_{nm}^{(4)}(r) r dr \right\} + \int_{R_1}^{R_2} T_{0m}^{(4)}(r) r dr &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ \int_{R_1}^{R_2} T_{nm}^{(4)}(r) r dr \right\} + \int_{R_1}^{R_2} T_{0m}^{(4)}(r) r dr &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} T_{nm}^{(6)}(r) r dr \right\} + \int_{R_1}^{R_2} T_{0m}^{(6)}(r) r dr &= 0; \\ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left\{ \int_{R_1}^{R_2} T_{nm}^{(6)}(r) r dr \right\} + \int_{R_1}^{R_2} T_{0m}^{(6)}(r) r dr &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

Если в системах (64–66) выразить по схеме, указанной выше, функции  $\Phi_{nm}^{(\alpha)}(r)$  и  $T_{nm}^{(\alpha)}(r)$  через постоянные  $D_{nm}^{(i)}$  и  $Q_{nm}^{(i)}$ , а затем использовать зависимости (57–59), то после проведения интегрирования и приведения подобных, мы получим три системы линейных алгебраических уравнений для определения трех групп постоянных  $\{C_\beta\}$ ,  $\{z_\beta\}$ , и  $\{\eta_\beta\}$  ( $\beta = 1, 2, 3, 4$ ). Из системы (64) определим  $\{C_\beta\}$ , из (65) –  $\{z_\beta\}$  и наконец, из (66) –  $\{\eta_\beta\}$ .

**6. Схема вычисления компенсирующей объемной силы  $w_z$ .** Ранее было отмечено [1], что для обеспечения динамического равновесия кольца в направлении оси  $z$  необходимо в правую часть уравнения (2) ввести константу  $w_z$ , которая в среднем должна уравновешивать статическую нагрузку от всех элементов подшипника. Ниже приводится алгоритм ее вычисления.

Учитывая граничные условия (3–6), запишем уравнение равновесия (10) в виде:



$$2\pi R_2 h Q_z + \pi(R_2^2 - R_1^2)(T_1 + T_2) + \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \left\{ \sum_{i=1}^N f_z^i(t) \right\} dt + w_z \pi(R_2^2 - R_1^2)h = 0,$$

из которого получаем, учитывая, что:

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f_z^{(i)}(t) dt = \sum_{i=1}^N \tilde{f}_z^{(i)},$$

простую формулу для вычисления  $w_z$ :

$$w_z = - \left[ \frac{2R_2}{R_2^2 - R_1^2} Q_z + \frac{(T_2 + T_1)}{h} \right] - \frac{\sum_{i=1}^N \tilde{f}_z^{(i)}}{\pi h (R_2^2 - R_1^2)} \quad (67)$$

**Заключение.** В виду большой громоздкости формул для вычисления коэффициентов линейных систем алгебраических уравнений, а также всех коэффициентов, входящих в зависимости (39–40) и (57– 59), конкретные выражения для их вычисления здесь не приведены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин А.А., Цимбалов Г.М. Метод автоматизированной вибродиагностики механических систем на основе исследований упругих колебаний внешнего кольца подшипника // Вестник СГТУ. 2010. № 1(44) С. 59-67.

**Никитин Анатолий Александрович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры "Биомедицинская физика" Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

**Nikitin Anatoliy Aleksandrovich** – Candidate of Sciences in Physics & Mathematics, Assistant Professor of the Department "Biomedical Physics", Saratov State University on name of N. G. Chernyshevskiy.

**Цимбалов Геннадий Михайлович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник СФ ИРЭ РАН

**Tsimbalov Gennadiy Mikhaylovich** - Candidate of Sciences in Physics & Mathematics, Senior Scientific Researcher of SF IRE of Russian Academy of Sciences

*Статья поступила в редакцию 01.02.2011 , принята к опубликованию 20.06.2011*

**В.Ф. Кириченко, П.А. Самаркин**

**КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИОННЫХ УРАВНЕНИЙ  
В НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК  
С НАЧАЛЬНЫМИ НЕПРАВИЛЬНОСТЯМИ**

*В статье с помощью метода компактности и новой методологии получения априорных оценок доказана разрешимость первой краевой задачи для уравнений движения в неклассической теории пологих оболочек.*

Неклассическая теория пологих оболочек, уравнения математической физики, обобщенные решения нелинейных краевых задач

**V.F. Kirichenko, P.A. Samarkin**

**QUALITATIVE ANALYSIS OF THE EVOLUTION EQUATIONS  
IN NONCLASSICAL THEORY OF SHALLOW SHELLS  
WITH INITIAL IRREGULARITIES**

*This article uses compactness method and new methodology of giving an a priori estimate to prove solvability of the first boundary-value problem for the equations of motion in nonclassical theory of shallow shells.*

Nonclassical theory of shallow shells, equations of mathematical physics, generalized solutions of nonlinear boundary-value problems

В монографии [1, стр. 349–350] сформулированы нерешенные проблемы математической теории оболочек, в частности, седьмая проблема связана с построением математической теории для вариантов оболочек, наряду с геометрической нелинейностью учитывающих сдвиговые напряжения. Именно для уравнений движения такого варианта пологих оболочек в данной статье доказано существования обобщенного решения.

Объектом исследования является следующая краевая задача для эволюционных уравнений «в смешанной форме», определяющих условия движения полой изотропной и однородной оболочки в рамках обобщенных гипотез Тимошенко (модель Пелеха — Шереметьева) с учётом начальных неправильностей:

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left( \rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ Au_{i1} - B \frac{\partial u_{30}}{\partial x_i} \right] + \varepsilon_i A \frac{\partial}{\partial t} \left[ Au_{i1} - B \frac{\partial u_{30}}{\partial x_i} \right] - A \frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial x_i} - A \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_{3-i}} + C \sigma_{i3} \right) dx_3 = 0, \quad (1)$$

$i = \overline{1,2};$

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left( \rho \frac{\partial^2 u_{30}}{\partial t^2} + \varepsilon_3 \frac{\partial u_{30}}{\partial t} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \rho B \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ Au_{i1} - B \frac{\partial u_{30}}{\partial x_i} \right] \right) + \varepsilon_i B \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left[ Au_{i1} - B \frac{\partial u_{30}}{\partial x_i} \right] \right) - B \frac{\partial^2 \sigma_{ii}}{\partial x_i^2} - B \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x_{3-i} \partial x_i} - C \frac{\partial \sigma_{i3}}{\partial x_i} \right\} dx_3 - \right. \quad (2)$$

$$\left. - \kappa_1 \frac{\partial^2 F}{\partial x_2^2} - \kappa_2 \frac{\partial^2 F}{\partial x_1^2} - L(u_{30}, F) - L(w_0, F) = g(x_1, x_2, t); \right.$$

$$\frac{1}{Eh} \Delta^2 F = -\kappa_1 \frac{\partial^2 u_{30}}{\partial x_2^2} - \kappa_2 \frac{\partial^2 u_{30}}{\partial x_1^2} - \frac{1}{2} L(u_{30}, u_{30}) - L(u_{30}, w_0); \quad (3)$$

$$u_{30}|_{\Gamma} = 0, \frac{\partial u_{30}}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0, \frac{\partial F}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0, u_{i1}|_{\Gamma} = 0, \quad i = \overline{1,2}; \quad (4)$$

$$u_{30}(x_1, x_2, t_0) = \varphi_{30}(x_1, x_2), \quad \frac{\partial u_{30}(x_1, x_2, t_0)}{\partial t} = \psi_{30}(x_1, x_2), \quad (5)$$

$$u_{i1}(x_1, x_2, t_0) = \varphi_{i1}(x_1, x_2), \quad \frac{\partial u_{i1}(x_1, x_2, t_0)}{\partial t} = \psi_{i1}(x_1, x_2), \quad i = \overline{1,2}. \quad (6)$$

В задаче (1) — (6) и всюду далее приняты следующие условные обозначения:

$$\Delta^2(\cdot) = \Delta(\Delta(\cdot)), \quad \Delta(\cdot) = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial x_2^2};$$

$$A = \left( x_3 - \frac{4x_3^3}{3h^2} \right), \quad B = \frac{4x_3^3}{3h^2}, \quad C = 1 - \frac{4x_3^2}{h^2};$$

$$\sigma_{ii} = \frac{1}{h} \frac{\partial^2 F}{\partial x_{3-i}^2} + \frac{E}{1-\nu^2} \left( A \left[ \frac{\partial u_{i1}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial u_{3-i1}}{\partial x_{3-i}} \right] - B \left[ \frac{\partial^2 u_{30}}{\partial x_i^2} + \nu \frac{\partial^2 u_{30}}{\partial x_{3-i}^2} \right] \right),$$

$$\sigma_{12} = -\frac{1}{h} \frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{E}{2(1+\nu)} \left( A \left[ \frac{\partial u_{11}}{\partial x_2} + \frac{\partial u_{21}}{\partial x_1} \right] - B \left[ 2 \frac{\partial^2 u_{30}}{\partial x_1 \partial x_2} \right] \right),$$

$$\sigma_{i3} = \frac{E}{2(1+\nu)} C \left[ u_{i1} + \frac{\partial u_{30}}{\partial x_i} \right], \quad i = \overline{1,2};$$

$$\Gamma = \partial\Omega \times [t_0, t_1], \quad \overline{\Omega} = \Omega \cup \partial\Omega, \quad \Omega \subset R^2, \quad Q = \Omega \times (t_0, t_1),$$

$$D = \Omega \times \left( -\frac{h}{2}, \frac{h}{2} \right), \quad D \in R^3; \quad (x_1, x_2) \in \overline{\Omega}, \quad x_3 \in \left[ -\frac{h}{2}, \frac{h}{2} \right], \quad h > 0;$$

Здесь  $\Omega$  — измеримая по Лебегу односвязная область в евклидовом пространстве  $R^2$  с границей  $\partial\Omega$ ;  $\overline{D} = \overline{\Omega} \times \left[ -\frac{h}{2}, \frac{h}{2} \right]$  — область в пространстве  $R^3$ , занимаемая оболочкой в недеформированном состоянии;  $n$  — внешняя единичная нормаль к плоской кривой  $\partial\Omega$ ;  $h$  — постоянная толщина оболочки;  $\rho$  — постоянная плотность материала оболочки;  $[t_0, t_1]$  — отрезок времени наблюдения за эволюцией оболочки; функция  $w_0(x_1, x_2)$  определяет начальную неправильность оболочки; функция  $u_{30}(x_1, x_2, t)$  определяет дополнительный прогиб оболочки в момент времени  $t \in [t_0, t_1]$ , а функция

$[u_{30}(x_1, x_2, t) + w_0(x_1, x_2)]$  — полный прогиб;  $\kappa_i$  ( $i = \overline{1,2}$ ) — постоянные начальные кривизны оболочки;  $F(x_1, x_2, t)$  — искомая функция усилий;  $u_{30}(x_1, x_2, t)$ ,  $u_{i1}(x_1, x_2, t)$  ( $i = \overline{1,2}$ ) — искомые функции, определяющие коэффициенты в аппроксимации вектора перемещений точек оболочки;  $g(x_1, x_2, t)$  — интенсивность поперечной нагрузки;  $\varphi_{i1}(x_1, x_2)$ ,  $\varphi_{30}(x_1, x_2)$ ,  $\psi_{i1}(x_1, x_2)$ ,  $\psi_{30}(x_1, x_2)$  — известные функции, определяющие начальные условия (5), (6),  $i = \overline{1,2}$ ;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  — постоянные коэффициенты демпфирования;  $E$ ,  $\nu$  — упругие постоянные,  $E > 0$ ,  $0 < \nu < 1/2$ .

Следует отметить, что краевая задача (1) — (6) получена по методике из работы [2].

Далее будем использовать обозначения, в том числе функциональных пространств, норм и скалярного произведения, из [3].

**Теорема.** Пусть кривая  $\partial\Omega$  имеет гладкость, достаточную для используемых теорем вложения, и выполняются такие условия:

$$\begin{aligned} g \in L^2(Q), \quad \varphi_{30} \in H_0^2(\Omega), \quad \psi_{30} \in H_0^1(\Omega), \\ \varphi_{i1} \in H_0^1(\Omega), \quad \psi_{i1} \in L^2(\Omega), \quad i = \overline{1,2}; w_0 \in \overline{C}^2(\overline{\Omega}). \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда:

- существует хотя бы одно решение  $\{\tilde{u}_{i1}, \tilde{u}_{30}, \tilde{F}\}$  задачи (1) — (6), при этом

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{30}, \tilde{F} \in L^\infty(t_0, t_1; H_0^2(\Omega)); \quad \tilde{u}_{i1}, \frac{\partial \tilde{u}_{30}}{\partial t} \in L^\infty(t_0, t_1; H_0^1(\Omega)), \\ \frac{\partial \tilde{u}_{i1}}{\partial t} \in L^\infty(t_0, t_1; L^2(\Omega)); \end{aligned} \quad (8)$$

- приближенное решение задачи (1) — (6) может быть найдено методом Бубнова – Галеркина, при этом функция  $F$  определяется как решение уравнения (3) с граничными условиями из (4), а всё множество получаемых решений слабо компактно в пространствах, соответствующих (8), и его предельные точки определяют решение задачи (1) — (6).

Отметим основные этапы доказательства.

$1^0$  Построение приближенного решения. Решение задачи (1) — (6) ищем с помощью метода Бубнова – Галеркина и с этой целью полагаем:

$$u_{30}^n = \sum_{\kappa_3=1}^{n_3} g_{3\kappa_3}(t) \chi_{3\kappa_3}(x_1, x_2), \quad u_{i1}^n = \sum_{\kappa_i=1}^{n_i} g_{i\kappa_i}(t) \chi_{i\kappa_i}(x_1, x_2), \quad i = \overline{1,2}, \quad (9)$$

где  $\{\chi_{3\kappa_3}\}$  — базис в  $H_0^2(\Omega)$ ,

$\{\chi_{ii}\}$  — базисные системы в  $H_0^1(\Omega)$ , при этом функция  $F^n$  определяется как решение следующей граничной задачи для уравнения эллиптического типа:

$$\frac{1}{Eh} \Delta^2 F = -\kappa_1 \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_2^2} - \kappa_2 \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_1^2} - \frac{1}{2} L(u_{30}^n, u_{30}^n) - L(u_{30}^n, w_0), \quad F|_\Gamma = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial n} = 0, \quad (10)$$

$g_{3\kappa_3}(t)$ ,  $g_{i\kappa_i}(t)$ , из аппроксимаций (9), определяются из следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left( \left\{ \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ Au_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] + \varepsilon_i \frac{\partial}{\partial t} \left[ Au_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] \right\}, A \chi_{i\kappa_i} \right)_D + \left( \sigma_{ii}^n, A \frac{\partial \chi_{i\kappa_i}}{\partial x_i} \right)_D + \left( \sigma_{12}^n, A \frac{\partial \chi_{i\kappa_i}}{\partial x_{3-i}} \right)_D + \left( \sigma_{i3}^n, C \chi_{i\kappa_i} \right)_D = 0, \quad i = \overline{1,2}, \quad \kappa_i = \overline{1, n_i}; \quad (11)$$

$$\left( \left\{ \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial t^2} + \varepsilon_3 \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right\}, \chi_{3\kappa_3} \right)_D + \sum_{i=1}^2 \left[ \left( \left\{ \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ Au_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] + \varepsilon_i \frac{\partial}{\partial t} \left[ Au_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] \right\}, (-B) \frac{\partial \chi_{3\kappa_3}}{\partial x_i} \right)_D + \left( \sigma_{ii}^n, (-B) \frac{\partial^2 \chi_{3\kappa_3}}{\partial x_i^2} \right)_D + \left( \sigma_{12}^n, (-B) \frac{\partial^2 \chi_{3\kappa_3}}{\partial x_{3-i} \partial x_i} \right)_D + \left( \sigma_{i3}^n, C \frac{\partial \chi_{3\kappa_3}}{\partial x_i} \right)_D \right] - \left( \kappa_1 \left( \frac{\partial^2 F^n}{\partial x_2^2}, \chi_{3\kappa_3} \right)_\Omega - \kappa_2 \left( \frac{\partial^2 F^n}{\partial x_1^2}, \chi_{3\kappa_3} \right)_\Omega - (L(u_{30}^n, F^n), \chi_{3\kappa_3})_\Omega - (L(w_0, F^n), \chi_{3\kappa_3})_\Omega \right) = (g_1, \chi_{3\kappa_3})_\Omega, \quad \kappa_3 = \overline{1, n_3}, \quad (12)$$

с начальными условиями следующего вида:

$$\begin{aligned} u_{30}^n(t_0) &= \varphi_{30}^n, & \varphi_{30}^n &= \sum_{\kappa_3=1}^{n_3} a_{3\kappa_3} \chi_{3\kappa_3}, & \varphi_{30}^n &\rightarrow \varphi_{30} & \text{в } H_0^2(\Omega), \\ \frac{\partial u_{30}^n(t_0)}{\partial t} &= \psi_{30}^n, & \psi_{30}^n &= \sum_{\kappa_3=1}^{n_3} b_{3\kappa_3} \chi_{3\kappa_3}, & \psi_{30}^n &\rightarrow \psi_{30} & \text{в } H_0^1(\Omega), \\ u_{i1}^n(t_0) &= \varphi_{i1}^n, & \varphi_{i1}^n &= \sum_{\kappa_i=1}^{n_i} a_{i\kappa_i} \chi_{i\kappa_i}, & \varphi_{i1}^n &\rightarrow \varphi_{i1} & \text{в } H_0^1(\Omega), \\ \frac{\partial u_{i1}^n(t_0)}{\partial t} &= \psi_{i1}^n, & \psi_{i1}^n &= \sum_{\kappa_i=1}^{n_i} b_{i\kappa_i} \chi_{i\kappa_i}, & \psi_{i1}^n &\rightarrow \psi_{i1} & \text{в } L^2(\Omega), \end{aligned} \quad (13)$$

$$i = \overline{1,2},$$

где  $u_{30}^n(t_0) = u_{30}^n(x_1, x_2, t_0)$ ,  $u_{i1}^n(t_0) = u_{i1}^n(x_1, x_2, t_0)$ ,  $\sigma_{ii}^n$ ,  $\sigma_{12}^n$ ,  $\sigma_{i3}^n$  получаются из  $\sigma_{ii}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{i3}$  заменой функций  $u_{ii}$ ,  $u_{30}$ ,  $F$  на  $u_{i1}^n$ ,  $u_{30}^n$ ,  $F^n$  соответственно; символ « $\rightarrow$ » в (13) обозначает сильную сходимость.

Разрешимость задачи Коши (12), (13) на некотором интервале  $(t_0, t_n)$  следует из принципа неподвижной точки Ю. Шаудера и доказывается подобно работе [4].

2<sup>0</sup> *Получение априорных оценок.* Умножим уравнения из системы (12) на  $\frac{\partial g_{i\kappa_i}}{\partial t}$ ,  $i = \overline{1,2}$ ,  $\frac{\partial g_{3\kappa_3}}{\partial t}$ , соответственно, а результат просуммируем — в итоге получим следующее «энергетическое» равенство:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho \left| \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right|_{\text{D}}^2 + \frac{E}{2(1+\nu)} \left| A \left( \frac{\partial u_{11}^n}{\partial x_2} + \frac{\partial u_{21}^n}{\partial x_1} \right) - B \left( 2 \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_1 \partial x_2} \right) \right|_{\text{D}}^2 + \right. \\
 & + \frac{2\nu E}{1-\nu^2} \left( \left[ A \frac{\partial u_{11}^n}{\partial x_1} - B \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_1^2} \right], \left[ A \frac{\partial u_{21}^n}{\partial x_2} - B \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_2^2} \right] \right)_{\text{D}} + \frac{1}{Eh} |\Delta F^n|_{\Omega}^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^2 \left( \rho \left| \frac{\partial}{\partial t} \left[ A u_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] \right|_{\text{D}}^2 + \frac{E}{1-\nu^2} \left| A \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial x_i} - B \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_i^2} \right|_{\text{D}}^2 + \right. \\
 & + \left. \frac{E}{2(1+\nu)} \left| C \left( u_{i1}^n + \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right) \right|_{\text{D}}^2 \right) \left. \right\} + \varepsilon_3 \left| \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right|_{\text{D}}^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^2 \varepsilon_i \left| \frac{\partial}{\partial t} \left[ A u_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] \right|_{\text{D}}^2 = \left( g, \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right)_{\Omega}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

При получении равенства (14) используются, согласно граничной задаче для определения функции  $F^n$  и свойствам функции  $L(a, b)$  [3, стр. 59–60], следующие равенства:

$$\begin{aligned}
 & - \left( \left[ L(u_{30}^n, F^n) + L(w_0, F^n) \right], \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right)_{\Omega} - \left( \left[ \kappa_1 \frac{\partial^2 F^n}{\partial x_2^2} + \kappa_2 \frac{\partial^2 F^n}{\partial x_1^2} \right], \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right)_{\Omega} = \\
 & = - \left( \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{1}{2} L(u_{30}^n, u_{30}^n) + L(u_{30}^n, w_0) \right], F^n \right)_{\Omega} - \left( \left[ \kappa_1 \frac{\partial^2 F^n}{\partial x_2^2} + \kappa_2 \frac{\partial^2 F^n}{\partial x_1^2} \right], \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right)_{\Omega} = \\
 & = \frac{1}{Eh} \left( \frac{\partial}{\partial t} \Delta F^n, \Delta F^n \right)_{\Omega} + \left( \frac{\partial}{\partial t} \left[ \kappa_1 \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_2^2} + \kappa_2 \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_1^2} \right], F^n \right)_{\Omega} - \\
 & - \left( \left[ \kappa_1 \frac{\partial^2 F^n}{\partial x_2^2} + \kappa_2 \frac{\partial^2 F^n}{\partial x_1^2} \right], \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right)_{\Omega} = \frac{1}{2Eh} \frac{\partial}{\partial t} |\Delta F^n|_{\Omega}^2.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Проинтегрируем равенство (14) по переменной  $t \in (t_0, t_n)$  и, учитывая следующее неравенство:

$$\frac{2\nu E}{1-\nu^2} \left( \left[ A \frac{\partial u_{11}^n}{\partial x_1} - B \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_1^2} \right], \left[ A \frac{\partial u_{21}^n}{\partial x_2} - B \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_2^2} \right] \right)_{\text{D}} \leq \frac{\nu E}{1-\nu^2} \sum_{i=1}^2 \left| A \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial x_i} - B \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_i^2} \right|_{\text{D}}^2, \tag{16}$$

приходим к такому неравенству:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \left\{ \rho \left| \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right|_D^2 + \frac{E}{2(1+\nu)} \left| A \left( \frac{\partial u_{11}^n}{\partial x_2} + \frac{\partial u_{21}^n}{\partial x_1} \right) - B \left( 2 \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_1 \partial x_2} \right) \right|_D^2 + \frac{1}{Eh} |\Delta F^n|_\Omega^2 + \right. \\
 & \left. + \sum_{i=1}^2 \left( \rho \left| \frac{\partial}{\partial t} \left[ Au_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] \right|_D^2 + \frac{E}{1+\nu} \left| A \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial x_i} - B \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_i^2} \right|_D^2 + \frac{E}{2(1+\nu)} \left| C \left( u_{i1}^n + \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right) \right|_D^2 \right) \right\} + \\
 & + \varepsilon_3 \int_{t_0}^t \left| \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right|_D^2 dt + \sum_{i=1}^2 \varepsilon_i \int_{t_0}^t \left| \frac{\partial}{\partial t} \left[ Au_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] \right|_D^2 dt \leq \\
 & \leq \frac{1}{2} \left\{ \rho |\psi_{30}|_D^2 + \frac{E}{2(1+\nu)} \left| A \left( \frac{\partial \varphi_{11}^n}{\partial x_2} + \frac{\partial \varphi_{21}^n}{\partial x_1} \right) - B \left( 2 \frac{\partial^2 \varphi_{30}^n}{\partial x_1 \partial x_2} \right) \right|_D^2 + \right. \\
 & + \frac{2\nu E}{1-\nu^2} \left( \left[ A \frac{\partial \varphi_{11}^n}{\partial x_1} - B \frac{\partial^2 \varphi_{30}^n}{\partial x_1^2} \right], \left[ A \frac{\partial \varphi_{21}^n}{\partial x_2} - B \frac{\partial^2 \varphi_{30}^n}{\partial x_2^2} \right] \right) + \frac{1}{Eh} |\Delta F^n(x_1, x_2, t_0)|_\Omega^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^2 \left( \rho \left| A \psi_{i1}^n - B \frac{\partial \varphi_{30}^n}{\partial x_i} \right|_D^2 + \frac{E}{1-\nu^2} \left| A \frac{\partial \varphi_{i1}^n}{\partial x_i} - B \frac{\partial^2 \varphi_{30}^n}{\partial x_i^2} \right|_D^2 + \right. \\
 & \left. + \frac{E}{2(1+\nu)} \left| C \left( \varphi_{i1}^n + \frac{\partial \varphi_{30}^n}{\partial x_i} \right) \right|_D^2 \right) \left. \right\} + \int_{t_0}^t \left( g, \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right)_\Omega dt. \tag{17}
 \end{aligned}$$

Из (17) на основании леммы Тронуолла [5, стр. 152–153], условий данной теоремы и сильной сходимости в условиях (13) заключаем, что левая часть неравенства (17) ограничена некоторой положительной постоянной  $\gamma > 0$  ( $\gamma = const \in R$ ), зависящей от момента времени  $t_1$ , но не зависящей от « $n_3$ » и « $n_{i1}$ ».

Тем самым, каждое отдельное слагаемое из левой части неравенства (17) ограничено постоянной  $\gamma$  (конечно, при получении указанных оценок отбрасываются из левой части неравенства (17) слагаемые с « $\varepsilon_3$ » и « $\varepsilon_i$ »).

Рассмотрим подробнее получение априорных оценок на примере следующего слагаемого:

$$\begin{aligned}
 \gamma & \geq \left| \frac{\partial}{\partial t} \left[ Au_{i1}^n - B \frac{\partial u_{30}^n}{\partial x_i} \right] \right|_D^2 = \left| \left( x_3 - \frac{4x_3^3}{3h^2} \right) \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial t} - \frac{4x_3^3}{3h^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right) \right|_D^2 = \\
 & = \frac{h^3}{252} \iint_\Omega \left[ \frac{68}{5} \left( \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial t} \right)^2 - 2 \frac{16}{5} \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right) + \left( \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right) \right)^2 \right] dx_1 dx_2 \geq \\
 & \geq \frac{h^3}{252} \left[ \frac{68}{5} - \frac{16\varepsilon}{5} \right] \left| \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial t} \right|_\Omega^2 + \frac{h^3}{252} \left[ 1 - \frac{16}{5\varepsilon} \right] \left| \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right) \right|_\Omega^2
 \end{aligned} \tag{18}$$

(при получении неравенства (18) использовано неравенство Коши с « $\varepsilon$ » [5, стр. 33]), выбирая  $\varepsilon \in \left( \frac{16}{5}, \frac{17}{4} \right)$ , замечаем, что  $\frac{68}{5} - \frac{16\varepsilon}{5} > 0$ ,  $1 - \frac{16}{5\varepsilon} > 0$  и, следовательно, из (18) получаем:

$$\left| \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial t} \right|_{\Omega}^2 \leq \gamma_1, \quad \left| \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right) \right|_{\Omega}^2 \leq \gamma_2, \quad (19)$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — некоторые положительные постоянные.

По аналогии с (19) получаем:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial x_i} \right|_{\Omega}^2 &\leq const, & \left| \frac{\partial u_{11}}{\partial x_2} + \frac{\partial u_{21}}{\partial x_1} \right|_{\Omega}^2 &\leq const, \quad i = \overline{1,2}, \\ \left| 2 \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_1 \partial x_2} \right|_{\Omega}^2 &\leq const, & \left| \frac{\partial^2 u_{30}^n}{\partial x_i^2} \right|_{\Omega}^2 &\leq const, & |\Delta F^n|_{\Omega}^2 &\leq const, \end{aligned} \quad (20)$$

и кроме того, из (17) следует, что:

$$\left| \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right|_{\Omega}^2 \leq const. \quad (21)$$

Наличие априорных оценок (19) – (20) позволяет, подобно работе [4], продолжать решение задачи (12) – (13) на весь отрезок  $[t_0, t_1]$  и сделать вывод о том, что:

множества  $\{u_{30}^n\}, \{F^n\}$  ограничены в  $L^\infty(t_0, t_1; H_0^2(\Omega))$ ;

множества  $\left\{ \frac{\partial u_{30}^n}{\partial t} \right\}, \{u_{i1}^n\}, i = \overline{1,2}$ , ограничены в  $L^\infty(t_0, t_1; H_0^1(\Omega))$ ;

множества  $\left\{ \frac{\partial u_{i1}^n}{\partial t} \right\}, i = \overline{1,2}$ , ограничены в  $L^\infty(t_0, t_1; L^2(\Omega))$ .

Таким образом, множество приближенных решений задачи (1) – (6), полученных по методу Бубнова - Галёркина, слабо компактно в пространствах, соответствующих (8).

3<sup>0</sup> *Предельный переход.* В силу слабой компактности множества приближенных решений можно выделить подпоследовательности

$$\{u_{30}^M\}, \{F^M\}, \{u_{i1}^M\},$$

такие, что:

$$\begin{aligned} u_{30}^M &\rightarrow \tilde{u}_{30} & * - \text{слабо} & \text{ в } L^\infty(t_0, t_1; H_0^2(\Omega)); \\ \frac{\partial u_{30}^M}{\partial t} &\rightarrow \frac{\partial \tilde{u}_{30}}{\partial t} & * - \text{слабо} & \text{ в } L^\infty(t_0, t_1; H_0^1(\Omega)); \\ F^M &\rightarrow \tilde{F} & * - \text{слабо} & \text{ в } L^\infty(t_0, t_1; H_0^2(\Omega)); \\ u_{i1}^M &\rightarrow \tilde{u}_{i1} & * - \text{слабо} & \text{ в } L^\infty(t_0, t_1; H_0^1(\Omega)); \\ \frac{\partial u_{i1}^M}{\partial t} &\rightarrow \frac{\partial \tilde{u}_{i1}}{\partial t} & * - \text{слабо} & \text{ в } L^\infty(t_0, t_1; L^2(\Omega)), i = \overline{1,2}; \\ u_{30}^M &\rightarrow \tilde{u}_{30} & \text{ сильно} & \text{ в } L^2(Q). \end{aligned} \quad (22)$$

На основании условий (22) предельный переход в обобщенной форме записи уравнений (1) – (4) производится подобно работе [3, стр. 62–63].

Теорема доказана.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ворович И.И. Математические проблемы нелинейной теории пологих оболочек. М.: Наука, 1989. 376 с.
2. Кириченко В.Ф. «Проекционные» условия движения термоупругого деформируемого твердого тела и их применение в теории многослойных ортотропных оболочек // Труды XVIII Международной конференции по теории оболочек и пластин. Саратов: Издательство СГТУ, 1997. Т.1. С. 144–155.
3. Лионс Ж.-Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. М.: Мир, 1972. 587 с.
4. Ворович И.И. О некоторых прямых методах в нелинейной теории колебаний пологих оболочек // Известия АН СССР, Серия математическая, 1957. Т.21. 6. С. 747–784.
5. Ладыженская О.А. Краевые задачи математической физики. М.: Наука, 1973. 408 с.

**Кириченко Валерий Федорович** –  
доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры «Математика и Моделирование»  
Саратовского государственного технического  
университета

**Kirichenko Valery Fedorovich** –  
Doctor of Physical and Mathematical  
Sciences, Professor of the Department  
“Mathematics and Modeling”, Saratov State  
Technical University

**Самаркин Павел Александрович** –  
аспирант кафедры «Математика и  
Моделирование» Саратовского государственного  
технического университета

**Samarkin Pavel Aleksandrovich** –  
Post-graduate student of the Department  
“Mathematics and Modeling”, Saratov State  
Technical University

*Статья поступила в редакцию 04.03.2011 , принята к опубликованию 05.07.2011*

УДК 519.83

Т.Ф. Савина

## ВЛОЖЕНИЯ ИГР С ОТНОШЕНИЯМИ ПРЕДПОЧТЕНИЯ В ИГРЫ С ФУНКЦИЯМИ ВЫИГРЫША

*Введено понятие вложения игры с отношениями предпочтения в игру с функциями выигрыша. Указаны необходимые и достаточные условия вложимости игры в фактор-игру. Найдены необходимые, а также достаточные условия существования вложения игры с отношениями предпочтения в игру с функциями выигрыша.*

Игра с отношениями предпочтения, гомоморфизм, конгруэнтность, вложение

T.F. Savina

## INCLUSION MAPS OF GAMES WITH PREFERENCE RELATIONS INTO GAMES WITH PAYOFF FUNCTIONS

*The concept of the inclusion map of game with preference relations into a game with payoff functions is introduced. Necessary and sufficient conditions of the embeddability of game in factor-game are indicated. A necessary condition and also sufficient conditions for the existence of the inclusion of game with preference relations into a game with payoff functions are found.*

Game with preference relation, homomorphism, congruence relation, inclusion map

### Введение

Игра с отношениями предпочтения представляет собой математическую модель конфликта, в которой интересы участвующих в ней сторон формализованы бинарными отношениями предпочтения. На практике обычно стремятся ввести оценку предпочтения в числовой форме так, чтобы более предпочтительный объект имел большую оценку, а одинаково предпочтительные – равные оценки. Соответствующая математическая конструкция называется вложением структуры предпочтения в числовую структуру предпочтений. Отметим, что игры с отношениями предпочтения являются алгебраическими системами, а для алгебраических систем условия их вложимости в определенные классы представляют традиционную алгебраическую проблему [1, 2].

В первой части настоящей работы доказан ряд структурных теорем, относящихся к вложениям игр с отношениями предпочтения. Во второй части найдены необходимые, а также достаточные условия вложимости игры с отношениями предпочтения в игру с функциями выигрыша. Приведен пример построения такого вложения. В работе используются некоторые результаты о вложимости структур предпочтения [3].

В частности, используем следующую символику:  $\rho^*$  – строгая часть,  $\rho^s$  – симметрическая часть отношения предпочтения  $\rho$  [3].

## I. Структурные теоремы о вложении игр с отношениями предпочтения

Игра игроков  $\{1, \dots, n\}$  с отношениями предпочтения определяется как система объектов

$$G = \langle X_1, \dots, X_n, A, \rho_1, \dots, \rho_n, F \rangle, \quad (1)$$

где  $X_i$  – множество стратегий игрока  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ),

$A$  – множество исходов,

$\rho_i$  – бинарное отношение, выражающее предпочтения игрока  $i$ , заданное на  $A$ ;

$F$  – функция реализации, т.е. отображение множества ситуаций игры  $X = X_1 \times \dots \times X_n$  в множество исходов  $A$ .

Рассмотрим, наряду с игрой  $G$ , еще одну игру с отношениями предпочтения игроков  $\{1, \dots, n\}$ :  $H = \langle U_1, \dots, U_n, B, \sigma_1, \dots, \sigma_n, \Phi \rangle$ .

Для игр с отношениями предпочтения как для алгебраических систем естественным образом определено понятие гомоморфизма [4].

**Определение 1.** Набор отображений  $f = (\varphi_1, \dots, \varphi_n, \psi)$ , где  $\varphi_i : X_i \rightarrow U_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) и  $\psi : A \rightarrow B$ , называется гомоморфизмом игры  $G$  в игру  $H$ , если выполняются следующие два условия:

для любого индекса  $i = 1, \dots, n$  и любых элементов  $a_1, a_2 \in A$

$$a_1 \stackrel{\rho_i}{\leq} a_2 \Rightarrow \psi(a_1) \stackrel{\sigma_i}{\leq} \psi(a_2), \quad (2)$$

$$\psi(F(x_1, \dots, x_n)) = \Phi(\varphi_1(x_1), \dots, \varphi_n(x_n)). \quad (3)$$

Гомоморфизм  $f$  называется строгим гомоморфизмом, если условие (2) заменяется более сильной системой условий:

$$a_1 \stackrel{\rho_i^*}{<} a_2 \Rightarrow \psi(a_1) \stackrel{\sigma_i^*}{<} \psi(a_2), \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4)$$

$$a_1 \stackrel{\rho_i^s}{\sim} a_2 \Rightarrow \psi(a_1) \stackrel{\sigma_i^s}{\sim} \psi(a_2) \quad (i = 1, \dots, n). \quad (5)$$

**Определение 2.** Под вложением игры  $G$  в класс игр  $K$  будем понимать строгий гомоморфизм  $f$  игры  $G$  в некоторую игру  $H \in K$ . Вложение называется изоморфным, если в условиях (4) и (5) вместо  $\Rightarrow$  выполнена  $\Leftrightarrow$ .

**Замечание.** Для структуры предпочтений введено понятие представления [3]. Представлением структуры предпочтения  $\langle A, \rho \rangle$  в числовую прямую называется строгий гомоморфизм  $\psi : A \rightarrow R$ , для которого выполняются условия:

$$a_1 \stackrel{\rho^*}{<} a_2 \Rightarrow \psi(a_1) < \psi(a_2), \quad (6)$$

$$a_1 \stackrel{\rho^s}{\sim} a_2 \Rightarrow \psi(a_1) = \psi(a_2). \quad (7)$$

Под ядром гомоморфизма  $f = (\varphi_1, \dots, \varphi_n, \psi)$  понимается набор отношений эквивалентности  $\bar{\varepsilon}_f = (\varepsilon_{\varphi_1}, \dots, \varepsilon_{\varphi_n}, \varepsilon_\psi)$ , состоящий из ядер указанных отображений. Отношением конгруэнтности в игре  $G$  называется набор эквивалентностей  $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n, \varepsilon)$ , где  $\varepsilon_i \subseteq X_i^2$  ( $i = 1, \dots, n$ ),  $\varepsilon \subseteq A^2$ , удовлетворяющее условию согласованности для функции реализации

$$\left. \begin{array}{l} x'_1 \stackrel{\varepsilon_1}{\equiv} x_1 \\ x'_2 \stackrel{\varepsilon_2}{\equiv} x_2 \\ \dots \\ x'_n \stackrel{\varepsilon_n}{\equiv} x_n \end{array} \right\} \Rightarrow F(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) \stackrel{\varepsilon}{\equiv} F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (8)$$

Легко проверить:

**Утверждение 1.** Ядро всякого гомоморфизма является отношением конгруэнтности.

Пусть  $\bar{\varepsilon}$  – отношение конгруэнтности в игре  $G$ , тогда корректно определена фактор-игра  $G/\bar{\varepsilon} = \langle (X_i/\varepsilon_i)_{i=1, \dots, n}, A/\varepsilon, (\rho_i/\varepsilon)_{i=1, \dots, n}, F_\varepsilon \rangle$ , где  $F_\varepsilon([x_1]_{\varepsilon_1}, \dots, [x_n]_{\varepsilon_n}) \stackrel{df}{=} [F(x_1, \dots, x_n)]_\varepsilon$ .

Сформулируем ряд теорем о строгих гомоморфизмах, необходимых для дальнейшего изложения.

**Теорема 1.** Пусть  $f$  – строгий гомоморфизм игры  $G$  в игру  $H$ . Тогда  $f$  может быть представлено в виде композиции строгого гомоморфизма игры  $G$  на фактор-игру  $G/\bar{\varepsilon}_f$  и строгого инъективного гомоморфизма фактор-игры на игру  $H$ , т.е.  $\varphi_1 = h_1 \circ \varphi_{\varepsilon_1}, \dots, \varphi_n = h_n \circ \varphi_{\varepsilon_n}, \psi = h \circ \psi_\varepsilon$  (в краткой записи  $f = \bar{h} \circ f_\varepsilon$ ).

**Доказательство теоремы 1.**

Нужно доказать, что каноническое отображение  $f_\varepsilon$  игры  $G$  на фактор-игру  $G/\bar{\varepsilon}_f$  будет строгим гомоморфизмом.

Возьмем пару элементов  $a_1, a_2$ , для которой имеет место  $a_1 \stackrel{\rho}{<} a_2$ , а следовательно, и  $a_1 \stackrel{\rho}{\leq} a_2$ , тогда  $[a_1]_\varepsilon \stackrel{\rho/\varepsilon}{\leq} [a_2]_\varepsilon$  по определению фактор-отношения. Предположим, что  $[a_2]_\varepsilon \stackrel{\rho/\varepsilon}{\leq} [a_1]_\varepsilon$ . Тогда для некоторых  $a'_1, a'_2 \in A$ , таких, что  $\psi_\varepsilon(a'_1) = \psi_\varepsilon(a_1), \psi_\varepsilon(a'_2) = \psi_\varepsilon(a_2)$ , будет выполнено  $a'_2 \stackrel{\rho}{\leq} a'_1$ . Так как  $f$  – строгий гомоморфизм, из  $a_1 \stackrel{\rho}{<} a_2$  следует, что

$$\psi_\varepsilon(a_1) \stackrel{\rho/\varepsilon}{<} \psi_\varepsilon(a_2). \text{ Получаем следующую систему } \begin{cases} \psi_\varepsilon(a'_1) \stackrel{\rho/\varepsilon}{<} \psi_\varepsilon(a'_2), \\ \psi_\varepsilon(a'_2) \stackrel{\rho/\varepsilon}{\leq} \psi_\varepsilon(a'_1) \end{cases}.$$

Последняя система несовместна, следовательно, наше предположение не верно, значит, выполнено  $[a_1]_\varepsilon \stackrel{\rho/\varepsilon}{<} [a_2]_\varepsilon$ , т.е. гомоморфизм  $f_\varepsilon$  является строгим.

Аналогично доказывается, что  $\bar{h}$  является строгим гомоморфизмом. Инъективность гомоморфизма  $\bar{h}$  из фактор-игры на игру  $H$  доказана в работе [5].

Теорема 1 доказана.

Доказательство следующих двух теорем приведено в работе [5].

**Теорема 2.** Пусть  $\bar{\varepsilon}$  – отношение конгруэнтности в игре  $G$ , тогда канонический гомоморфизм  $f_\varepsilon$  игры  $G$  на  $G/\bar{\varepsilon}$  будет строгим тогда и только тогда, когда выполняется условие

$$\left. \begin{array}{l} a_1 \stackrel{\rho_i}{\leq} a_2 \\ a'_1 \stackrel{\varepsilon}{\equiv} a_1 \\ a'_2 \stackrel{\varepsilon}{\equiv} a_2 \\ a'_2 \stackrel{\rho_i}{\leq} a'_1 \end{array} \right\} \Rightarrow a_1 \stackrel{\rho_i}{\sim} a_2. \quad (9)$$

**Теорема 3.** Для того чтобы конгруэнтность  $\bar{\varepsilon}$  в игре  $G$  совпадала с ядром некоторого гомоморфизма, необходимо и достаточно, чтобы выполнялось (9).

Условие (9) эквивалентно тому, что  $\bar{\varepsilon}$  совпадает с ядром некоторого строгого гомоморфизма.

## II. Условия вложимости игры с отношениями предпочтения в игру с функциями выигрыша

В этом разделе находятся как необходимые, так и достаточные условия вложимости игры с отношениями предпочтения в игру с функциями выигрыша.

Гомоморфизм игры  $G = \langle X_1, \dots, X_n, A, \rho_1, \dots, \rho_n, F \rangle$  в игру с функциями выигрыша с теми же множествами стратегий игроков  $\Gamma = \langle X_1, \dots, X_n, \lambda_1, \dots, \lambda_n \rangle$  может быть определен как набор отображений  $\psi_1 : A \rightarrow R, \dots, \psi_n : A \rightarrow R$ , такой что

$$a_1 \stackrel{\rho_i}{\leq} a_2 \Rightarrow \psi_i(a_1) \leq \psi_i(a_2);$$

при этом гомоморфизм будет *строгим* тогда и только тогда, когда для всех  $i \in \{1, \dots, n\}$

$$a_1 < a_2 \stackrel{\rho_i}{\Rightarrow} \psi_i(a_1) < \psi_i(a_2).$$

Следующая теорема дает достаточное условие такой вложимости.

**Теорема 4.** Пусть  $G$  – конечная игра с отношениями предпочтения вида (1). Если для каждого игрока  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) структура предпочтений  $\langle A, \rho_i \rangle$  ациклична, то существует вложение этой игры в некоторую игру с функциями выигрыша.

Доказательство теоремы 4 основано на следующей лемме.

**Лемма 1.** Ацикличная структура предпочтений на конечном множестве имеет представление в числовую прямую.

**Доказательство леммы 1.** Пусть  $\langle A, \rho \rangle$  – структура предпочтений, где множество  $A$  конечно и  $\rho$  ациклично. Тогда его симметричная часть совпадает с тождественным отношением:  $\rho^s = \Delta_A$  (в противном случае, если  $(a, b) \in \rho$  и  $(b, a) \in \rho$  и  $b \neq a$ , то получаем цикл  $a \stackrel{\rho}{\rightarrow} b \stackrel{\rho}{\rightarrow} a$ , что противоречит условию ацикличности отношения  $\rho$ ). Асимметричная часть отношения  $\rho$  определяется здесь равенством:  $\rho^* = \rho \setminus \Delta_A$ , причем  $\rho^*$  будет строго ацикличным. Таким образом, в графе  $\langle A, \rho^* \rangle$  отсутствуют циклы и петли, а так как множество  $A$  конечно, то все пути в графе  $\langle A, \rho \rangle$  имеют конечную длину и их длины ограничены в совокупности. Для произвольного элемента  $a \in A$  полагаем:

$h(a)$  – максимальная длина пути в графе  $\langle A, \rho \rangle$ , ведущего в вершину  $a$ .

Натуральное число  $h(a)$  называется *высотой* элемента  $a$ , причем

$$0 \leq h(a) \leq n - 1, \tag{10}$$

где  $n = |A|$ .

Проверим, что функция  $h$  реализует строгий гомоморфизм структуры предпочтений  $\langle A, \rho \rangle$  в числовую структуру.

Пусть  $a_1 \stackrel{\rho^*}{<} a_2$ . Положим  $h(a_1) = k_1$ . Тогда существует путь длины  $k_1$  в графе  $\langle A, \rho^* \rangle$ , ведущий в вершину  $a_1$ . Добавляя к нему дугу  $a_1 \stackrel{\rho^*}{<} a_2$ , получим путь длины  $k_1 + 1$ , ведущий в вершину  $a_2$ , значит  $h(a_2) \geq k_1 + 1 > k_1 = h(a_1)$ , т.е.  $h(a_1) < h(a_2)$ . Показали справедливость импликации:

$$a_1 < a_2 \stackrel{\rho^*}{\Rightarrow} h(a_1) < h(a_2). \tag{11}$$

Учитывая, что в нашем случае структура предпочтения антисимметрична ( $\rho^s = \Delta_A$ ), имеем очевидное следование

$$a_1 \overset{\rho^s}{\sim} a_2 \Rightarrow h(a_1) = h(a_2). \quad (12)$$

Формулы (11) и (12) показывают, что для ациклической структуры предпочтения на конечном множестве функция высоты  $h$  задает ее представление в числовую прямую.

Лемма 1 доказана.

Искомое вложение игры  $G$  строится так. Игра  $\Gamma$  с функциями выигрыша задается следующим образом:  $\Gamma = \langle X_1, \dots, X_n, h_1 \circ F, \dots, h_n \circ F \rangle$ , где  $h_i$  – функция высоты в  $\langle A, \rho_i \rangle$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Набор отображений  $\psi_i = h_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) будет искомым вложением игры  $G$  с отношениями предпочтения в игру  $\Gamma$  с функциями выигрыша. Теорема 4 доказана.

Необходимое и достаточное условие такой вложимости дает следующая теорема.

**Теорема 5.** Для того чтобы конечная игра  $G$  была вложима в класс игр с функциями выигрыша, необходимо и достаточно, чтобы для каждого  $i$  отношение  $\rho_i$  было ациклическим относительно  $\rho_i^s$ .

Доказательство теоремы 5 основано на следующих вспомогательных утверждениях.

**Лемма 2.** Для того чтобы структура предпочтений  $\langle A, \rho \rangle$ , заданная на конечном множестве  $A$ , имела представление в числовую прямую, необходимо и достаточно, чтобы отношение  $\rho$  было ациклическим относительно своей симметричной части  $\rho^s$ .

**Доказательство леммы 2.**

Необходимость условия леммы 2 может быть установлена даже без предположения конечности множества  $A$ . Действительно, пусть при некотором натуральном  $n$  выполнено  $a_1 \overset{\rho}{\leq} a_2 \overset{\rho}{\leq} \dots \overset{\rho}{\leq} a_n \overset{\rho}{\leq} a_1$ . Тогда для каждого  $k = 1, \dots, n-1$  имеет место  $a_k \overset{\rho^*}{<} a_{k+1}$  или  $a_k \overset{\rho^s}{\sim} a_{k+1}$ .

Предположим, что для некоторого  $l = 1, \dots, n-1$  не выполнено  $a_l \overset{\rho^s}{\sim} a_{l+1}$ . Тогда  $a_l \overset{\rho^*}{<} a_{l+1}$  значит,  $a_1 \overset{\rho}{\leq} a_2 \overset{\rho}{\leq} \dots \overset{\rho}{\leq} a_l \overset{\rho^*}{<} a_{l+1} \overset{\rho}{\leq} \dots \overset{\rho}{\leq} a_n \overset{\rho}{\leq} a_1$ .

Согласно (6), (7), получаем из последней цепочки соотношений:

$$\psi(a_1) \leq \psi(a_2) \leq \dots \leq \psi(a_l) < \psi(a_{l+1}) \leq \dots \leq \psi(a_n) \leq \psi(a_1).$$

Откуда  $\psi(a_1) < \psi(a_1)$ , что невозможно. Необходимость доказана.

Доказательство достаточности основано на следующем вспомогательном утверждении.

**Утверждение 2.** Пусть отношение  $\rho$  ациклично относительно своей симметричной части  $\rho^s$ . Тогда каноническое отображение из  $A$  в  $A/\varepsilon_\rho$  будет строгим гомоморфизмом структуры предпочтений  $\langle A, \rho \rangle$  на фактор-структуру  $\langle A/\varepsilon_\rho, \rho/\varepsilon_\rho \rangle$ .

*Пояснение.* Здесь  $\varepsilon_\rho$  есть отношение эквивалентности, классами которой являются циклы графа  $\langle A, \rho \rangle$ .

Известно [3], что фактор-отношение  $\rho/\varepsilon_\rho$ , полученное «стягиванием циклов», ациклично.

Доказательство утверждения 2.

Так как фактор-отношение  $\rho/\varepsilon_\rho$  ациклично, оно будет антисимметричным. Полагая для краткости  $\rho_0 = \rho/\varepsilon_\rho$ , получаем  $\rho_0^s = \Delta, \rho_0^* = \rho_0 \setminus \Delta$ . Пусть  $a < a'$ . Тогда выполняется

$[a]_{\varepsilon_\rho}^{\rho_0} \leq [a']_{\varepsilon_\rho}$ . Предположим, что  $[a]_{\varepsilon_\rho} = [a']_{\varepsilon_\rho}$ . Тогда  $a \equiv_{\varepsilon_\rho} a'$ , и в графе  $\langle A, \rho \rangle$  существует путь из вершины  $a'$  в вершину  $a: a' \stackrel{\rho}{\leq} x_1 \stackrel{\rho}{\leq} \dots \stackrel{\rho}{\leq} x_k \stackrel{\rho}{\leq} a$ . Добавляя к нему дугу  $a \stackrel{\rho}{\leq} a'$ , получаем в итоге цикл, и по свойству ацикличности  $\rho$  относительно  $\rho^s$  должно быть  $a \sim_{\rho^s} a'$ , что противоречит предположению  $a <_{\rho^s} a'$ . Итак, в соотношении  $[a]_{\varepsilon_\rho} \leq [a']_{\varepsilon_\rho}$  равенство  $[a]_{\varepsilon_\rho} = [a']_{\varepsilon_\rho}$  исключено; учитывая, что  $\rho_0 \setminus \Delta = \rho_0^*$ , получаем  $[a]_{\varepsilon_\rho}^{\rho_0} < [a']_{\varepsilon_\rho}^{\rho_0}$  и в итоге показана справедливость импликации

$$a <_{\rho^s} a' \Rightarrow [a]_{\varepsilon_\rho}^{\rho_0^*} < [a']_{\varepsilon_\rho}^{\rho_0^*}. \quad (13)$$

Далее, так как условие  $a \sim_{\rho^s} a'$  влечет  $a \equiv_{\varepsilon_\rho} a'$  и  $[a]_{\varepsilon_\rho} = [a']_{\varepsilon_\rho}$ , то справедлива импликация

$$a \sim_{\rho^s} a' \Rightarrow [a]_{\varepsilon_\rho} = [a']_{\varepsilon_\rho}. \quad (14)$$

Утверждение 2 состоит в выполнимости формул (13), (14).

Перейдем к доказательству достаточности в лемме 2. Согласно утверждению 2, каноническое отображение из  $A$  в  $A/\varepsilon_\rho$  является строгим гомоморфизмом структуры предпочтений  $\langle A, \rho \rangle$  на фактор-структуру  $\langle A/\varepsilon_\rho, \rho/\varepsilon_\rho \rangle$ . Поскольку последняя ациклична, функция высоты  $h$  будет ее строгим гомоморфизмом в числовую структуру предпочтений. Тогда их композиция задает строгий гомоморфизм из  $\langle A, \rho \rangle$  в числовую структуру предпочтений, т.е. является представлением структуры предпочтений  $\langle A, \rho \rangle$  в числовую прямую.

Завершение доказательства теоремы 5 проводится аналогично завершению доказательства теоремы 4. Теорема 5 доказана.

Рассмотрим теперь бесконечные игры, т.е. такие, в которых хотя бы один из игроков (или все) имеет бесконечное множество стратегий.

**Теорема 6.** Пусть  $G$  – игра с отношениями предпочтения вида (1). Если существует вложение этой игры в некоторую игру с функциями выигрыша, то для каждого игрока  $i$  отношение  $\rho_i$  должно быть ацикличным относительно своей симметричной части  $\rho_i^s$ .

Необходимость этого условия доказана в теореме 5.

Достаточное условие существования вложимости для игры со счетным множеством исходов дает следующая теорема.

**Теорема 7.** Пусть  $G$  – игра с отношениями предпочтения вида (1) и мощность множества  $A$  не более чем счетна. Если для каждого  $i$  отношение  $\rho_i$  ациклично относительно своей симметричной части  $\rho_i^s$ , то существует вложение игры  $G$  в некоторую игру с функциями выигрыша.

**Доказательство теоремы 7.**

Если для каждого  $i$  отношение  $\rho_i$  ациклично относительно своей симметричной части  $\rho_i^s$ , то верно включение  $\rho_i \subseteq \hat{\rho}_i$ , где  $\hat{\rho}_i$  – отношение достижимости, которое здесь будет отношением порядка. Так как по теореме Шпильрайна [1] всякий порядок на множестве можно продолжить до линейного порядка на этом множестве, то  $\hat{\rho}_i \subseteq \bar{\rho}_i$ , где  $\bar{\rho}_i$  – линейный порядок. По теореме 22 [5] существует строго изотонное отображение из  $\langle A, \bar{\rho}_i \rangle$  во множество действительных чисел, снабженное естественным порядком. Таким образом,

обозначая через  $(\psi_i)_{i=1,\dots,n}$  соответствующий набор строго изотонных отображений, получаем, что он будет определять вложение игры  $G$  в построенную игру с функциями выигрыша  $\Gamma = \langle X_1, \dots, X_n, \psi_1 \circ F, \dots, \psi_n \circ F \rangle$ .

Теорема 7 доказана.

Рассмотрим теперь общий случай, когда  $A$  – произвольное бесконечное множество любой мощности. В этом случае главную роль играют следующие понятия.

**Определение 3.** Подмножество  $S \subseteq A$  называется *мажорантно стабильным*, если оно удовлетворяет условию

$$a \in S, a' \stackrel{\rho}{\geq} a \Rightarrow a' \in S. \quad (15)$$

Будем говорить, что семейство  $F$  мажорантно стабильных подмножеств является *разделяющим*, если для любых  $a' \stackrel{\rho^*}{>} a$  найдется  $S \in F$ , для которого  $a \notin S$  и  $a' \in S$ .

**Теорема 8.** Для того чтобы бесконечная игра  $G$  вида (1) была вложима в некоторую игру с функциями выигрыша, необходимо и достаточно, чтобы для каждого  $i = 1, \dots, n$  во множестве исходов  $A$  игры  $G$  существовало не более чем счетное разделяющее семейство мажорантно стабильных подмножеств относительно отношения  $\rho_i$ .

Доказательство теоремы 8 основано на следующей лемме.

**Лемма 3.** Для того чтобы структура предпочтений  $\langle A, \rho \rangle$ , заданная на множестве  $A$ , имела представление в числовую прямую, необходимо и достаточно, чтобы в  $\langle A, \rho \rangle$  существовало не более чем счетное разделяющее семейство мажорантно стабильных подмножеств.

**Доказательство леммы 3.**

Необходимость. Пусть  $\psi$  – представление структуры предпочтений в числовую прямую. Рассмотрим нумерацию  $(r_n)_{n=1,2,\dots}$  множества рациональных чисел. Для любого натурального  $n \in N$  положим  $S_n = \{a \in A : \psi(a) \geq r_n\}$ . Каждое подмножество  $S_n$  мажорантно стабильно, и семейство  $(S_n)_{n \in N}$  не более чем счетно. Пусть  $a' \stackrel{\rho^*}{>} a$ . Тогда согласно (6):  $\psi(a') > \psi(a)$ . Возьмем рациональное число  $r_k$ , для которого  $\psi(a) < r_k < \psi(a')$ . Тогда подмножество  $S_k$  разделяет элементы  $a$  и  $a'$ , т.к.  $a \notin S_k$ ,  $a' \in S_k$ .

Достаточность. Пусть  $F = (S_n)_{n \in N}$  – не более чем счетное разделяющее семейство мажорантно стабильных подмножеств. Обозначим через  $\chi_n$  характеристическую функцию подмножества  $S_n$ . Положим

$$\psi(a) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\chi_n(a)}{2^n}. \quad (16)$$

Заметим, что числовой ряд, стоящий в правой части (16), является сходящимся при любом наборе подмножеств  $(S_n)_{n \in N}$ . Покажем, что функция  $\psi$  является искомым представлением. Пусть  $a' \stackrel{\rho^*}{>} a$ . Тогда согласно (15), всякое мажорантно стабильное подмножество, содержащее  $a$ , содержит также  $a'$ , откуда  $\chi_n(a') \geq \chi_n(a)$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Так как семейство  $F$  разделяющее, то найдется  $k \in N$ , для которого  $a \notin S_k$  и  $a' \in S_k$ , т.е.  $\chi_k(a) = 0$  и  $\chi_k(a') = 1$ , отсюда  $\psi(a') - \psi(a) > \frac{1}{2^k}$ , значит,  $\psi(a') > \psi(a)$  и (6) доказано.

Для проверки (7) заметим, что если  $a' \stackrel{\rho^*}{\sim} a$ , то при любом  $n \in N$  выполняется равносильность:



$$a' \in S_n \Leftrightarrow a \in S_n,$$

отсюда  $\chi_n(a') = \chi_n(a)$ , значит  $\psi(a') = \psi(a)$ . Лемма 3 доказана.

Для доказательства теоремы 8 достаточно в качестве строгого гомоморфизма взять функции  $\psi_i$  в виде (16) и положить функции выигрыша в игре  $\Gamma$  равными  $\lambda_i = \psi_i \circ F$ .

**Пример.**

Рассмотрим игру двух игроков  $G = \langle X, Y, A, \rho_1, \rho_2, F \rangle$ , в которой множество стратегий первого игрока  $X = \{1, 2, 3\}$ , второго игрока  $Y = \{1, 2, 3\}$ , множество исходов  $A = \{p, q, r, s, u, v, w\}$ , функция реализации задана табл. 1.

Таблица 1

Функция реализации игры

$F$	1	2	3
1	$v$	$r$	$w$
2	$p$	$u$	$r$
3	$r$	$s$	$q$

На рис. 1, 2 представлены отношения предпочтения игроков 1 и 2, заданные графами.

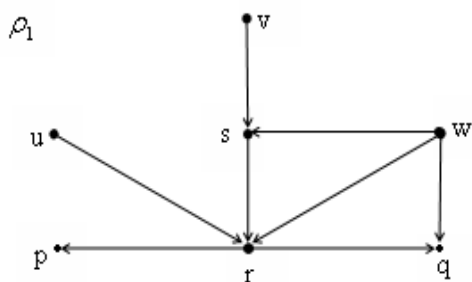


Рис. 1. Граф отношения предпочтения игрока 1

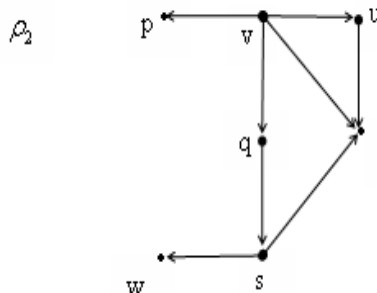


Рис. 2. Граф отношения предпочтения игрока 2

Так как в графах нет ни циклов (контуров), ни петель, то для каждого игрока отношение предпочтения является ациклическим относительно своей симметричной части, и по теореме 4 существует вложение этой игры в некоторую игру с функциями выигрыша. Для нахождения функций выигрыша требуется указать высоту каждого элемента в своем графе.

На рис. 3, 4 представлены диаграммы отношений предпочтения, которые представляют собой графы, вершины которых расположены по уровням в соответствии с их высотой.

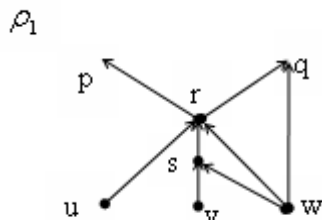


Рис. 3. Диаграмма отношения предпочтения игрока 1

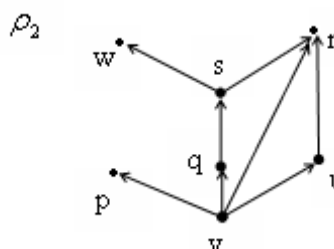


Рис. 4. Диаграмма отношения предпочтения игрока 2

Набор отображений  $h_1, h_2 : A \rightarrow R$  представлен в табл. 2, 3.

Таблица 2

Отображение  $h_1$  для игрока 1

Для игрока 1, функция высоты $h_1$							
исход	$p$	$q$	$r$	$s$	$u$	$v$	$w$
высота	3	3	2	1	0	0	0

Таблица 3

Отображение  $h_2$  для игрока 2

Для игрока 2, функция высоты $h_2$							
исход	$p$	$q$	$r$	$s$	$u$	$v$	$w$
высота	1	1	3	2	1	0	3

Тогда на базе игры  $G$  построим игру  $G_{(h_1, h_2)} = \langle X, Y, F \bullet h_1, F \bullet h_2 \rangle$ , в которой выигрыш игрока в ситуации  $(x, y)$  равен высоте соответствующего исхода в графе.

Получаем биматричную игру с функциями выигрыша, заданную матрицей, представленной в табл. 4.

Таблица 4

Матрица функций выигрыша

$G_{(h_1, h_2)}$	1	2	3
1	(0,0)	(2,3)	(0,3)
2	(3,1)	(0,1)	(2,3)
3	(2,3)	(1,2)	(3,1)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Курош А.Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука, 1968. 431 с.
2. Розен В.В. Вложения упорядоченных множеств в упорядоченные линейные пространства // Известия высших учебных заведений. Математика. 1998. №7(434) С. 32–38.
3. Розен В.В. Структура отношений предпочтения: Учеб. пособие. Саратов: Изд-во СГУ, 2007. 57 с.
4. Богомолов А.М., Салий В.Н. Алгебраические основы теории дискретных систем. М.: Наука. Физматлит, 1997. 368 с.
5. Savina T.F. Homomorphisms and Congruence Relations for Games with Preference Relations // Contributions to game theory and management. Vol. III. Collected papers on the Third International Conference Game Theory and Management. SPb.: Graduate School of Management SPbU, 2010, P. 387–398.
6. Биркгоф Г. Теория решеток. М.: Наука, 1984. 568 с.

**Савина Татьяна Федоровна** – ассистент кафедры «Менеджмент, Маркетинг, Логистика», Институт развития бизнеса и стратегий Саратовского государственного технического университета; аспирант кафедры геометрии механико-математического факультета Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

**Savina Tatiana Fedorovna** – Assistant of the Department “Management, Marketing, Logistics”, Business and strategy development institute of Saratov State Technical University; Post-graduate Student of the Department “Geometry”, Saratov State University on name N.G. Chernyshevsky

Статья поступила в редакцию 02.03.2011, принята к опубликованию 18.07.2011

УДК 532.516: 517.958: 531.383

**Ю.Н. Кондратова**

**ГИДРОУПРУГОСТЬ УПРУГОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЫ  
КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЕЕ ЗАКРЕПЛЕНИЯХ**

*Рассмотрена цилиндрическая труба кольцевого сечения с упругими внутренней и внешней оболочками для случаев свободного опирания и жесткого защемления оболочек по торцам. Исследовано влияния типа закрепления и свойств жидкости на резонансные частоты и амплитудные частотные характеристики оболочек.*

Гидроупругость, вязкая жидкость, труба кольцевого сечения

**J.N. Kondratova**

**HYDROELASTICITY OF THE ELASTIC CYLINDRICAL TUBE  
OF RING SECTION AT ITS VARIOUS FIXING**

*The cylindrical tube of ring section with elastic internal and external shells for cases free fixing and a rigid fixing of shells on end faces are considered. The influences of type of fastening and properties of a liquid on resonance frequencies and amplitude frequency characteristics of shells are investigated.*

Hydroelasticity, viscous liquid, tube of ring section

В современных машинах и агрегатах широко используются различные трубопроводы кольцевого профиля для подвода (отвода) жидкости. Такие трубопроводы при работе агрегата могут подвергаться значительным механическим воздействиям, таким как перепады давления или вибрация.

В данной работе рассматривается одно из воздействий на трубопровод, а именно гармонический перепад давления на входе и выходе из трубы.

Следует заметить, что тип закрепления оболочек трубы может влиять на надежность работы трубопровода, поэтому будем рассматривать два типа закрепления оболочек: свободное опирание и жесткое защемление по торцам.

Исследования по ламинарным движениям вязкой несжимаемой жидкости в бесконечно длинной абсолютно жесткой цилиндрической трубе под действием гармонического перепада давления были проведены И.С. Громека [1], под действием внезапно приложенного давления - Н.А. Слезкиным [2], по волновым движениям в бесконечно длинных упругих трубах при заданной форме упругих перемещений – в [3] и при безмоментной теории оболочек - в [4]. Однако случай свободного опирания на торцах ранее не рассматривался.

Рассмотрим трубопроводную систему кольцевого профиля с упругими внутренней и внешней оболочками конечной длины, взаимодействующими с вязкой несжимаемой жидкостью под действием гармонически изменяющегося давления на входе и выходе (рис. 1).

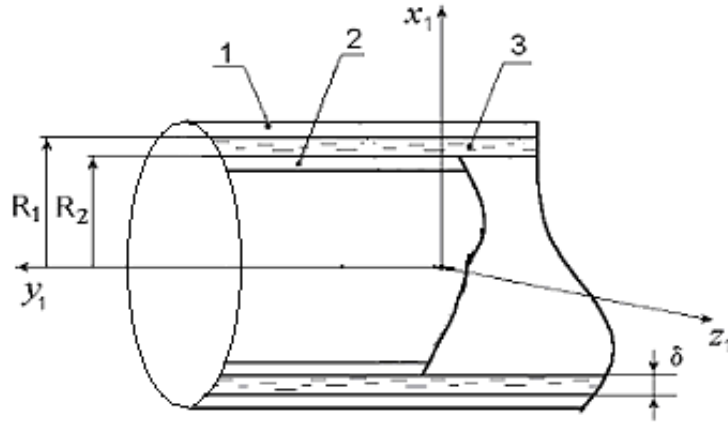


Рис. 1. Трубопроводная система кольцевого профиля с упругими внутренней и внешней оболочками конечной длины, взаимодействующими с вязкой несжимаемой жидкостью под действием гармонически изменяющегося давления на входе и выходе

Трубопроводная система состоит из двух упругих соосных цилиндрических оболочек. Обозначим внутренний  $R_1$  и срединной поверхности  $R^{(1)}$  радиусы внешней оболочки; внешний радиус  $R_2$  и радиус срединной поверхности  $R^{(2)}$  внутренней оболочки. Ширина  $\delta = R_1 - R_2$  цилиндрической щели кольцевого сечения значительно меньше радиуса внутренней оболочки. Толщины внешней  $h_0^{(1)} = 2(R^{(1)} - R_1)$  и внутренней  $h_0^{(2)} = 2(R_2 - R^{(2)})$  оболочек значительно меньше радиусов их срединных поверхностей  $R^{(1)}$  и  $R^{(2)}$ . Длины оболочек  $l$  – одинаковы, а упругие перемещения значительно меньше ширины  $\delta$  цилиндрической щели. Течение происходит под действием переменного, гармонического по времени перепада давления.

Течение жидкости между оболочками осесимметричное и описывается уравнениями Навье-Стокса и неразрывности [5], в цилиндрической системе координат в безразмерных переменных [6], имеющими вид:

$$\begin{aligned} \psi^2 \operatorname{Re} \left[ \frac{\partial u_\xi}{\partial \tau} + \lambda \left( u_\xi \frac{\partial u_\xi}{\partial \xi} + u_\zeta \frac{\partial u_\xi}{\partial \zeta} \right) \right] &= -\frac{\partial P}{\partial \xi} + \psi^2 \left( \frac{\partial^2 u_\xi}{\partial \xi^2} + \frac{\psi}{1 + \xi \psi} \frac{\partial u_\xi}{\partial \xi} - \left( \frac{\psi}{1 + \xi \psi} \right)^2 u_\xi + \frac{\psi^2}{\sigma^2} \frac{\partial^2 u_\xi}{\partial \zeta^2} \right), \\ \operatorname{Re} \left[ \frac{\partial u_\zeta}{\partial \tau} + \lambda \left( u_\xi \frac{\partial u_\zeta}{\partial \xi} + u_\zeta \frac{\partial u_\zeta}{\partial \zeta} \right) \right] &= -\frac{1}{\sigma^2} \frac{\partial P}{\partial \zeta} + \frac{\partial^2 u_\zeta}{\partial \zeta^2} + \frac{\psi}{1 + \xi \psi} \frac{\partial u_\zeta}{\partial \xi} + \frac{\psi^2}{\sigma^2} \frac{\partial^2 u_\zeta}{\partial \zeta^2}, \\ \frac{\partial u_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial u_\zeta}{\partial \zeta} + \frac{\psi}{1 + \xi \psi} u_\xi &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\xi = \frac{(r - R_2)}{\delta}$ ,  $\zeta = \frac{2y}{l}$ ,  $\tau = \omega t$ ,  $V_r = w_m^{(1)} \omega u_\xi$ ,  $V_y = (w_m^{(1)} \omega / \psi) \sigma u_\zeta$ ,  $u_1^{(i)} = u_m^{(i)} U_1^{(i)}$ ,  $u_3^{(i)} = w_m^{(i)} U_3^{(i)}$ ,

$$\lambda^{(i)} = \frac{w_m^{(i)}}{\delta}, \quad \sigma = \left( \frac{l}{2R_2} \right), \quad p = p_0 + \frac{\rho v w_m^{(1)} \omega^2}{\psi^2 \operatorname{Re}} P, \quad \psi = \frac{\delta}{R_2} \ll 1, \quad \operatorname{Re} = \frac{\delta^2 \omega}{\nu},$$

$i = 1$  для внешней оболочки,

$i = 2$  для внутренней оболочки.

Здесь  $r, y$  – координаты цилиндрической системе координат  $(n_r, j)$ , начало  $O$  которой находится в центре внутренней оболочки,  $V_r, V_y$  – компоненты вектора скорости жидкости в цилиндрической системе координат;  $p$  – давление жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  $t$  – время;  $\omega$  – частота (рад/с);  $w_m^{(i)}$  – амплитуды

прогибов оболочек;  $u_m^{(i)}$  – амплитуды продольных перемещений оболочек;  $p_0$  – постоянный уровень отсчета давления;  $u_3^{(i)}$  – прогибы оболочек, положительные в сторону, противоположную центру кривизны;  $u_1^{(i)}$  – продольные перемещения оболочек, положительные в сторону, противоположную оси  $y$ .

Граничные условия представляют собой условия прилипания жидкости к поверхностям оболочек и условия для давления на торцах, в безразмерных переменных имеют вид:

$$u_\xi = \frac{\partial U_3^{(1)}}{\partial \tau}, u_\zeta = -\frac{\Psi u_m^{(1)}}{\sigma w_m^{(1)}} \frac{\partial U_1^{(1)}}{\partial \tau}, \xi = \xi^{(1)} = 1 + \lambda^{(1)} U_3^{(1)}, \quad (2)$$

$$u_\xi = \frac{\partial U_3^{(2)}}{\partial \tau}, u_\zeta = -\frac{\Psi \lambda^{(1)} u_m^{(2)}}{\sigma \lambda^{(2)} w_m^{(2)}} \frac{\partial U_1^{(2)}}{\partial \tau}, \xi = \xi^{(2)} = \lambda^{(2)} U_3^{(2)},$$

$$P = P^+, \zeta = 1; P = P^-, \zeta = -1.$$

Уравнения динамики внутренней и внешней упругих замкнутых цилиндрических оболочек, основанных на гипотезах Кирхгофа-Лява [7, 8], в безразмерных переменных представлены как:

$$\left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^2 u_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_1^{(i)}}{\partial \zeta^2} - \mu_0^{(i)} \frac{2R^{(i)}}{l} w_m^{(i)} \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \zeta} - \frac{(R^{(i)})^2 \omega^2}{(c^{(i)})^2} u_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_1^{(i)}}{\partial \tau^2} = -\frac{(R^{(i)})^2}{\rho_0^{(i)} h_0^{(i)} (c^{(i)})^2} q_s^{(i)}, \quad (3)$$

$$\mu_0^{(i)} \frac{2R^{(i)}}{l} u_m^{(i)} \frac{\partial U_1^{(i)}}{\partial \zeta} + w_m^{(i)} U_3^{(i)} + (a_0^{(i)})^2 \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^4 w_m^{(i)} \frac{\partial^4 U_3^{(i)}}{\partial \zeta^4} + \frac{(R^{(i)})^2 \omega^2}{(c^{(i)})^2} w_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_3^{(i)}}{\partial \tau^2} = (-1)^{i-1} \frac{(R^{(i)})^2}{\rho_0^{(i)} h_0^{(i)} (c^{(i)})^2} q_n^{(i)}.$$

Напряжения на поверхностях оболочек со стороны слоя жидкости записываются в виде:

$$q_s^{(i)} = -z^{(i)} \left\{ \frac{\rho R_2 w_m^{(i)} \omega \Psi}{\Psi \delta^2} \Psi \left[ \sigma \left( \frac{\partial u_\zeta}{\partial \xi} + \frac{\Psi^2}{\sigma^2} \frac{\partial u_\xi}{\partial \zeta} \right) + \lambda^{(i)} \left( P \frac{1}{\sigma} \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \zeta} - 2\Psi^2 \frac{1}{\sigma} \frac{\partial u_\zeta}{\partial \zeta} \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \zeta} \right) \right] + \Psi \lambda^{(i)} p_0 \frac{1}{\sigma} \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \zeta} \right\}, \quad (4)$$

$$q_n^{(i)} = z^{(i)} \left\{ p_0 + \frac{\rho R_2 w_m^{(i)} \omega \Psi}{\Psi \delta^2} \left[ P - 2\Psi^2 \frac{\partial u_\xi}{\partial \xi} + \lambda^{(i)} \Psi^2 \left( \frac{\partial u_\zeta}{\partial \xi} + \frac{\Psi^2}{\sigma^2} \frac{\partial u_\xi}{\partial \zeta} \right) \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \zeta} \right] \right\}, \quad \xi = \xi^{(i)}$$

$$(a_0^{(i)})^2 = \frac{(h_0^{(i)})^2}{12(R^{(i)})^2}, \quad z^{(i)} = \left[ 1 + \frac{\lambda^{(i)} \Psi^2}{\sigma^2} \right]^{-1/2}.$$

где  $E^{(i)}$  – модули Юнга материала оболочек,  
 $\mu_0^{(i)}$  – коэффициенты Пуассона материала оболочек,  
 $\rho_0^{(i)}$  – плотности материала оболочек,  
 $(c^{(i)})^2 = E^{(i)} / \left[ \rho_0^{(i)} (1 - (\mu_0^{(i)})^2) \right]$  – скорости распространения продольной волны (звука) в материале оболочек.

Граничные условия для упругих перемещений могут быть представлены условиями свободного опирания

$$U_3^{(i)} = \frac{\partial^2 U_3^{(i)}}{\partial \zeta^2} = \frac{\partial U_1^{(i)}}{\partial \zeta} = 0, \quad \zeta = \pm 1 \quad (5)$$

или жесткого защемления

$$U_1^{(i)} = U_3^{(i)} = \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \zeta} = 0, \quad \zeta = \pm 1. \quad (6)$$

В нулевом приближении по  $\psi \ll 1$  (для тонкого слоя жидкости) уравнения (1) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \xi} = 0, \quad \text{Re} \left[ \frac{\partial u_\zeta}{\partial \tau} + \lambda^{(1)} \left( u_\xi \frac{\partial u_\zeta}{\partial \xi} + u_\zeta \frac{\partial u_\xi}{\partial \zeta} \right) \right] &= -\frac{1}{\sigma^2} \frac{\partial P}{\partial \zeta} + \frac{\partial^2 u_\zeta}{\partial \zeta^2}, \\ \frac{\partial u_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial u_\zeta}{\partial \zeta} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

а граничные условия (1, 2) запишутся в форме:

$$\begin{aligned} u_\xi = \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \tau}, \quad u_\zeta = 0, \quad \xi = 1 + \lambda^{(1)} U_3^{(1)}, \quad i = 1; \quad \xi = \lambda^{(2)} U_3^{(2)}, \quad i = 2, \\ P = P^+, \quad \zeta = 1; \quad P = P^-, \quad \zeta = -1. \end{aligned} \quad (8)$$

Запишем уравнения динамики внешней и внутренней оболочек (3) с учетом (4) при  $\psi \ll 1$ :

$$\begin{aligned} \left( \frac{2R^{(i)}}{l} \right)^2 u_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_1^{(i)}}{\partial \zeta^2} - \mu_0^{(i)} \frac{2R^{(i)}}{l} w_m^{(i)} \frac{\partial U_3^{(i)}}{\partial \zeta} - \frac{(R^{(i)})^2 \omega^2}{(c^{(i)})^2} u_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_1^{(i)}}{\partial \tau^2} = 0, \\ \mu_0^{(i)} \frac{2R^{(i)}}{l} u_m^{(i)} \frac{\partial U_1^{(i)}}{\partial \zeta} + w_m^{(i)} U_3^{(i)} + (a_0^{(i)})^2 \left( \frac{2R^{(i)}}{l} \right)^4 w_m^{(i)} \frac{\partial^4 U_3^{(i)}}{\partial \zeta^4} + \\ + \frac{(R^{(i)})^2 \omega^2}{(c^{(i)})^2} w_m^{(i)} \frac{\partial^2 U_3^{(i)}}{\partial \tau^2} = (-1)^{i-1} \frac{(R^{(i)})^2}{\rho_0^{(i)} h_0^{(i)} (c^{(i)})^2} \left( p_0 + \frac{\rho R_2 w_m^{(i)} \omega^2}{\psi \text{Re}} P \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Граничные условия для упругих перемещений совпадают с (5) и (6).

Полагая, что прогибы оболочек  $w_m^{(i)} \ll \delta$ , решение задачи можно представить в виде асимптотического разложения по степеням малых параметров  $\lambda^{(1)}$  и  $\lambda^{(2)} = \lambda^{(1)} w_m^{(1)} / w_m^{(2)}$ :

$$T = T_0 + \lambda^{(1)} T_1 + O\left((\lambda^{(1)})^2\right) \quad (10)$$

где под  $T$  понимается давление  $P$ , компоненты скорости жидкости  $u_\xi$  и  $u_\zeta$ , упругие перемещения внешней и внутренней оболочек  $U_1^{(i)}, U_3^{(i)}$  (для простоты записи индексы в последствии опускаются).

Подставляя (10) в уравнения динамики жидкости (7), условия прилипания жидкости (8), уравнения динамики оболочек (9), а также в граничные условия (5) и (6) со снесением их на невозмущенную поверхность, и опуская слагаемые порядка  $\lambda^{(1)}$ , получим уравнения динамики жидкости в нулевом приближении по  $\lambda^{(1)}$ :

$$\frac{\partial P}{\partial \xi} = 0, \quad \text{Re} \frac{\partial u_\zeta}{\partial \tau} = -\frac{1}{\sigma^2} \frac{\partial P}{\partial \zeta} + \frac{\partial^2 u_\zeta}{\partial \zeta^2}, \quad \frac{\partial u_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial u_\zeta}{\partial \zeta} = 0 \quad (11)$$

с граничными условиями

$$u_\xi = \frac{\partial U_3^{(1)}}{\partial \tau}, \quad u_\zeta = 0, \quad \xi = 1; \quad u_\xi = \frac{w_m^{(2)}}{w_m^{(1)}} \frac{\partial U_3^{(2)}}{\partial \tau}, \quad u_\zeta = 0, \quad \xi = 0, \quad (12)$$

$$P = P^+, \zeta = 1; P = P^-, \zeta = -1,$$

где  $P^+ = P_m^+ \sin \tau$ ,  $P^- = P_m^- \sin \tau$  – гармонические функции времени.

Уравнения динамики оболочек в нулевом приближении по  $\lambda^{(1)}$  будут иметь вид (9), а граничные условия останутся в виде (5) и (6) соответственно для свободного опирания и жесткого защемления.

Предполагая гармоническую зависимость от времени давления в жидкости, компонент скорости жидкости и упругих перемещений оболочек из второго уравнения системы (7) с учетом граничных условий (8), находим компоненты скорости жидкости и безразмерное редуцированное давление:

$$\begin{aligned} u_\xi &= -\frac{1}{\varepsilon^2 \sigma^2} \frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} \left[ P \int_0^\xi L_2(\xi) d\xi + \frac{\partial P}{\partial \tau} \int_0^\xi L_1(\xi) d\xi \right] + \frac{w_m^{(2)}}{w_m^{(1)}} \frac{\partial U_3^{(2)}}{\partial \tau}, \\ u_\zeta &= \frac{1}{\varepsilon^2 \sigma^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ L_2(\xi) P + L_1(\xi) \frac{\partial P}{\partial \tau} \right], \\ P &= \frac{1}{2} (P^+ + P^-) + \frac{1}{2} \zeta (P^+ - P^-) - \frac{\sigma^2}{2} (\zeta - 1) \int_{-1}^1 \int_0^\zeta \left[ 2\varepsilon^2 \alpha \frac{\partial^2 V}{\partial \tau^2} + \right. \\ &\quad \left. + 12\gamma \frac{\partial V}{\partial \tau} \right] d\zeta d\zeta - \sigma^2 \int_\zeta^1 \int_0^\zeta \left[ 2\varepsilon^2 \alpha \frac{\partial^2 V}{\partial \tau^2} + 12\gamma \frac{\partial V}{\partial \tau} \right] d\zeta d\zeta, \\ V &= U_3^{(1)} - \frac{w_m^{(2)}}{w_m^{(1)}} U_3^{(2)}, \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} L_1(\xi) &= \frac{1}{2A} \{ [1 - F_1(\varepsilon\xi)]A + F_2(\varepsilon\xi)B - 4F_4(\varepsilon\xi)C \}, & L_2(\xi) &= \frac{1}{A} \{ F_3(\varepsilon\xi)A - F_4(\varepsilon\xi)B - 4F_2(\varepsilon\xi)C \}, \\ F_1(\varepsilon\xi) &= ch\varepsilon\xi \cdot \cos \varepsilon\xi, & F_2(\varepsilon\xi) &= \frac{1}{2} (ch\varepsilon\xi \cdot \sin \varepsilon\xi + sh\varepsilon\xi \cdot \cos \varepsilon\xi), & F_3(\varepsilon\xi) &= \frac{1}{2} sh\varepsilon\xi \cdot \sin \varepsilon\xi, \\ F_4(\varepsilon\xi) &= \frac{1}{4} (ch\varepsilon\xi \cdot \sin \varepsilon\xi - sh\varepsilon\xi \cdot \cos \varepsilon\xi), & \varepsilon &= \delta \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}, & A &= F_2^2(\varepsilon) + 4F_4^2(\varepsilon), \\ B &= 4F_3(\varepsilon)F_4(\varepsilon) + F_1(\varepsilon)F_2(\varepsilon) - F_2(\varepsilon), & C &= F_2(\varepsilon)F_3(\varepsilon) - F_1(\varepsilon)F_4(\varepsilon) + F_4(\varepsilon), & F_i(\varepsilon) &= [F_i(\varepsilon\xi)]_{\xi=1,4}, \\ \alpha &= \frac{d}{d^2 + f^2}, & \gamma &= -\frac{1}{6} \varepsilon^2 \frac{f}{d^2 + f^2}, & d &= 1 + \frac{1}{\varepsilon} (c_1 - c_2), & f &= \frac{1}{\varepsilon} (c_1 + c_2), & c_1 &= -\frac{sh\varepsilon}{ch\varepsilon + \cos \varepsilon}, \\ c_2 &= -\frac{\sin \varepsilon}{ch\varepsilon + \cos \varepsilon}, & \int_0^1 L_1(\xi) d\xi &= \frac{1}{2} d, & \int_0^1 L_2(\xi) d\xi &= \frac{1}{2} f. \end{aligned}$$

Учитывая граничные условия (5) и (6), решение уравнений динамики внешней и внутренней оболочек будем искать в виде:

$$\begin{aligned} u_1^{(i)} &= u_m^{(i)} U_1^{(i)} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ (u_{110}^{(i)} + u_{11}^{(i)}(\tau)) \sin \frac{2k-1}{2} \pi \zeta + (u_{120}^{(i)} + u_{12}^{(i)}(\tau)) \cos k\pi \zeta \right], \\ u_3^{(i)} &= w_m^{(i)} U_3^{(i)} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ (u_{310}^{(i)} + u_{31}^{(i)}(\tau)) \cos \frac{2k-1}{2} \pi \zeta + (u_{320}^{(i)} + u_{32}^{(i)}(\tau)) \sin k\pi \zeta \right], \end{aligned} \tag{14}$$

или соответственно:

$$\begin{aligned} u_1^{(i)} &= \zeta (1 - \zeta^2) (u_{110}^{(i)} + u_{11}^{(i)}) + (1 - \zeta^2)^2 (u_{120}^{(i)} + u_{12}^{(i)}), \\ u_3^{(i)} &= (1 - \zeta^2)^2 (u_{310}^{(i)} + u_{31}^{(i)}) + \zeta (1 - \zeta^2) (u_{320}^{(i)} + u_{32}^{(i)}). \end{aligned} \tag{15}$$

Здесь коэффициенты  $u_{11}^{(i)}$ ,  $u_{12}^{(i)}$ ,  $u_{31}^{(i)}$  и  $u_{32}^{(i)}$  при многочленах по  $\zeta$  являются гармоническими функциями по  $\tau$ , а  $u_{110}^{(i)}$ ,  $u_{120}^{(i)}$ ,  $u_{310}^{(i)}$  и  $u_{320}^{(i)}$  не зависят от  $\tau$

Подставляя (13), (14) и (15) в уравнения динамики оболочек (9) и граничные условия (5), (6) и применяя процедуру метода Бубнова-Галеркина по  $\zeta$ , получим систему алгебраических уравнений, при решении которой находятся выражения для прогибов внутренней и внешней оболочек:

$$\begin{aligned}
 u_{31}^{(1)} &= w_{31}^{(1)} \sin(\tau + \varphi_{u_{31}}^{(1)}) = \frac{1}{2} \frac{B}{|D|} \sqrt{G^2 \left( \left( \frac{G_2}{G} H_1 \right)^2 + \left( H_2 - \frac{G_1}{G} H_1 \right)^2 \right)} \times \\
 &\times \left[ \cos \Theta (p^+ + p^-) + \sin \Theta \frac{d}{dt} (p^+ + p^-) \right], \\
 u_{31}^{(2)} &= w_{31}^{(2)} \sin(\tau + \varphi_{u_{31}}^{(2)}) = \frac{1}{2} \frac{B}{|D|} \sqrt{G^2 (H_1^2 + H_2^2)} \left[ \cos \Psi (p^+ + p^-) + \sin \Psi \frac{d}{dt} (p^+ + p^-) \right], \\
 u_{32}^{(1)} &= w_{32}^{(1)} \sin(\tau + \varphi_{u_{32}}^{(1)}) = \\
 &= \frac{1}{2} \frac{C}{|F|} \sqrt{K^2 \left( \left( \frac{K_2}{K} S_1 \right)^2 + \left( S_2 - \frac{K_1}{K} S_1 \right)^2 \right)} \times \left[ \cos H (p^+ - p^-) + \sin H \frac{d}{dt} (p^+ - p^-) \right], \\
 u_{32}^{(2)} &= w_{32}^{(2)} \sin(\tau + \varphi_{u_{32}}^{(2)}) = \frac{1}{2} \frac{C}{|F|} \sqrt{K^2 (S_1^2 + S_2^2)} \times \left[ \cos \Phi (p^+ - p^-) + \sin \Phi \frac{d}{dt} (p^+ - p^-) \right], \\
 \Psi &= \arctg \frac{H_1}{H_2}, \quad \Theta = \arctg \frac{G_2 \cdot H_1}{G \cdot H_2 - G_1 \cdot H_1}, \quad \Phi = \arctg \frac{S_1}{S_2}, \quad H = \arctg \frac{K_2 \cdot S_1}{K \cdot S_2 - K_1 \cdot S_1}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Таким образом, из прогибов оболочек (16) находятся амплитудные частотные характеристики прогибов оболочек:

$$\begin{aligned}
 A_{31}^{(2)}(\omega) &= \frac{1}{2} \frac{B}{|D|} \sqrt{G^2 (H_1^2 + H_2^2)}, \quad A_{32}^{(2)}(\omega) = \frac{1}{2} \frac{C}{|F|} \sqrt{K^2 (S_1^2 + S_2^2)}, \\
 A_{31}^{(1)}(\omega) &= \frac{1}{2} \frac{B}{|D|} \sqrt{G^2 \left( \left( \frac{G_2}{G} H_1 \right)^2 + \left( H_2 - \frac{G_1}{G} H_1 \right)^2 \right)}, \\
 A_{32}^{(1)}(\omega) &= \frac{1}{2} \frac{C}{|F|} \sqrt{K^2 \left( \left( \frac{K_2}{K} S_1 \right)^2 + \left( S_2 - \frac{K_1}{K} S_1 \right)^2 \right)},
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 G_1 &= 2\varepsilon^2 \alpha B_0^{(2)} R_a^{(1)} - 2\varepsilon^2 \alpha B_0^{(1)} R_a^{(2)} - R_a^{(2)} R_a^{(1)}, \quad G_2 = 2\varepsilon^2 \alpha B_0^{(2)} b_{33}^{(1)} - 2\varepsilon^2 \alpha B_0^{(1)} b_{33}^{(2)} + b_{33}^{(1)} R_a^{(2)}, \\
 G &= 2\varepsilon^2 \alpha B_0^{(2)} b_{33}^{(1)} - 2\varepsilon^2 \alpha B_0^{(1)} b_{33}^{(2)} - b_{33}^{(2)} R_a^{(1)}, \quad R_a^{(1)} = \frac{(a_{13}^{(1)})^2}{a_{11}^{(1)}} + a_{11}^{(1)}, \quad R_a^{(2)} = \frac{(a_{13}^{(2)})^2}{a_{11}^{(2)}} + a_{11}^{(2)}, \\
 A_{1s} &= b_{33}^{(1)} [R_a^{(2)} b_{33}^{(1)} + R_a^{(1)} b_{33}^{(2)}] + de_1 (R_a^{(1)} + 2\varepsilon^2 \alpha B_0^{(1)}), \quad A_{2s} = b_{33}^{(2)} [R_a^{(2)} b_{33}^{(1)} + R_a^{(1)} b_{33}^{(2)}] + 2\varepsilon^2 \alpha B_0^{(2)} de_1, \\
 D &= -de [R_a^{(2)} A_{1s} + R_a^{(1)} A_{2s}], \quad H_1 = G \left[ R_a^{(1)} \frac{(R^{(2)})^2}{(c^{(2)})^2 \rho_0^{(2)} h_0^{(2)}} + R_a^{(2)} \frac{(R^{(1)})^2}{(c^{(1)})^2 \rho_0^{(1)} h_0^{(1)}} \right], \\
 H_2 &= A_{1s} \frac{(R^{(2)})^2}{(c^{(2)})^2 \rho_0^{(2)} h_0^{(2)}} - A_{2s} \frac{(R^{(1)})^2}{(c^{(1)})^2 \rho_0^{(1)} h_0^{(1)}}, \quad R_c^{(1)} = \frac{(c_{13}^{(1)})^2}{c_{11}^{(1)}} + c_{11}^{(1)}, \quad R_c^{(2)} = \frac{(c_{13}^{(2)})^2}{c_{11}^{(2)}} + c_{11}^{(2)}, \\
 K_1 &= 2\varepsilon^2 \alpha B_{00}^{(2)} R_c^{(1)} - 2\varepsilon^2 \alpha B_{00}^{(1)} R_c^{(2)} - R_c^{(2)} R_c^{(1)}, \quad K_2 = 2\varepsilon^2 \alpha B_{00}^{(2)} d_{33}^{(1)} - 2\varepsilon^2 \alpha B_{00}^{(1)} d_{33}^{(2)} + d_{33}^{(1)} R_c^{(2)}, \\
 K &= 2\varepsilon^2 \alpha B_{00}^{(2)} d_{33}^{(1)} - 2\varepsilon^2 \alpha B_{00}^{(1)} d_{33}^{(2)} - d_{33}^{(2)} R_c^{(1)}, \quad C_{1s} = d_{33}^{(1)} [R_c^{(2)} d_{33}^{(1)} + R_c^{(1)} d_{33}^{(2)}] + \det_1 (R_c^{(1)} + 2\varepsilon^2 \alpha B_{00}^{(1)}), \\
 C_{2s} &= d_{33}^{(2)} [R_c^{(2)} d_{33}^{(1)} + R_c^{(1)} d_{33}^{(2)}] + 2\varepsilon^2 \alpha B_{00}^{(2)} \det_1, \quad F = -K [R_c^{(2)} C_{1s} + R_c^{(1)} C_{2s}],
 \end{aligned}$$



$$S_1 = K \left[ R_c^{(1)} \frac{(R^{(2)})^2}{(c^{(2)})^2 \rho_0^{(2)} h_0^{(2)}} + R_c^{(2)} \frac{(R^{(1)})^2}{(c^{(1)})^2 \rho_0^{(1)} h_0^{(1)}} \right], S_2 = C_{1s} \frac{(R^{(2)})^2}{(c^{(2)})^2 \rho_0^{(2)} h_0^{(2)}} - C_{2s} \frac{(R^{(1)})^2}{(c^{(1)})^2 \rho_0^{(1)} h_0^{(1)}}.$$

Для граничных условий (5) выполнены соотношения:

$$B = \frac{4(-1)^{k-1}}{(2k-1)\pi}, a_{11}^{(i)} = -\left(\frac{2k-1}{2}\pi\right)^2 \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^2 + \left(\frac{R^{(i)}\omega}{c^{(i)}}\right)^2, a_{13} = \frac{2k-1}{2}\pi \frac{2R^{(i)}}{l} \mu_0^{(i)}, a_{31}^{(i)} = -a_{13}^{(i)},$$

$$a_{33}^{(i)} = 1 + \left(\frac{2k-1}{2}\pi\right)^4 \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^4 (a_0^{(i)})^2 - \left(\frac{R^{(i)}\omega}{c^{(i)}}\right)^2, b_{33}^{(i)} = -12\gamma B_0^{(i)},$$

$$B_0^{(i)} = -\left(\frac{2k-1}{2}\pi\right)^{-2} \sigma^2 \frac{\rho R_2}{\rho_0^{(i)} h_0^{(i)}} \frac{(R^{(i)})^2 \omega^2}{(c^{(i)})^2 \psi \text{Re}}, C = \frac{2(-1)^{k-1}}{k\pi}, c_{11}^{(i)} = -(k\pi)^2 \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^2 + \left(\frac{R^{(i)}\omega}{c^{(i)}}\right)^2,$$

$$c_{13}^{(i)} = -k\pi \frac{2R^{(i)}}{l} \mu_0^{(i)}, c_{31}^{(i)} = -c_{13}^{(i)}, c_{33}^{(i)} = 1 + (k\pi)^4 \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^4 (a_0^{(i)})^2 - \left(\frac{R^{(i)}\omega}{c^{(i)}}\right)^2, d_{33}^{(i)} = -12\gamma B_{00}^{(i)},$$

$$B_{00}^{(i)} = -\frac{1}{k\pi} \sigma^2 \frac{\rho R_2}{\rho_0^{(i)} h_0^{(i)}} \frac{(R^{(i)})^2 \omega^2}{(c^{(i)})^2 \psi \text{Re}}, u_{320}^{(i)} = 0,$$

$$u_{310}^{(i)} = (-1)^i \frac{(R^{(i)})^2 p_0}{(c^{(i)})^2 \rho_0^{(i)} h_0^{(i)}} \frac{4(-1)^{k-1}}{(2k-1)\pi} \times \left[ 1 - (\mu_0^{(i)})^2 + (a_0^{(i)})^2 \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^4 \left(\frac{2k-1}{2}\pi\right)^4 \right]^{-1},$$

а для граничных условий (6):

$$B = \frac{16}{15}, a_{11}^{(i)} = -\frac{8}{5} \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^2 + \frac{16}{105} \left(\frac{R^{(i)}\omega}{c^{(i)}}\right)^2, a_{13} = \frac{64}{105} \frac{2R^{(i)}}{l} \mu_0^{(i)}, a_{31}^{(i)} = -a_{13}^{(i)},$$

$$a_{33}^{(i)} = \frac{256}{315} + \frac{128}{5} \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^4 (a_0^{(i)})^2 - \frac{256}{315} \left(\frac{R^{(i)}\omega}{c^{(i)}}\right)^2, b_{33}^{(i)} = -12\gamma B_0^{(i)}, B_0^{(i)} = -\frac{41278}{155925} \sigma^2 \frac{\rho R_2}{\rho_0^{(i)} h_0^{(i)}} \frac{(R^{(i)})^2 \omega^2}{(c^{(i)})^2 \psi \text{Re}},$$

$$C = \frac{16}{105}, c_{11}^{(i)} = -\frac{256}{105} \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^2 + \frac{256}{315} \left(\frac{R^{(i)}\omega}{c^{(i)}}\right)^2, c_{13}^{(i)} = -\frac{128}{315} \frac{2R^{(i)}}{l} \mu_0^{(i)}, c_{31}^{(i)} = -c_{13}^{(i)},$$

$$c_{33}^{(i)} = \frac{256}{3465} + \frac{128}{7} \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^4 (a_0^{(i)})^2 - \frac{256}{3465} \left(\frac{R^{(i)}\omega}{c^{(i)}}\right)^2, d_{33}^{(i)} = -12\gamma B_{00}^{(i)},$$

$$B_{00}^{(i)} = -\frac{4871}{405405} \sigma^2 \frac{\rho R_2}{\rho_0^{(i)} h_0^{(i)}} \frac{(R^{(i)})^2 \omega^2}{(c^{(i)})^2 \psi \text{Re}}, u_{320}^{(i)} = 0,$$

$$u_{310}^{(i)} = (-1)^i (R^{(i)})^2 p_0 \times \left[ (c^{(i)})^2 \rho_0^{(i)} h_0^{(i)} \left( \frac{16}{21} - \frac{32}{147} (\mu_0^{(i)})^2 + 24 (a_0^{(i)})^2 \left(\frac{2R^{(i)}}{l}\right)^4 \right) \right]^{-1}.$$

Из формул (17) следует, что в амплитудные частотные характеристики для внешней оболочки входят параметры внутренней оболочки, и наоборот.

Расчеты произведены для двух вариантов с параметрами.

Вариант-1:  $R_2 = 1.775 \cdot 10^{-1}$  м,  $l_2 = 7.82 \cdot 10^{-1}$  м,  $\delta = 2 \cdot 10^{-2}$  м,  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,

$\nu = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $h_0^{(1)} = 1.85 \cdot 10^{-2}$  м,  $E^{(1)} = 1.6 \cdot 10^{11}$  Па,  $\mu_0^{(1)} = 0.25$ ,  $\rho_0^{(1)} = 7.4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $h_0^{(2)} = 9.25 \cdot 10^{-2}$  м,

$E^{(2)} = 6.96 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_0^{(2)} = 3.4 \cdot 10^{-1}$ ,  $\rho_0^{(2)} = 2.7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

В табл. 1, 2 представлены значения резонансных частот, амплитудных частотных характеристик  $A_{31}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{31}^{(2)}(\omega)$ ,  $A_{32}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{32}^{(2)}(\omega)$  для свободного опирания при  $k=1$  для (14)

(I- для стандартного варианта, II – для варианта с  $\nu=10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , III – для варианта с  $\rho=2 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ).

Таблица 1

Значения резонансных частот и амплитудных частотных характеристик  $A_{31}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{31}^{(2)}(\omega)$  в случае свободного опирания

Частота, рад/с	I		II		III	
	$A_{31}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(1)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(1)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(1)}(\omega)$ , м/Па
3.11E+03	–	–	–	–	1.35E-09	7.03E-09
4.36E+03	1.61E-09	8.48E-09	1.61E-10	8.48E-10	–	–
1.92E+04	1.19E-08	1.08E-08	1.19E-09	1.08E-09	1.19E-08	1.13E-08
2.01E+04	3.99E-08	4.09E-08	3.99E-09	4.09E-09	4.04E-08	4.09E-08
3.69E+04	1.58E-08	1.54E-08	1.58E-09	1.54E-09	1.57E-08	1.55E-08

Таблица 2

Значения резонансных частот и амплитудных частотных характеристик  $A_{32}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{32}^{(2)}(\omega)$  в случае свободного опирания

Частота, рад/с	I		II		III	
	$A_{32}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(1)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(1)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(1)}(\omega)$ , м/Па
5.98E+03	–	–	–	–	9.03E-10	5.39E-09
8.19E+03	1.08E-09	6.76E-09	1.08E-10	6.76E-10	–	–
3.22E+04	1.07E-08	9.70E-09	1.07E-09	9.70E-10	1.03E-08	9.82E-09
3.89E+04	4.86E-09	5.62E-09	4.86E-10	5.62E-10	4.88E-09	5.26E-09
4.68E+04	5.08E-09	4.51E-09	5.08E-10	4.51E-10	4.82E-09	4.53E-09

В табл. 3, 4 представлены значения резонансных частот, амплитудных частотных характеристик  $A_{31}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{31}^{(2)}(\omega)$ ,  $A_{32}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{32}^{(2)}(\omega)$  для жесткого защемления (5) (I – для стандартного варианта, II – для варианта с  $\nu=10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , III – для варианта с  $\rho=2 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ).

Из приведенных таблиц следует, что независимо от типа закрепления (жесткого защемления или свободного опирания) внутренней оболочки, значения резонансных частот для  $A_{31}^{(2)}(\omega)$  и  $A_{32}^{(2)}(\omega)$  не совпадают, также как они не равны и для внешней оболочки:  $A_{31}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{32}^{(1)}(\omega)$ .

Резонансные частоты для  $A_{31}^{(2)}(\omega)$  и  $A_{31}^{(1)}(\omega)$  совпадают также как и для  $A_{32}^{(2)}(\omega)$  и  $A_{32}^{(1)}(\omega)$ , т.е. для амплитуд прогибов внутренней и внешней оболочек, что можно объяснить принятой моделью несжимаемой жидкости.

Следует отметить, что тип закрепления для оболочек значительно влияет как на резонансные частоты, так и на значения амплитудной частотной характеристики прогибов оболочек на этих частотах.

Расчеты показали (табл. 1-4), что увеличение плотности жидкости в 2 раза практически не влияет на поведение амплитудной частотной характеристики, в то время как увеличение коэффициента  $\nu$  на 2 порядка резко уменьшает амплитуду на резонансных частотах. При увеличении вязкости жидкости влияние упругости оболочки значительно ослабевает, так как демпфирующие свойства жидкости увеличиваются.

Значения резонансных частот и амплитудных частотных характеристик  $A_{31}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{31}^{(2)}(\omega)$   
в случае жесткого заземления

Частота, рад/с	I		II		III	
	$A_{31}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(1)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(1)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{31}^{(1)}(\omega)$ , м/Па
3.49E+03	–	–	–	–	1.33E-09	7.72E-09
4.88E+03	1.58E-09	9.35E-09	1.58E-10	9.35E-10	–	–
3.47E+04	1.85E-08	1.79E-08	1.85E-09	1.79E-09	1.83E-08	1.80E-08
3.99E+04	4.93E-08	4.97E-08	4.93E-09	4.97E-09	4.93E-08	4.95E-08
4.58E+04	9.88E-09	9.50E-09	9.88E-10	9.50E-10	9.70E-09	9.51E-09

Таблица 4

Значения резонансных частот и амплитудных частотных характеристик  $A_{32}^{(1)}(\omega)$ ,  $A_{32}^{(2)}(\omega)$   
в случае жесткого заземления

Частота, рад/с	I		II		III	
	$A_{32}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(1)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(1)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(2)}(\omega)$ , м/Па	$A_{32}^{(1)}(\omega)$ , м/Па
4.83E+03	–	–	–	–	2.38E-09	1.51E-08
6.68E+03	2.85E-09	1.86E-08	2.85E-10	1.86E-09	–	–
2.11E+04	1.28E-08	9.01E-09	1.28E-09	9.01E-10	1.26E-08	1.07E-08
2.25E+04	5.04E-08	5.39E-08	5.04E-09	5.39E-09	5.20E-08	5.37E-08
3.91E+04	2.33E-08	2.18E-08	2.33E-09	2.18E-09	2.28E-08	2.20E-08

Построенная в данной работе модель упругой цилиндрической трубы кольцевого профиля позволила определить резонансные частоты для внутренней и внешней оболочек и значения прогибов этих оболочек на резонансных частотах, возникающих при пульсации жидкости.

Изменением размеров и типа закрепления оболочек можно сместить резонансные частоты внутренней и внешней оболочек цилиндрической трубы кольцевого профиля в необходимый диапазон частот, в котором не возникает кавитация, а также увеличить или уменьшить величины прогибов на резонансных частотах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-01-00177-а.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Громека И.С. К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубках. М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 149-171.
2. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гостехиздат, 1955. 520 с.
3. Ильгамов М.А. Введение в нелинейную гидроупругость. М.: Наука, 1991. 200 с.
4. Womersley J. R.: Oscillatory motion of a viscous liquid in a thin-walled elastic tube — I: The linear approximation for long waves. Phil. Mag.46, 1955. P. 199–221.
5. Кондратов Д.В., Могилевич Л.И. Математическое моделирование процессов взаимодействия двух цилиндрических оболочек со слоем жидкости между ними при отсутствии торцевого истечения в условия вибрации // Вестник СГТУ. 2007. №3(27). Выпуск 2. С. 15–23.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
7. Кондратов Д.В., Могилевич Л.И. Упругогидродинамика машин и приборов на транспорте. М.: РГОТУПС, 2007. 169 с.

8. Горшков А.Г., Морозов В.И., Пономарев А.Т., Шклярчук Ф.Н. Аэрогидроупругость конструкций. М.: Физматлит, 2000. 591 с.

9. Гольденвейзер А.Л., Лидский В.В., Товстик П.Е. Свободные колебания тонких упругих оболочек М.: Наука, 1978. 383 с.

**Кондратова Юлия Николаевна** –  
аспирант кафедры «Теоретическая механика»  
Саратовского государственного технического  
университета

**Kondratova Julia Nikolaevna** –  
Post-graduate Student of the Department  
“Theoretical Mechanics”, Saratov State  
Technical University

*Статья поступила в редакцию 22.01.2011 , принята к опубликованию 20.08.2011*

**А.В. Анкилов, П.А. Вельмисов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ**

*Исследуется динамика и устойчивость упругого элемента конструкции в виде пластины-полосы при обтекании ее сверхзвуковым потоком идеального газа. На основе построенного функционала получены достаточные условия асимптотической устойчивости решений дифференциального уравнения с частными производными, описывающего динамику пластины.*

Аэроупругость, математическое моделирование, динамика, устойчивость, пластина, сверхзвуковой поток газа, дифференциальное уравнение, функционал

**A.V. Ankilov, P.A. Vel'misov**

## **INVESTIGATION OF DYNAMIC AND STABILITY OF ELASTIC ELEMENT OF CONSTRUCTION IN SUPERSONIC FLOW**

*The dynamic and stability of elastic element of a construction in the form of a plate with its flowing by supersonic flow of ideal gas is investigated. On the base of the built functional the sufficient conditions of asymptotic stability of the solution of the partial differential equation describing the plate dynamic are obtained.*

Aeroelasticity, mathematical modelling, dynamics, stability, plate, supersonic flow of gas, differential equation, functional

### **1. Введение**

При проектировании конструкций, приборов, устройств, аппаратов, систем и т. д. различного назначения, находящихся во взаимодействии с газожидкостной средой, необходимо решать задачи, связанные с исследованием устойчивости упругих элементов, требуемой для их функционирования и надежности эксплуатации.

В работе исследуется динамика и динамическая устойчивость упругой пластины при обтекании ее сверхзвуковым потоком идеального газа (жидкости). Определение устойчивости упругого тела соответствует концепции устойчивости динамических систем по Ляпунову. Аэродинамическое давление на пластину определяется согласно «поршневой» теории А.А. Ильюшина. На основе построения функционала, соответствующего дифференциальному уравнению в частных производных, описывающему поперечные колебания пластины-полосы, получены достаточные условия устойчивости решений этого уравнения.

Подобные задачи по исследованию динамической устойчивости, но при дозвуковом режиме обтекания, рассматривались в [1] – [7]. Кроме того, отличием от ранее полученных результатов является то, что в данной работе предложен функционал, позволяющий получить условия **асимптотической** устойчивости.

### **2. Математическая модель**

Рассмотрим модельное уравнение, описывающее поперечные колебания упругой пластины-полосы при обтекании ее сверхзвуковым потоком газа (рис. 1):

$$L(w) \equiv M\ddot{w} + Dw'''' + Nw'' + \alpha(\dot{w} + Vw') = 0, \quad x \in (0, l). \quad (1)$$

Здесь  $w(x, t)$  – прогиб пластины;  $x$  – продольная координата,  $t$  – время;  $M$ ,  $D$  – погонная масса и изгибная жесткость пластины;  $N$  – сжимающее ( $N > 0$ ) или растягивающее ( $N < 0$ ) продольное усилие;  $\alpha = \alpha_0 \rho_0 a_0 = const > 0$ , где  $\rho_0, a_0$  – плотность газа и скорость звука в однородном невозмущенном потоке ( $\alpha_0 = 1$  при одностороннем обтекании,  $\alpha_0 = 2$  при двустороннем обтекании);  $V$  – скорость набегающего однородного потока; штрих обозначает производную по координате  $x$ , точка – производную по времени  $t$ .

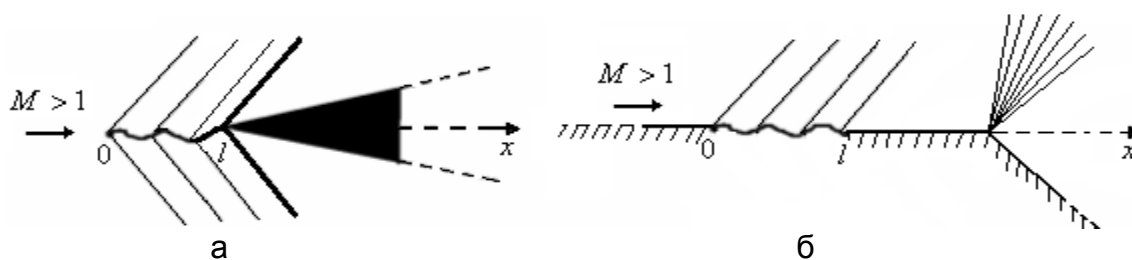


Рис. 1. Примеры обтекания конструкций с упругим элементом сверхзвуковым потоком газа:  
 а) двустороннее обтекание рассекателя с образованием ударной волны;  
 б) одностороннее обтекание защитного экрана с образованием волны разрежения

Аэродинамическая нагрузка определяется выражением  $F = \alpha(\dot{w} + Vw')$ , справедливым при достаточно больших скоростях сверхзвукового потока  $V$ . Выражение для  $F$  получено с помощью решения соответствующей линейной нестационарной аэродинамической задачи на основе преобразования Лапласа при больших числах Маха  $M = V/a_0$  (что согласуется с гипотезой плоских сечений Ильюшина А.А.).

### 3. Исследование асимптотической устойчивости

Введем в рассмотрение функционал:

$$J(t) = \frac{1}{2} e^{2\gamma t} \int_0^l \{ M\dot{w}^2 + 2M\theta w\dot{w} + \alpha\theta w^2 + Dw''^2 - Nw'^2 \} dx, \quad (2)$$

где  $\gamma, \theta$  – некоторые постоянные положительные параметры.

Пусть граничные условия имеют вид:

	1	2	3	4
$x = 0:$	ж	ж	ш	ш
$x = l:$	ж	ш	ж	ш

(3)

Здесь приняты следующие обозначения: "ж" – жесткое защемление ( $w = 0, w' = 0$ ); "ш" – шарнирное закрепление ( $w = 0, w'' = 0$ ).

Для производной  $\dot{J}(t)$  согласно (1) – (3) имеет место оценка:

$$\dot{J}(t) = -e^{2\gamma t} \int_0^l \{ [\alpha - M(\theta + \gamma)]\dot{w}^2 + D(\theta - \gamma)w''^2 + \alpha V\dot{w}w' - 2M\theta\gamma w\dot{w} - N(\theta - \gamma)w'^2 \} dx. \quad (4)$$

Проведем оценки для функционала и его производной с учетом граничных условий (3). Используя неравенства Рэлея [8] и Коши-Буняковского, получим:

$$\int_0^l w''^2(x,t)dx \geq \lambda_1 \int_0^l w'^2(x,t)dx, \quad w^2(x,t) \leq l \int_0^l w'^2(x,t)dx, \quad \int_0^l w'^2(x,t)dx \geq \eta_1 \int_0^l w^2(x,t)dx, \quad (5)$$

где  $\lambda_1, \eta_1$  – наименьшие собственные значения краевых задач  $\varphi'''' = -\lambda\varphi''$ ,  $\varphi'' = -\eta\varphi$  с крайвыми условиями (3).

Оценим  $J(t)$  с помощью (5) следующим образом:

$$\begin{aligned} J(t) &\geq \frac{1}{2} e^{2\gamma t} \int_0^l \{M\dot{w}^2 + 2M\theta w\dot{w} + \alpha\theta w^2 + (\lambda_1 D - N)w'^2\} dx = \\ &= \frac{1}{2} e^{2\gamma t} \int_0^l \{M\dot{w}^2 + 2M\theta w\dot{w} + \alpha\theta w^2 + \psi(\lambda_1 D - N)w'^2 + (1-\psi)(\lambda_1 D - N)w'^2\} dx \geq \quad (6) \\ &\geq \frac{(1-\psi)}{2l} (\lambda_1 D - N)w^2(x,t) + \frac{1}{2} \int_0^l \{M\dot{w}^2 + 2M\theta w\dot{w} + [\alpha\theta + \psi\eta_1(\lambda_1 D - N)]w^2\} dx, \end{aligned}$$

где  $\psi \in (0,1)$  – некоторая постоянная величина.

При выводе (6) было сделано предположение:

$$\lambda_1 D - N > 0. \quad (7)$$

Квадратичная форма в (6) будет положительно определенной при выполнении неравенства

$$\alpha\theta + \psi\eta_1(\lambda_1 D - N) \geq M\theta^2. \quad (8)$$

Если выполняется условие:

$$\alpha \geq M\theta, \quad (9)$$

то можно положить  $\psi = 0$ , иначе положим:

$$\psi = \frac{M\theta^2 - \alpha\theta}{\eta_1[\lambda_1 D - N]},$$

и неравенство (8) запишется в виде:

$$\alpha < M\theta, \quad \frac{M\theta^2 - \alpha\theta}{\eta_1(\lambda_1 D - N)} \in (0,1). \quad (10)$$

Тогда при выполнении условия (9) или (10) окончательно получим:

$$J(t) \geq \frac{(1-\psi)}{2l} e^{2\gamma t} (\lambda_1 D - N)w^2(x,t). \quad (11)$$

Аналогично, учитывая (4), для  $\dot{J}(t)$  получим:

$$\dot{J}(t) \leq -e^{2\gamma t} \int_0^l \{[\alpha - M(\theta + \gamma)]\dot{w}^2 + (\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma)w'^2 + \alpha V\dot{w}w' - 2M\theta\gamma w\dot{w}\} dx. \quad (12)$$

Неравенство (12) справедливо при условии

$$\theta - \gamma > 0. \quad (13)$$

Пусть выполнены неравенства (7), (13), тогда из (12) получим:

$$\begin{aligned} \dot{J}(t) &\leq -e^{2\gamma t} \int_0^l \{[\alpha - M(\theta + \gamma)]\dot{w}^2 + \chi(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma)w'^2 + \\ &+ (1-\chi)\eta_1(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma)w^2 + \alpha V\dot{w}w' - 2M\theta\gamma w\dot{w}\} dx, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\chi$  – некоторая постоянная величина.

Квадратичная форма относительно  $\dot{w}$ ,  $w'$ ,  $w$  в (14) будет положительно определенной,

если выполняются условия:

$$\alpha - M(\theta + \gamma) > 0, \quad \chi(\alpha - M(\theta + \gamma))(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma) - \frac{\alpha^2 V^2}{4} > 0, \quad (15)$$

$$\chi(1 - \chi)(\alpha - M(\theta + \gamma))(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma) - \frac{\alpha^2 V^2}{4}(1 - \chi) - M^2 \theta^2 \gamma^2 \chi > 0.$$

Рассмотрим функцию:

$$F(\chi) = \chi(1 - \chi)(\alpha - M(\theta + \gamma))(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma) - \frac{\alpha^2 V^2}{4}(1 - \chi) - M^2 \theta^2 \gamma^2 \chi.$$

Найдем точку максимума функции  $F(\chi)$ :

$$\chi = \frac{(\alpha - M(\theta + \gamma))(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma) + \frac{\alpha^2 V^2}{4} - M^2 \theta^2 \gamma^2}{2(\alpha - M(\theta + \gamma))(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma)}. \quad (16)$$

При найденном значении  $\chi$  система неравенств (15) принимает вид:

$$\alpha - M(\theta + \gamma) > 0, \quad (\alpha - M(\theta + \gamma))(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma) > \frac{\alpha^2 V^2}{4} + M^2 \theta^2 \gamma^2,$$

$$(\alpha - M(\theta + \gamma))^2 (\lambda_1 D - N)^2 (\theta - \gamma)^2 + \frac{\alpha^4 V^4}{16} + M^4 \theta^4 \gamma^4 > \frac{\alpha^2 V^2}{2} M^2 \theta^2 \gamma^2 +$$

$$+ (\alpha - M(\theta + \gamma))(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma) \frac{\alpha^2 V^2}{2} + 2(\alpha - M(\theta + \gamma))(\lambda_1 D - N)(\theta - \gamma) M^2 \theta^2 \gamma^2. \quad (17)$$

При выполнении этих условий  $\chi \in (0,1)$  и квадратичная форма относительно  $\dot{w}, w', w$  в (14) будет положительно определенной.

Тогда  $J(t) \geq 0, \dot{J}(t) \leq 0, J(t) \leq J(0)$ , и следовательно:

$$\frac{(1-\psi)}{2l} e^{-2\gamma t} [\lambda_1 D - N] w^2(x, t) \leq J(t) \leq J(0). \quad (18)$$

Оценим  $J(0)$ :

$$J(0) = \frac{1}{2} \int_0^l \{ M \dot{w}_0^2 + 2M\theta w_0 \dot{w}_0 + \alpha \theta w_0^2 + D w_0''^2 - N w_0'^2 \} dx \leq$$

$$\leq \frac{1}{2} \int_0^l \{ M(1+\theta) \dot{w}_0^2 + (\eta_1^{-1} \lambda_1^{-1} (\alpha + M) \theta + D + \lambda_1^{-1} |N|) w_0''^2 \} dx, \quad (19)$$

где  $w_0 = w(x,0), \dot{w}_0 = \dot{w}(x,0), w_0' = w'(x,0), w_0'' = w''(x,0)$ .

Если выполняется условие (9), то из (18), (19) получим неравенство:

$$w^2(x, t) \leq \frac{l}{\lambda_1 D - N} e^{-2\gamma t} \int_0^l \{ M(1+\theta) \dot{w}_0^2 + (\eta_1^{-1} \lambda_1^{-1} (\alpha + M) \theta + D + \lambda_1^{-1} |N|) w_0''^2 \} dx, \quad (20)$$

из которого следует теорема:

**Теорема 1.** Пусть выполнены условия (7), (9), (13) и (17). Тогда решения уравнения (1) будут асимптотически устойчивы, если  $w(x,t)$  удовлетворяет краевым условиям (3).

Если выполняется условие (10), то из (18), (19) получим неравенство:



$$w^2(x,t) \leq \frac{l\eta_1}{([\lambda_1 D - N] - \eta_1 [M\theta^2 - \alpha\theta])} e^{-2\gamma t} \times \int_0^l \{M(1+\theta)\dot{w}_0^2 + (\eta_1^{-1}\lambda_1^{-1}(\alpha+M)\theta + D + \lambda_1^{-1}|N|)w_0^{\prime 2}\} dx, \quad (21)$$

из которого следует теорема:

**Теорема 2.** Пусть выполнены условия (7), (10), (13) и (17). Тогда решения уравнения (1) будут асимптотически устойчивы, если  $w(x,t)$  удовлетворяет краевым условиям (3).

Таким образом, применение теорем 1 или 2 состоит в отыскании таких постоянных величин  $\theta > 0, \gamma > 0$ , чтобы выполнялись системы неравенств (7), (9), (13) и (17) или (7), (10), (13) и (17).

Для примера рассмотрим двустороннее обтекание ( $\alpha_0 = 2$ ) алюминиевой пластины ( $E = 7 \cdot 10^{10}, \rho_{ал} = 8480, \nu = 0,31$ ) толщиной  $h = 0,01$  и длиной  $l = 1$  потоком идеального газа ( $\rho_0 = 1, a_0 = 331$ ) со скоростью  $V = 400$ . Тогда коэффициенты уравнения (1) равны:

$$M = \rho_{ал} h = 84,8; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = 6453,5; \quad \alpha = \alpha_0 \rho_0 a_0 = 662.$$

Рассмотрим случай шарнирно закрепленных концов пластины, тогда:

$$\eta_1 = \lambda_1 = \frac{\pi^2}{l^2} \approx 9,87.$$

Все значения приведены в системе СИ.

Найдем значения усилия  $N$ , при которых выполняются условия теоремы 1. Подставим найденные коэффициенты в систему неравенств (7), (9), (13) и (17):

$$N < 63696; \quad \theta \leq 7,8; \quad \theta - \gamma > 0; \quad \theta + \gamma < 7,8; \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & (662 - 84,8(\theta + \gamma))(63696 - N)(\theta - \gamma) > 1,753 \cdot 10^{10} + 7191 \cdot \theta^2 \gamma^2 \\ & (662 - 84,8(\theta + \gamma))^2 (63696 - N)^2 (\theta - \gamma)^2 + 3,073 \cdot 10^{20} + 5,171 \cdot 10^7 \theta^4 \gamma^4 > \\ & > 2,521 \cdot 10^{14} \theta^2 \gamma^2 + 3,506 \cdot 10^{10} (662 - 84,8(\theta + \gamma))(63696 - N)(\theta - \gamma) + \\ & + 14382(662 - 84,8(\theta + \gamma))(63696 - N)(\theta - \gamma)\theta^2 \gamma^2. \end{aligned} \quad (23)$$

Неравенства (22) задают ограничения на значения параметров  $N, \theta, \gamma$ , а неравенства (23) служат для определения усилия  $N$  при конкретных значениях  $\theta, \gamma$ . Например, возьмем точку  $(7,7; 0,05)$  из треугольника решений на плоскости  $(\theta, \gamma)$ , тогда первое неравенство (23) примет вид:

$$N < -4,773 \cdot 10^8, \quad (24)$$

а второе неравенство выполняется при любых  $N$ .

**Замечание.** Параметр  $\gamma$  отвечает за скорость затухания колебаний. Чем  $N$  меньше, тем  $\gamma$  можно взять больше и тем самым решение  $w(x,t)$  быстрее стремится к нулю при увеличении  $t$ . Например, если возьмем точку  $(4; 3,7)$  из треугольника решений на плоскости  $(\theta, \gamma)$ , то первое неравенство (23) примет вид:

$$N < -6,464 \cdot 10^9, \quad (25)$$

а второе неравенство выполняется при любых  $N$ .

#### 4. Исследование динамики и проведение численного эксперимента

Исследование устойчивости можно осуществить на основе численного эксперимента.

При этом, в отличие от условий, полученных на основе функционала, которые являются только достаточными, можно на плоскости  $(N, V)$  построить приближенно область, соответствующую необходимому и достаточному условию устойчивости. В связи с этим рассмотрим один из возможных методов решения уравнения (1).

Решение уравнения (1) будем искать методом Галеркина, подчинив искомую функцию  $w(x, t)$  краевым условиям (3).

Зададим также начальные условия:

$$w(x, 0) = f_1(x), \quad \dot{w}(x, 0) = f_2(x), \quad (26)$$

которые должны быть согласованы с краевыми условиями.

Согласно методу Галеркина решение уравнения (1) ищется в виде:

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^n a_k(t) g_k(x), \quad (27)$$

где  $g_k(x)$  – базисные функции, подобранные так, чтобы выполнялись заданные краевые условия, а уравнения для функций  $a_k(t)$  определяются из условия ортогональности невязки уравнения ко всем базисным функциям.

В качестве базисных возьмем функции:

$$g_k(x) = A_k \cos \gamma_k x + B_k \sin \gamma_k x + C_k \operatorname{ch} \gamma_k x + D_k \operatorname{sh} \gamma_k x, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (28)$$

Коэффициенты  $A_k, B_k, C_k, D_k$  и параметр  $\gamma_k$  выберем так, чтобы на каждом из концов отрезка  $[0, l]$  выполнялось одно из следующих условий:

$$1) g_k(x) = g'_k(x) = 0; \quad 2) g_k(x) = g''_k(x) = 0; \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (29)$$

Тогда функция  $w(x, t)$  в виде (27) будет удовлетворять условиям (3). Заметим, что  $\gamma_k$  и  $g_k(x)$  – собственные значения и собственные функции краевой задачи

$$g^{IV}(x) = \gamma^4 g(x) \quad (30)$$

с граничными условиями (29). Задача (30), (29) – самосопряженная и полностью определенная, следовательно, система функций  $\{g_k(x)\}_{k=1}^{\infty}$  ортогональна на  $[0, l]$ . В этом случае, согласно теореме о разложении, любую функцию  $U(x)$ , четырехкратно непрерывно дифференцируемую в  $(0, l)$  и удовлетворяющую соответствующим краевым условиям,

можно разложить в ряд  $U(x) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k g_k(x)$ , абсолютно и равномерно сходящийся в  $(0, l)$ .

Условия ортогональности невязки уравнения (1) к базисным функциям  $\{g_m(x)\}_{m=1}^n$  позволяют записать систему  $n$  уравнений для  $a_m(t)$ :

$$\left[ D \gamma_m^4 a_m(t) + M a_m''(t) + \alpha a_m'(t) \right] \int_0^l g_m^2(x) dx + \sum_{k=1}^n a_k(t) \left( N \int_0^l g_k''(x) g_m(x) dx + \alpha V \int_0^l g_k'(x) g_m(x) dx \right) = 0. \quad (31)$$

Условия ортогональности невязки начальных условий (26) к базисным функциям позволяют найти начальные значения  $a_m(0), a'_m(0)$ :

$$a_m(0) = \frac{1}{\delta_m} \int_0^l f_1(x) g_m(x) dx, \quad a'_m(0) = \frac{1}{\delta_m} \int_0^l f_2(x) g_m(x) dx. \quad (32)$$

Таким образом, получили задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (31) с начальными условиями (32).

Рассмотрим приведенный в третьем пункте пример механической системы. Для

случая шарнирно закрепленных концов пластины с помощью математической системы Mathematica для данных значений параметров получим графики функции  $w_n(x,t) = \sum_{k=1}^n a_k(t) \sin \gamma_k x$ ,  $\gamma_k = \frac{k\pi}{l}$  при  $x_* = l/4, t \geq 0$  и  $x_* \in [0, l], t = t_0$  при различных значениях  $n, N$  (рис. 2 – 5). Зададим начальные условия:  $w(x,0) = 0,001 \cdot \sin(2\pi x/l)$ ,  $\dot{w}(x,0) = -0,015 \cdot \sin(2\pi x/l)$ .

**Вариант 1:**  $N = 1000; V = 400; h = 0,011 \Rightarrow M = 93,28; D = 8589,63$ .

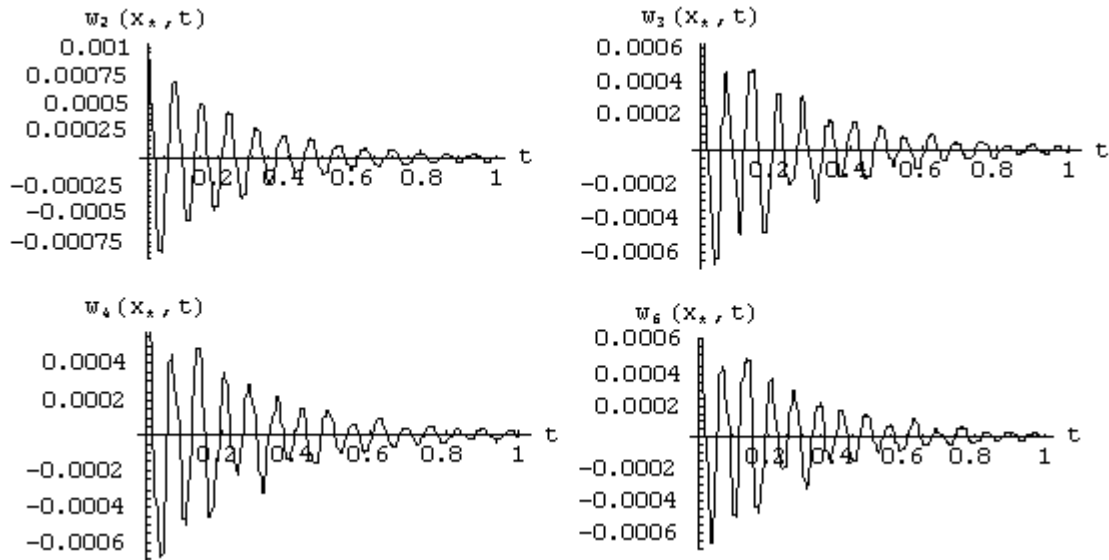


Рис. 2. Деформация пластины в точке  $x_* = l/4$  при  $n = 2,3,4,6$

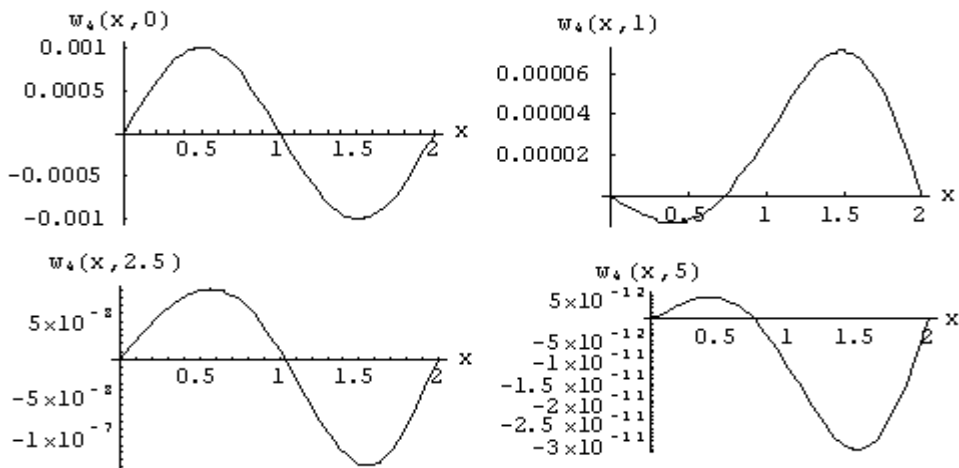


Рис. 3. Прогиб пластины в различные моменты времени

Обсудим вопрос о сходимости приближений.

Рассмотрим графики коэффициентов  $a_1(t), a_2(t), a_3(t), a_4(t)$  четвертого приближения (рис. 4), разницу между приближениями (рис. 5).

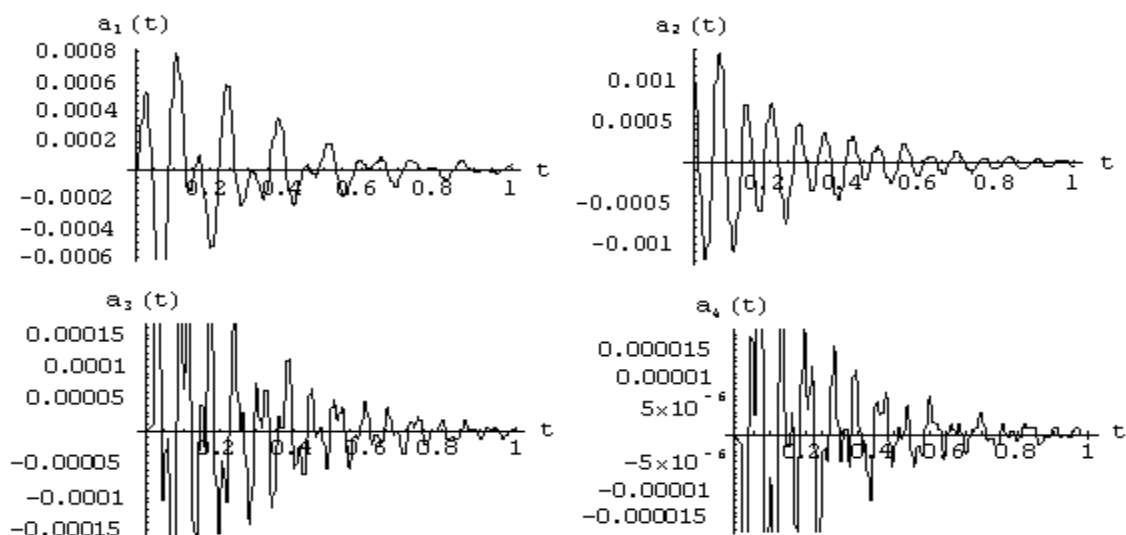


Рис. 4. Графики функций  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$ ,  $a_3(t)$ ,  $a_4(t)$

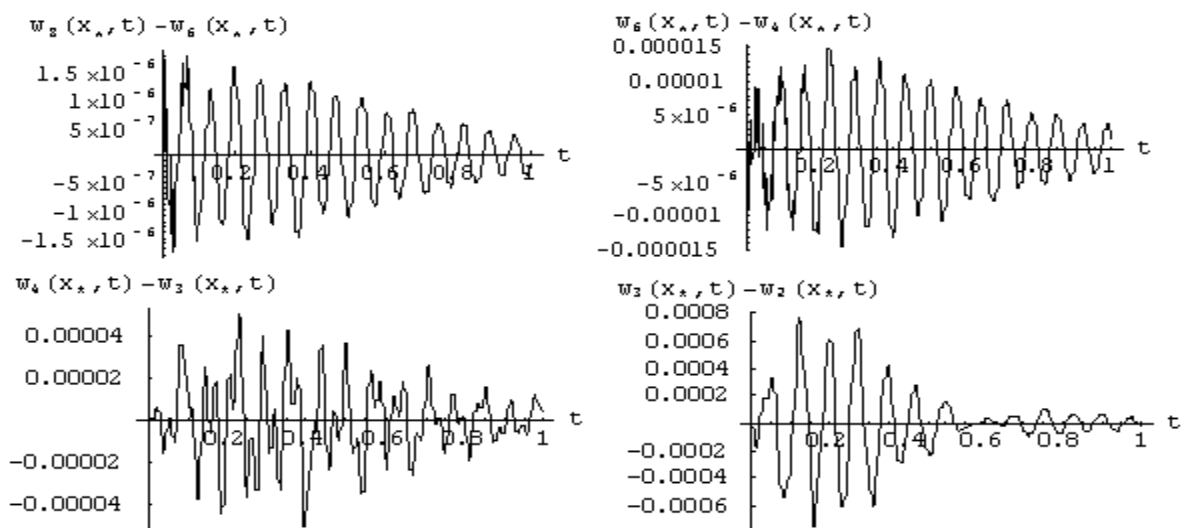


Рис. 5. Разница между приближениями

Как видно из рис. 4, начиная со третьего коэффициента, значения амплитуд для  $a_3(t)$ ,  $a_4(t)$  уменьшаются на порядок. Это связано с тем, что начальные условия задаются второй гармоникой  $\sin(2\pi x/l)$ .

**Вариант 2:**  $N = 1000; V = 400; h = 0,097 \Rightarrow M = 82,256; D = 5889,95$ .

Как следует из рис. 2, 6, решение уравнения (1) в первом случае асимптотически устойчиво, а во втором случае неустойчиво.

Аналогичные исследования динамики пластин можно провести и в случае одностороннего обтекания. Так же можно исследовать динамику в случае других типов закрепления концов упругих пластин.

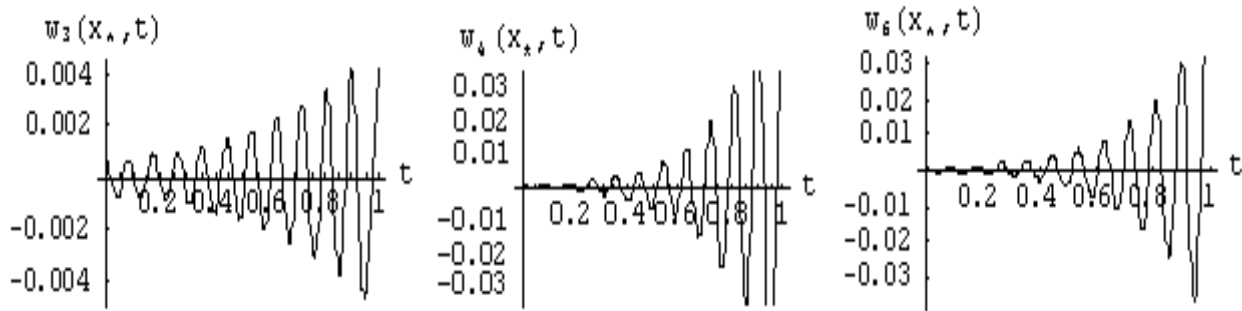


Рис. 6. Деформация пластины в точке  $x_* = l/4$  при  $n = 3, 4, 6$

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013г.г.), ГК №П1122, а также при финансовой поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Минобрнауки РФ (проект 2.1.1/6194).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вельмисов П. А., Решетников Ю. А. Устойчивость вязкоупругих пластин при аэрогидродинамическом воздействии. Саратов: изд-во СГУ, 1994. 176 с.
2. Анкилов А. В., Вельмисов П. А. Устойчивость вязкоупругих элементов стенок проточных каналов. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 115 с.
3. Анкилов А. В., Вельмисов П. А., Горбоконенко В. Д., Покладова Ю. В. Математическое моделирование механической системы «трубопровод – датчик давления». Ульяновск: УлГТУ, 2008. 188 с.
4. Анкилов А. В., Вельмисов П. А., Покладова Ю. В. Математические модели механической системы "трубопровод - датчик давления". Вестник Саратовского государственного технического университета. Саратов, 2007. №3(27). Вып. 2. С. 7-14.
5. Анкилов А.В., Вельмисов П.А. Математическое моделирование динамики и устойчивости упругих элементов крыла. Вестник Саратовского государственного технического университета. Саратов, 2009. №1(37). Вып. 1. С. 7-16.
6. Анкилов А. В., Вельмисов П. А. Устойчивость решений некоторых классов интегро-дифференциальных уравнений в частных производных. Вестник Самарского государственного университета. Самара, 2008. №8/1(67). С. 331-344.
7. Анкилов А. В., Вельмисов П. А., Семенова Е. П. Исследование динамической устойчивости упругих элементов стенок канала. Вестник Саратовского государственного технического университета. Саратов, 2009. №2(38). Вып. 1. С. 7-17.
8. Коллатц Л. Задачи на собственные значения. М.: Наука, 1968. 503 с.

**Анкилов Андрей Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Ульяновского государственного технического университета

**Ankilov Andrey Vladimirovich** – Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor of the Department “Higher Mathematics”, Ulyanovsk State Technical University

**Вельмисов Петр Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» Ульяновского государственного технического университета

**Velmisov Petr Alexandrovich** – Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor, Head of the Department “Higher Mathematics”, Ulyanovsk State Technical University

*Статья поступила в редакцию 07.03.2011, принята к опубликованию 20.08.2011*

УДК 621.382.2

**Е.В. Мазеев, М.А. Фурсаев**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА  
С ВАРАКТОРНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*Рассмотрен алгоритм проектирования СВЧ-генератора с варакторной перестройкой частоты на биполярном транзисторе, позволяющий прогнозировать уровень выходной мощности и ее изменение в диапазоне перестройки. Алгоритм предусматривает определение структуры колебательной системы и значения параметров ее элементов, а также частотную зависимость проводимости цепи на выходе транзистора, обеспечивающих требуемый диапазон перестройки.*

СВЧ-генератор, перестройка частоты, биполярный транзистор, варактор, колебательная система, выходная мощность

**E.V. Maseev, M.A. Fursaev**

**THE MODELING OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF MICROWAVE  
TRANSISTOR OSCILLATOR WITH A VARACTOR FREQUENCY TUNING**

*The algorithm for the design of microwave bipolar transistor oscillator with varactor frequency tuning was considered. The algorithm allows predicting the level of output power and its variation in the tuning range. The algorithm determine the structure of the oscillating system, the elements parameter values and the frequency dependence of the conductivity of the circuit at the transistor output which provide the required tuning range.*

Microwave generator, frequency agility, bipolar transistor, varactor, oscillating system, the power output

**1. Введение**

Перестройка частоты СВЧ транзисторных генераторов, как правило, осуществляется с помощью варактора, вводимого в колебательную систему [1]. При изменении напряжения, подводимого к варактору, изменяется резонансная частота этой системы, а следовательно, и генерируемая частота. Такие генераторы строятся по схеме с внутренней обратной связью, в которых колебательная система подключается к входу транзистора, а к его выходу – выходной трансформатор связи, через который генерируемая мощность выводится в нагрузку.

При проектировании СВЧ транзисторных генераторов с перестройкой частоты в первую очередь определяются частотные зависимости проводимостей колебательной системы и цепи на выходе транзистора, при которых обеспечивается необходимый диапазон перестройки частоты. Эти зависимости являются исходными данными для проектирования колебательной системы и выходного трансформатора связи. В [2-4] при определении частотных зависимостей проводимости колебательной системы и цепи на выходе транзистора использовалась его линейная модель, что не позволяет при проектировании провести оценку выходной мощности генератора.

В данной работе рассматривается алгоритм проектирования СВЧ генератора с варакторной перестройкой частоты на биполярном транзисторе, использующий нелинейную модель этого прибора. Такой подход дает возможность провести моделирование электрических характеристик генератора, в том числе определить уровень выходной мощности и его изменение в диапазоне перестройки при неизменных значениях параметров элементов цепи постоянного тока и изменении напряжения, подводимого к варактору.

## 2. Исходные положения моделирования СВЧ транзисторного генератора с перестройкой частоты

Проектирование СВЧ транзисторного генератора с перестройкой частоты базируется на модели, в основу которой положено его представление в виде параллельного соединения двух двухполюсников: пассивного и активного. В соответствии с [5] пассивным двухполюсником является колебательная система, а активным – вход транзистора, что позволяет записать условие стационарного режима генератора как

$$\underline{Y}_{\text{КС}} + \underline{Y}_{\text{ВХ}} = 0,$$

где  $\underline{Y}_{\text{КС}}$  – проводимость колебательной системы,

$\underline{Y}_{\text{ВХ}}$  – входная проводимость транзистора.

Вместе с изменением резонансной частоты колебательной системы, обусловленным изменением подводимого к варактору напряжения, изменяется и величина проводимости этой системы, что позволяет говорить о ее частотной зависимости, при которой достигается перестройка генерируемой частоты. Условие стационарного режима генератора должно выполняться на всех частотах диапазона перестройки. Величина входной проводимости транзистора, работающего в составе генератора с перестройкой частоты, должна характеризоваться частотной зависимостью, соответствующей частотной зависимости проводимости колебательной системы.

Входная проводимость транзистора является функцией как проводимости нагрузки на его выходе, зависящей от частоты, так и режима работы прибора, который определяется значениями параметров элементов цепи постоянного тока, в том числе напряжения источников постоянного питания. Определение зависимости величины входной проводимости транзистора от значений параметров элементов цепи постоянного тока, если предполагается прогнозирование уровня выходной мощности, должно проводиться на базе нелинейной модели прибора.

Моделирование СВЧ-генератора с перестройкой частоты ниже рассматривается в предположении его построения на биполярном транзисторе типа КТ919А, включенном по схеме ОБ и работающем в недонапряженном режиме с отсечкой тока. Расчет параметров транзистора проводится с использованием кусочно-квазилинейной модели, отражающей основные нелинейные свойства прибора в этом режиме [6].

## 3. Этапы проектирования СВЧ генератора с перестройкой частоты

На первом этапе проектирования определяется режим работы транзистора на одной из частот диапазона перестройки, обеспечивающий задаваемые величины выходной мощности и напряжение источника постоянного питания. При этом, по предложенной в [5] методике, в качестве исходного выбран его электрический режим работы на частоте 1 ГГц со следующими значениями параметров:

- проводимость цепи на выходе транзистора  $\underline{Y}_{\text{Н}} = 0,0165 - j0,14 \text{ См}$ ;
- входная проводимость транзистора  $\underline{Y}_{\text{ВХ}} = - 0,0198 - j0,182 \text{ См}$ ;
- напряжение источника постоянного питания  $E_{\text{К}} = 19,5 \text{ В}$ ;

- напряжение источника смещения в эмиттерной цепи постоянного тока  $U_{см} = 3,98$  В;
- сопротивление резистора смещения в этой цепи  $R_{см} = 5$  Ом;
- выходная мощность  $P_{вых} = 5,5$  Вт.

На втором этапе проектирования определяются состав и топология колебательной системы, а также частотная зависимость ее проводимости, при которых обеспечивается практическая реализация этой системы. Исходными данными на втором этапе являются значения частоты и соответствующая ее проводимость колебательной системы. Согласно условию (1), значение этой проводимости на частоте 1 ГГц равно  $0,0198 + j0,182$  См.

Предполагается, что в генераторе используется колебательная система, в которой короткозамкнутый отрезок микрополосковой линии, варактор и резистор соединены параллельно. При расчете параметров элементов этой системы полагалось, что варактор представляется в виде последовательно соединенных емкости и резистора, учитывающего сопротивление полупроводникового материала и контактов [7]. При предположении, что сопротивление этого резистора равно 0,15 Ом, величина емкости варактора –  $40 \cdot 10^{-12}$  Ф, сопротивление резистора колебательной системы – 96 Ом. Отрезок микрополосковой линии, выполненной на поликоровой подложке, имеет ширину 16 мм, длину – 18,6 мм.

Для расчета частотной зависимости проводимости колебательной системы необходимо выбрать соответствие между емкостью варактора и частотой. Это соответствие в рассматриваемом примере определяется зависимостью

$$C_B(\pi\Phi) = 90 - 50f(\text{ГГц}),$$

с учетом которой получают частотные зависимости активной и реактивной проводимости колебательной системы, приведенные на рис. 1. Необходимо иметь в виду, что при выбранном соответствии между емкостью варактора и частотой активная проводимость колебательной системы в диапазоне перестройки должна быть положительной величиной.

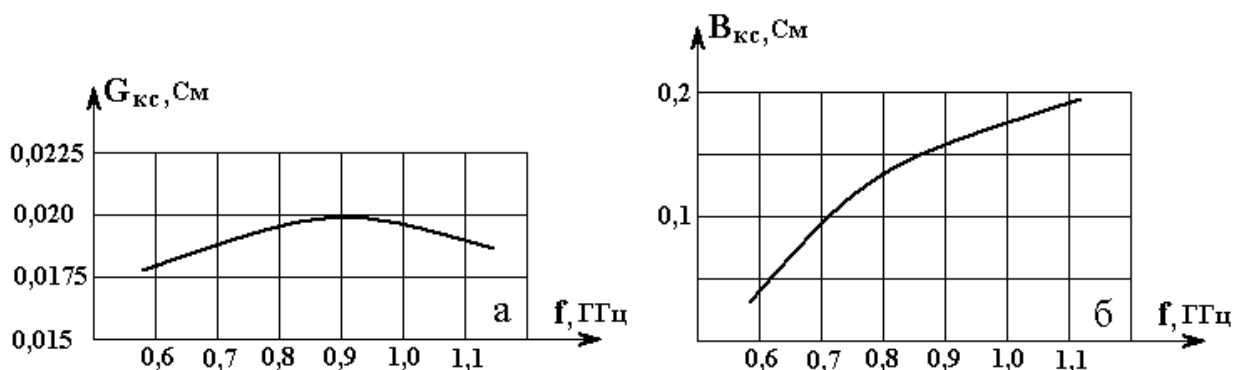


Рис.1. Данные расчета частотных зависимостей а) активной и б) реактивной проводимости колебательной системы генератора

На третьем этапе проектирования определяется ширина диапазона перестройки частоты, которая получается при значениях параметров элементов колебательной системы, рассчитанных на втором этапе. При этом с использованием модели биполярного транзистора [6] рассчитываются зависимости значений проводимости цепи на выходе транзистора, выходной мощности и постоянного эмиттерного тока прибора от амплитуды напряжения его открытого эмиттерного перехода. Такой расчет проводится при фиксированных значениях частоты и проводимости колебательной системы. На каждой частоте также определяются интервалы значений амплитуды этого напряжения, при которых возможна работа генератора, по резкому изменению расчетных значений активной и реактивной проводимости цепи на выходе транзистора на их границах. Расчет ограничивается частотами, для которых значение активной проводимости цепи на выходе транзистора



становится отрицательным. По этому критерию определяются границы диапазона перестройки.

По результатам расчета для ряда частот строятся кривые зависимости реактивной проводимости цепи на выходе транзистора  $B_H$  от ее активной проводимости  $G_H$ , значения которых находятся в определенных интервалах значений амплитуды напряжения открытого эмиттерного перехода, как показано на рис. 2 для рассматриваемого примера. На таком рисунке проводится непрерывная линия с неизменным знаком тангенса угла наклона, которая должна пересекать построенные кривые зависимостей  $B_H(G_H)$  (пунктирная линия на рис. 2). Точки пересечения определяют значения компонент проводимости цепи на выходе транзистора, а также значение амплитуды напряжения его открытого эмиттерного перехода, при которых обеспечивается работа прибора на фиксированных частотах диапазона перестройки. На частотах, для которых отсутствует пересечение проведенной линии и кривых зависимостей  $B_H(G_H)$ , работа генератора невозможна.

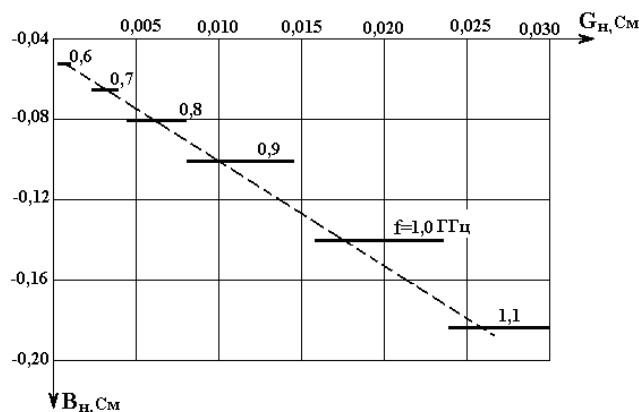


Рис. 2. Построения для определения компонент проводимости цепи на выходе транзистора, при которых обеспечивается работа генератора на фиксированных частотах диапазона перестройки

В том случае, если нельзя получить пересечение линии, определяющей возможные электрические режимы транзистора, с кривыми зависимостей  $B_H(G_H)$ , построенными для всех частот диапазона перестройки, для ее достижения может быть проведена корректировка:

- величин параметров элементов колебательной системы или ее структуры при сохранении неизменным электрического режима транзистора, который был исходным при их определении, а также принимаемого соответствия между емкостью варактора и частоты;
- исходного электрического режима транзистора для определения значений параметров элементов колебательной системы и ее структуры.

#### 4. Моделирование электрических характеристик генератора

На основании данных, полученных при построениях на рис. 2, проводится определение электрических характеристик СВЧ генератора с перестройкой частоты. Так, из этих данных следует, что при выбранных электрическом режиме работы транзистора, а также составе колебательной системы и параметрах ее элементов, перестройка частоты генератора может осуществляться в диапазоне от 0,6 до 1,1 ГГц при изменении емкости варактора в пределах от 60 до 35  $\pi$  Ф. По данному интервалу изменения емкости выбирается тип варактора, с учетом чего определяется интервал изменения подводимого к нему напряжения, при котором обеспечивается перестройка частоты в необходимом диапазоне.

Из данных рис. 2 непосредственно следует частотная зависимость компонент проводимости цепи на выходе транзистора, при которой обеспечивается перестройка частоты. Для рассматриваемого генератора эти зависимости приведены на рис. 3.

По координатам точек пересечения кривых зависимостей на рис. 2 определяются значения амплитуд напряжения открытого эмиттерного перехода транзистора, при которых он работает на фиксированных частотах диапазона перестройки. При определенных таким образом значениях амплитуды этого напряжения с использованием соотношений модели [6] рассчитываются величины выходной мощности и постоянного эмиттерного тока транзистора. На рис. 4 представлены данные по изменению этих параметров при перестройке частоты рассматриваемого в качестве примера генератора.

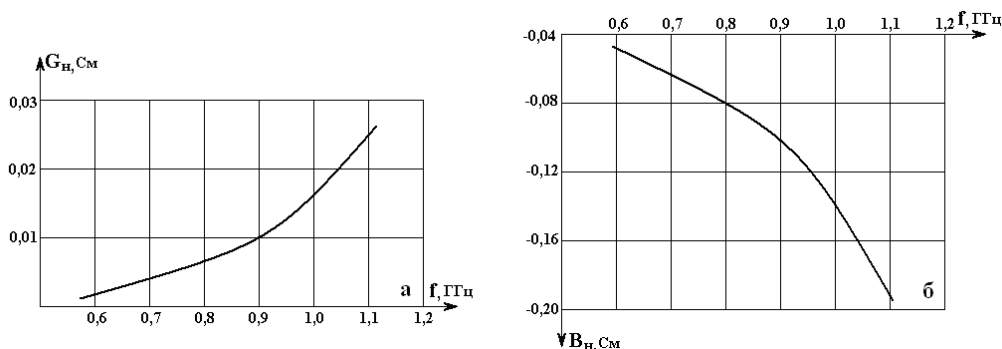


Рис. 3. Расчетные зависимости компонент проводимости цепи на выходе транзистора от частоты, при которых обеспечивается ее перестройка в генераторе

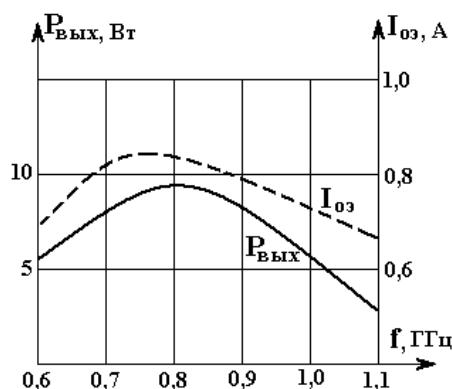


Рис. 4. Данные расчета изменения выходной мощности ( $P_{\text{вых}}$ ) и постоянного эмиттерного тока транзистора ( $I_{\text{оэ}}$ ) при перестройке частоты в генераторе

### 5. Заключение

При проектировании СВЧ транзисторных генераторов с перестройкой частоты, как правило, одновременно определяются частотные зависимости проводимости цепей, подключаемых к входу и выходу транзистора, при которых предполагается получить необходимый диапазон перестройки. Полученные данные затем используются в качестве исходных при проектировании колебательной системы и выходного трансформатора связи. Однако практическая реализация этих участков схемы генератора, частотные зависимости проводимости которых совпадали бы с исходными, является весьма сложной задачей. Особенно сложной представляется задача в части колебательной системы.

Преимуществом рассмотренного алгоритма является то, что на первых этапах проектирования представляется возможность выбора такой комбинации элементов колебательной системы и таких значений их параметров, при которых частотная зависимость проводимости этой системы может быть реализована. И только после этого решается задача определения частотной зависимости проводимости цепи на выходе транзистора. Кроме того, алгоритм обеспечивает проведение моделирования электрических характеристик генератора,

в том числе зависимости его выходных параметров от напряжения, подводимого к варактору.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Grebennikov A. RF and Microwave Trabsictor Oscillator Desing. John Wiley and Sons. Ltd. 2007. P. 437.
2. Kitchen J. Octave Bandwidth Varactor-tuned Oscillator. Microwave Journal. Vol. 30. №5. 1987. P. 347-353.
3. Vidwar A. M. Wideband Varactor-tuned Microsteip VCO. Microwave Journal. 1999. Vol. 42. №6. P. 80-86.
4. Мазеев Е.В. Определение пассивных элементов СВЧ транзисторного генератора с перестройкой частоты // Вестник СГТУ. Саратов. 2010. №2 (45). С. 193-196.
5. Горбачев Д.М., Мазеев Е.В., Фурсаев М.А. Решение задач проектирования СВЧ-генератора с внутренней обратной связью на биполярном транзисторе // Радиотехника. 2011. №1. С. 42-46.
6. Горбачев Д.М., Фурсаев М.А. Развитие кусочно-квазилинейной модели биполярного транзистора // Вестник СГТУ. Саратов. 2008. №1. Вып.1. С. 74-80.
7. Пасынков И.И., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. М.: Высшая школа, 1986. 479 с.

**Мазеев Евгений Валентинович** – ассистент кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

**Maseev Evgeny Valentinovich** – Junior Research Staff Member of the Department «Electrical Engineering and Electronics», Saratov State Technical University

**Фурсаев Михаил Александрович** – профессор кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

**Fursaev Mikhail Aleksandrovich** – Associate Professor of the Department «Electrical Engineering and Electronics», Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 06.02.2011, принята к опубликованию 07.07.2011*

УДК 538.911

**С.Г. Гестрин, Е.А. Сальникова****СПИНОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ НА ТОЧЕЧНОМ ДЕФЕКТЕ В  
ФЕРРОДИЭЛЕКТРИКЕ (ОДНОМЕРНЫЙ СЛУЧАЙ)**

*Изучено влияние точечного дефекта на спиновые колебания в ферродиелектрике. Определены условия, при которых на нем возможна локализация спиновых колебаний. Найдены выражения, определяющие убывание амплитуды локализованных колебаний с удалением от дефекта. Сделаны оценки для кристалла  $\text{EuO}$ , содержащего примесь из ионов  $\text{Tb}^{2+}$ .*

Орбитальный момент, спиновые колебания, точечный дефект, ферродиелектрик

**S.G. Gestrin, E.A. Salnikova****THE SPIN OSCILLATIONS LOCALIZED ON THE DOT DEFECT  
IN THE FERRODIELECTRIC (ONE-DIMENSIONAL CASE)**

*Influence of dot defect on spin oscillations in a ferroelectric is studied. Conditions at which on it localization of spin fluctuations is possible are defined. The expressions defining decrease of amplitude of localized fluctuations with removal from defect are found. Estimations for a crystal  $\text{EuO}$  containing an impurity from ions  $\text{Tb}^{2+}$  are made.*

Orbital moment, spin oscillations, dot defect, ferroelectric

Как известно, элементарные возбуждения спиновой системы ферромагнетика имеют характер спиновых волн. Спиновые волны представляют собой колебания относительной ориентации спинов в решетке. Наличие дефектов различной размерности (точечных, одномерных и двумерных) может существенно влиять на спектр этих колебаний [1, 2, 3]. Как было показано ранее в рамках микроскопического подхода [4, 5] и макроскопического подхода [6, 7], при определенных условиях спиновые волны локализуются на одномерных дефектах структуры – дислокациях. При этом их частоты оказываются сдвинутыми относительно частот объемных колебаний, а амплитуда быстро убывает с удалением от дефекта.

В данной статье исследуется влияние на спиновые колебания точечного дефекта. Рассмотрим кристалл ферродиелектрика (EuO, EuS), содержащий точечный дефект кристаллической структуры. Двухвалентный ион европия  $\text{Eu}^{2+}$  имеет электронную конфигурацию  $4f^7 5s^2 p^6$  и, согласно правилам Хунда, его основное состояние  ${}^8S_{7/2}$ ,  $L = 0, S = J = 7/2$ , фактор Ланде  $g_0 = 2$ . Будем предполагать, что один из ионов  $\text{Eu}^{2+}$  замещен на двухвалентный ион какого-либо другого редкоземельного элемента, например, тербия  $\text{Tb}^{2+}$  с электронной конфигурацией  $4f^9 5s^2 p^6$ , для которого основное состояние  ${}^6H_{15/2}$ ,  $L = 5, S = 5/2, J = 15/2$ .

Рассмотрим одномерную модель кристалла в виде цепочки одинаковых спинов  $\vec{S}$  ( $\text{Eu}^{2+}$ ), который содержит точечный дефект с отличным от этих спинов орбитальным моментом  $\vec{J}$  ( $\text{Tb}^{2+}$ ) (рис. 1).

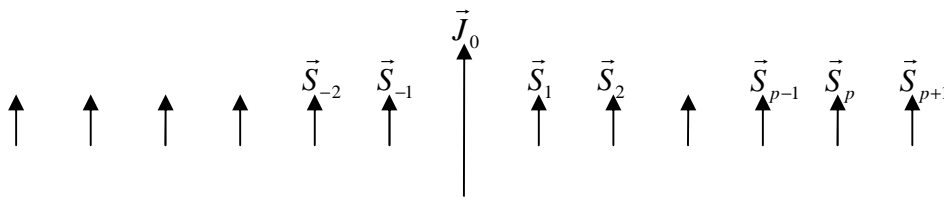


Рис. 1. Одномерная модель кристалла, содержащая точечный дефект

Изменение во времени момента количества движения  $\hbar \vec{J}_p$  равно вращающему моменту  $\vec{\mu}_p \times \vec{B}_p$ :

$$\hbar \frac{d\vec{J}_p}{dt} = \vec{\mu}_p \times \vec{B}_p, \quad (1)$$

где магнитный момент атома или иона в свободном пространстве выражается формулой:

$$\vec{\mu} = -g\mu_B \vec{J}, \quad (2)$$

где  $\mu_B$  – магнетон Бора,

$g$  – фактор Ланде:

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}. \quad (3)$$

Полный момент количества движения  $\hbar\vec{J}$  представляет собой сумму орбитального  $\hbar\vec{L}$  и спинового  $\hbar\vec{S}$  моментов количества движения. Экспериментальные данные дают  $g \approx 2$ , что свидетельствует о спиновой природе ферромагнетизма.

В уравнении (1)  $\vec{B}_p$  – эффективное магнитное поле:

$$\vec{B}_p = -\frac{I}{g_p \mu_B} (\vec{J}_{p-1} + \vec{J}_{p+1}), \quad (4)$$

где  $I$  – обменный интеграл. При записи (4) предполагается, что обменный интеграл существенно отличается от 0 только для ближайших соседей.

Подставляя (2) и (4) в (1), находим:

$$\hbar \frac{d\vec{J}_p}{dt} = I\vec{J}_p \times (\vec{J}_{p-1} + \vec{J}_{p+1}) \quad (5)$$

Из (5) находим:

$$\hbar \frac{d\vec{J}_0}{dt} = I\vec{J}_0 \times (\vec{S}_{-1} + \vec{S}_{+1}), \quad (6)$$

$$\hbar \frac{d\vec{S}_1}{dt} = I\vec{S}_1 \times (\vec{J}_0 + \vec{S}_2), \quad (7)$$

$$\hbar \frac{d\vec{S}_2}{dt} = I\vec{S}_2 \times (\vec{S}_1 + \vec{S}_3).. \quad (8)$$

Будем предполагать в дальнейшем, что амплитуда возбуждения мала: ( $S_{px}, S_{py} \ll S; S_{pz} = S$ ). Для дефекта, соответственно, ( $J_{0x}, J_{0y} \ll J_0; J_{0z} = J_0$ ). Ищем решение системы (6-7) в форме экспоненциально затухающей (по мере удаления от  $p = 0$ ) функции, которая в пределе  $J_0 \rightarrow S$  приближается к форме нормального колебания максимальной частоты для ненарушенной цепочки. Решение у границы зоны для невозмущенной цепочки имеет вид:

$$S_{px} = S_{0x} \cos p\pi = S_{0x} (-1)^p = S_{0x}^a (-1)^p \exp(-i\omega t). \quad (9)$$

Для цепочки, содержащей дефект:

$$S_{1x} = -J_{0x} e^{-\alpha}; S_{-1x} = -J_{0x} e^{-\alpha}; S_{px} = -S_{p-1,x} e^{-\beta}, p = 2, 3, \dots \quad (10)$$

В линейном приближении из (6) находим:

$$\begin{aligned} -i\omega\hbar J_{0x} &= 2ISJ_{0y} + 2IJ_0 J_{0y} e^{-\alpha}, \\ i\omega\hbar J_{0y} &= 2ISJ_{0x} + 2IJ_0 J_{0x} e^{-\alpha}. \end{aligned} \quad (11)$$

Перегруппировав слагаемые в (11), получаем однородную систему уравнений:

$$\begin{aligned} i\omega\hbar J_{0x} + 2I(S + J_0 e^{-\alpha})J_{0y} &= 0, \\ 2I(S + J_0 e^{-\alpha})J_{0x} - i\omega\hbar J_{0y} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Приравняв нулю определитель системы (12), находим:

$$\omega = 2\frac{I}{\hbar}(S + J_0 e^{-\alpha}). \quad (13)$$

Из (7) и (8) находим, аналогично (13):

$$\omega = \frac{I}{\hbar} [J_0 + S + S(e^\alpha + e^{-\beta})], \quad (14)$$

$$\omega = \frac{I}{\hbar} [2S + S(e^\beta + e^{-\beta})] \quad (15)$$

Константы  $\alpha$  и  $\beta$  должны быть определены из условия совместности уравнений (13-15).

Из (13) и (15) находим:

$$e^{-\alpha} = \frac{1}{2} \frac{S}{J_0} (e^\beta + e^{-\beta}). \quad (16)$$

Из (14) и (15) следует, что:

$$e^\alpha = 1 - \frac{J_0}{S} + e^\beta. \quad (17)$$

Перемножая, левые и правые части (16) и (17), получаем:

$$1 = \frac{1}{2} \frac{S}{J_0} (e^\beta + e^{-\beta}) \left(1 - \frac{J_0}{S} + e^\beta\right). \quad (18)$$

Соотношение (18) можно свести к кубическому уравнению:

$$t^3 + \left(1 - \frac{J_0}{S}\right)t^2 + \left(1 - 2\frac{J_0}{S}\right)t + \left(1 - \frac{J_0}{S}\right) = 0, \quad (19)$$

где  $t \equiv e^\beta$ . Один из корней уравнения (19)  $t = -1$ . Разделив (19) на  $t + 1$ , перейдем от кубического к квадратному уравнению:

$$t^2 - \frac{J_0}{S}t + \left(1 - \frac{J_0}{S}\right) = 0, \quad (20)$$

корни которого имеют вид:

$$t_{1,2} = \frac{1}{2} \frac{J_0}{S} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{J_0}{S}\right)^2 + 4\frac{J_0}{S} - 4}. \quad (21)$$

Для того чтобы подкоренное выражение в (21) было положительным, необходимо выполнение условия  $J_0 \geq 2(\sqrt{2} - 1)S \approx 0,83S$ . Заметим, что физический смысл имеет лишь  $e^\beta = t > 1$ , что соответствует возмущению, убывающему с удалением от дефекта. Этому условию не удовлетворяет корень  $t_2$  в (21). Таким образом, подставляя  $t_1$  в (17), находим:

$$e^\alpha = 1 - \frac{1}{2} \frac{J_0}{S} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{J_0}{S}\right)^2 + 4\frac{J_0}{S} - 4}. \quad (22)$$

Заметим, что для выполнения условия  $t_1 > 1$  необходимо, чтобы было  $J_0 > S$ .

Подставляя (22) в (13), получим:

$$\omega = \frac{\omega_{\max}}{2} \frac{1 + \frac{1}{2} \frac{J_0}{S} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{J_0}{S}\right)^2 + 4 \frac{J_0}{S}}}{1 - \frac{1}{2} \frac{J_0}{S} + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{J_0}{S}\right)^2 + 4 \frac{J_0}{S}}}, \quad (23)$$

где  $\omega_{\max} = 4IS/\hbar$  – граничная (пороговая) частота для волн в цепочке, не содержащей дефект.

Соотношение (23) определяет частоту колебаний, локализованных на точечном дефекте. Локализация возможна только, если  $J_0 > S$ .

При выполнении условия  $J_0 \gg S$  из (23) находим:

$$\omega \approx \omega_{\max} \left(1 + \frac{J_0}{S}\right). \quad (24)$$

Как видно из (23) и (24), частота локализованных колебаний  $\omega > \omega_{\max}$ .

Для рассмотренного выше точечного дефекта в виде иона тербия  $Tb^{2+}$  в цепочке из ионов  $Eu^{2+}$  отношение  $J_0/S \approx 2,14$ . Тогда из (23) имеем  $\omega \approx 1,24\omega_{\max}$ .

Заметим, что убывание амплитуды локализованных колебаний с удалением от дефекта сначала определяется величиной  $e^{-\alpha}$  (для ближайших к дефекту соседей), а затем множителем  $e^{-\beta}$  (для всех остальных ионов в цепочке). Согласно (22) получим  $e^{-\alpha} = 0,69$ , а из (17)  $e^{-\beta} = 0,39$ .

Таким образом, в работе найдены условия, при которых возможна локализация спиновых колебаний на точечных дефектах в ферромагнитных кристаллах. Показано, что частота локализованных колебаний превосходит пороговую частоту для волн в идеальной цепочке. Изучен характер убывания их амплитуды с удалением от дефекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. М.: Наука, 1972. 280 с.
2. Гестрин С.Г. Локализация поляритонов вблизи дислокаций в ионных кристаллах // Известия ВУЗов. Физика. 1996. №10. С. 45-50.
3. Гестрин С.Г. Локализация плазменных колебаний вблизи заряженных дислокаций и дислокационных стенок в полупроводниках // Известия ВУЗов. Физика. 1998. №2. С. 92-95.
4. Гестрин С.Г. Математическое моделирование взаимодействия спиновых волн с дислокациями в ферромагнетиках // Вестник СГТУ. 2009. №2(38). С. 17-23.
5. Гестрин С.Г., Сальникова Е.А. Локализация спиновых волн на дислокациях в ферромагнетиках (микроскопическое рассмотрение) // Физика твердого тела: материалы Российско-немецкой конференции. Астрахань: АГУ, 2009. С. 69-71.
6. Гестрин С.Г., Сальникова Е.А. Математическое моделирование спиновых волн, локализованных на дислокации в ферродиэлектрике (макроскопический подход) // Вестник СГТУ. 2010. №2(45). С. 19-23.
7. Гестрин С.Г., Сальникова Е.А. Локализация спиновых волн на дислокациях в ферромагнетиках (макроскопическое рассмотрение) // Физика твердого тела: материалы Российско-немецкой конференции. Астрахань: АГУ, 2009. С. 67-79.

**Гестрин Сергей Геннадьевич** –  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры «Прикладная физика»  
Саратовского государственного технического

**Gestrin Sergey Gennad'evich** –  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor of the Department “Applied Physics”,  
Saratov State Technical University



университета

**Сальникова Екатерина Александровна** - студентка кафедры электроники, колебаний и волн Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

**Sal'nikova Ekaterina Aleksandrovna** – Student of the Department “Electronics, Fluctuations and Waves”, Saratov State University on Name N.G. Chernyshevsky

*Статья поступила в редакцию 04.02.2011, принята к опубликованию 07.08.2011*

**С.Г. Гестрин, Е.А. Пилипенко, Е.В. Щукина**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ  
НА СПИН-ВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ  
ТИПА «ЛЕГКАЯ ОСЬ»**

*Изучено влияние дислокаций на спин-волновой резонанс в ферромагнетиках. Показано, что переменное однородное магнитное поле вызывает рост колебаний плотности магнитного момента, локализованных на дислокациях, ориентированных вдоль оси легкого намагничивания кристалла. Взаимодействие однородного магнитного поля с локализованными волнами носит характер параметрического резонанса.*

Дислокация, спин-волновой резонанс, локализованная волна

**S.G. Gestrin, E.A. Pilipenko, E.V. Schukina**

**MATHEMATICAL SIMULATION OF DISLOCATIONS' INFLUENCE  
ON SPIN-WAVE RESONANCE IN FERROMAGNETIC  
WITH THE AXIS OF SLIGHT MAGNETIZATION**

*The article deals with dislocations' influence on spin-wave resonance in ferromagnetic. The author shows that alternating uniform magnetic field causes the growth of magnetic moment density oscillations located in dislocations oriented along the axis of slight magnetization of a crystal. The interaction of uniform magnetic field with confined waves has the nature of parametric resonance.*

Dislocation, spin-wave resonance, located wave

Известно, что дефекты кристаллической структуры существенно влияют на различные процессы, происходящие в кристаллах. Так, наличие дислокаций приводит к локализации на них различных ветвей колебаний. Амплитуда локализованных волн быстро убывает с удалением от дислокации, а их частота сдвинута относительно частоты объемных колебаний [1-3]. Ниже исследован процесс резонансного возбуждения переменным однородным магнитным полем неоднородных колебаний плотности магнитного момента в тонкой ферромагнитной пленке, содержащей дислокации, ориентированные вдоль оси легкого намагничивания. Ранее данное явление изучалось теоретически без учета влияния дефектов структуры, и было показано, что оно носит характер параметрического резонанса [4]. Как следует из проведенных в данной работе вычислений, в условиях резонанса  $\omega = \omega_0 = 2\omega_s(k)$  ( $\omega$  – частота внешнего переменного магнитного поля,  $\omega_0$  – частота однородного ферромагнитного резонанса,  $\omega_s(k)$  – частота спиновых волн) нарастают стоячие спиновые волны, локализованные на дислокациях. В данной работе получена и исследована зависимость от времени их амплитуды в предположении  $4\pi - K \ll 1$  ( $K$  – коэффициент анизотропии). Показано, что с течением времени резкое убывание амплитуды локализованных колебаний плотности магнитного момента с удалением от дефекта сменяется значительно более медленным.

Как известно, уравнение движения магнитного момента в ферромагнетике имеет вид [4, 5]:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma [\vec{H}_{\text{эф}}, \vec{M}], \gamma \equiv \frac{g|e|}{2mc}, \quad (1)$$

где  $\vec{M}$  – плотность магнитного момента (намагниченность),  
 $g$  – гиромагнитное отношение ферромагнетика;  
 $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  
 $c$  – скорость света,  
 $\vec{H}_{\text{эф}}$  – эффективное поле.

Учитывая обменное взаимодействие, а также наличие в кристалле дислокаций (будем предполагать, что они ориентированы вдоль оси симметрии  $z$ ), запишем выражение для эффективного поля в виде:

$$\vec{H}_{\text{эф}} = \alpha_{ik} \frac{\partial^2 \vec{M}}{\partial x_i \partial x_k} - \sum_s a^2 \beta \frac{\partial^2 \vec{M}}{\partial z^2} \delta(\vec{\rho}_s) + KM_z \vec{v} + \vec{H}. \quad (2)$$

Здесь  $a$  – постоянная решетки,  $\beta$  – характеризует обменное взаимодействие атомов, расположенных вдоль оси дислокации,  $\delta(\vec{\rho}_s)$  – двумерная дельта-функция;  $\vec{\rho}_s = (x_s, y_s)$  – двумерный вектор, определяющий положение дислокаций в кристалле,  $\alpha_{ik}$  – симметричный тензор второго ранга;  $\vec{v}$  – вектор, направленный вдоль оси симметрии кристалла  $z$  (ферромагнетик типа «легкая ось»),  $K > 0$  – коэффициент анизотропии,  $\vec{H}$  – магнитное поле в ферромагнетике.

В рассматриваемых ниже одноосных кристаллах  $\alpha_{ik}$  имеет отличные от нуля компоненты  $\alpha_{xx} = \alpha_{yy} = \alpha_2, \alpha_{zz} = \alpha_1$ . Будем предполагать, что кристалл имеет форму эллипсоида и  $n^{(x)}, n^{(y)}, n^{(z)}$  – коэффициенты размагничивания вдоль его главных осей.

Если предположить, что ферромагнетик находится во внешнем магнитном поле, ориентированном вдоль оси  $x$ :  $H_{\text{внеш}}(t) = H_{0x} \exp(-i\omega t)$ , то для однородных колебаний плотности магнитного момента находим [4]:

$$m_x(t) = \frac{\gamma M_0 \omega^{(y)}}{\omega_0^2 - \omega^2} H_{\text{внеш}}(t), \quad (3)$$

где  $\omega_0 \equiv (\omega^{(x)} \omega^{(y)})^{1/2}$  – частота однородного ферромагнитного резонанса [4, 5, 6],

$$\omega^{(x)} = \gamma M_0 (4\pi(n^{(x)} - n^{(z)}) + K), \quad (4)$$

$$\omega^{(y)} = \gamma M_0 (4\pi(n^{(y)} - n^{(z)}) + K).$$

Считаем, что внутри кристалла существует магнитное поле  $\vec{H} = (h_x, h_y, H_0)$ , которое создает малую поперечную намагниченность  $m_x$  и  $m_y$ , а  $M_z \approx M_0 = \text{const}$ :

$$h_x = -4\pi n^{(x)} m_x + H_{\text{внеш}}(t), \quad (5)$$

$$h_y = -4\pi n^{(y)} m_y, \quad (6)$$

$$H_0 = -4\pi n^{(z)} M_0. \quad (7)$$

Однородный ферромагнитный резонанс приводит к тому, что энергия внешнего переменного магнитного поля, приложенного в направлении, перпендикулярном к оси легкого намагничивания, будет сильно поглощаться, если его частота окажется близкой к  $\omega_0$ . Данное явление было изучено в целом ряде работ [4], поэтому мы не будем здесь подробно на нем останавливаться.

Рассмотрим кристалл, содержащий дефект кристаллической структуры. Подставляя (2) в (1) и предполагая, что в кристалле находится всего одна дислокация, проходящая через начало координат, находим:

$$-i\omega m_x = \gamma M_0 \left( -\alpha_1 k^2 + \alpha_2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - 4\pi(n^{(y)} - n^{(z)}) - K \right) m_y + a^2 k^2 \delta(\vec{\rho}) \beta M_0 \gamma m_y(0), \quad (8)$$

$$-i\omega m_y = -\gamma M_0 \left( -\alpha_1 k^2 + \alpha_2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - 4\pi(n^{(x)} - n^{(z)}) - K \right) m_x - a^2 k^2 \delta(\vec{\rho}) \beta M_0 \gamma m_x(0). \quad (9)$$

Для плоскопараллельной пластинки, поверхность которой перпендикулярна к оси легкого намагничивания ( $n^{(x)} = n^{(y)} = 0, n^{(z)} = 1$ ), имеем:

$$-i\omega m_x = \gamma M_0 \left( -\alpha_1 k^2 + \alpha_2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + 4\pi - K \right) m_y + a^2 k^2 \delta(\vec{\rho}) \beta M_0 \gamma m_y(0), \quad (10)$$

$$-i\omega m_y = -\gamma M_0 \left( -\alpha_1 k^2 + \alpha_2 \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + 4\pi - K \right) m_x - a^2 k^2 \delta(\vec{\rho}) \beta M_0 \gamma m_x(0). \quad (11)$$

Согласно (10) и (11) находим:

$$m_x = -im_y, \quad (12)$$

т.е. решение описывает волну, поляризованную по кругу.

Из (10) и (11) получаем уравнение для  $m_x$ :

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) m_x - \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} k^2 + \frac{K - 4\pi}{\alpha_2} - \frac{\omega}{\gamma M_0 \alpha_2} \right) m_x = -\frac{\beta}{\alpha_2} a^2 k^2 \delta(\vec{\rho}) m_x(0). \quad (13)$$

Для осесимметричного возмущения, локализованного на дислокации:

$$\frac{\partial^2 m_x}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial m_x}{\partial \rho} - \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} k^2 + \frac{K - 4\pi}{\alpha_2} - \frac{\omega}{\gamma M_0 \alpha_2} \right) m_x = -\frac{1}{2\pi} \frac{\beta}{\alpha_2} a^2 k^2 \frac{\delta(\rho)}{\rho} m_x(0). \quad (14)$$

Отсюда:

$$m_{0,x}(\rho) = \frac{1}{2\pi} \frac{\beta}{\alpha_2} a^2 k^2 m_{0,x}(0) K_0 \left( \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2} k^2 + \frac{K - 4\pi}{\alpha_2} - \frac{\omega}{\gamma M_0 \alpha_2}} \rho \right) = -\beta a^2 k^2 \gamma M_0 m_{0,x}(0) \times \\ \times \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\infty \frac{\kappa d\kappa}{\omega - \gamma \alpha_1 M_0 (k^2 + \kappa^2) - \gamma M_0 (K - 4\pi)} \int \cos(\kappa \rho \cos \varphi) d\varphi. \quad (15)$$

Полагая в (15)  $\rho = 0$ , находим дисперсионное уравнение для осесимметричных волн, локализованных на дислокации [1, 2, 3]:

$$1 + \frac{\beta}{2\pi} a^2 k^2 \gamma M_0 \int_0^{\kappa_0} \frac{\kappa d\kappa}{\omega - \gamma \alpha_1 M_0 (k^2 + \kappa^2) - \gamma M_0 (K - 4\pi)} = 0. \quad (16)$$

Выполняя интегрирование в (16) и пренебрегая малыми членами порядка величины

$$\frac{\gamma \alpha_1 M_0 k^2 + \gamma M_0 (K - 4\pi) - \omega}{\gamma \alpha_1 M_0 \kappa_0^2} \ll 1, \quad (17)$$

находим:

$$\omega \approx \gamma M_0 \left( \alpha_1 k^2 + K - 4\pi - \kappa_0^2 \exp\left(-\frac{4\pi\alpha_1}{\beta a^2 k^2}\right) \right). \quad (18)$$

Если пластинка ограничена плоскостями  $z=0$  и  $z=L$ , и спины в поверхностном слое направлены перпендикулярно к поверхности, т. е. на границах находятся узлы стоячей волны, то решение внутри пластинки имеет вид:

$$m_x(\rho, z, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\beta}{\alpha_2} a^2 k^2 m_{0,x}(0) K_0 \left( \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2} k^2 + \frac{K-4\pi}{\alpha_2} - \frac{\omega}{\gamma M_0 \alpha_2} \rho} \right) \sin k_n z \sin \omega t, \quad (19)$$

где  $k_n = \frac{\pi n}{L}, n=1,2,3,\dots$  (20)

Здесь  $n$  – число полуволн, которое укладывается на толщине пластинки  $L$ .

Таким образом, находим возможные собственные частоты локализованных на дислокации колебаний:

$$\omega_n = \gamma M_0 \left( \alpha_1 \left( \frac{\pi n}{L} \right)^2 + K - 4\pi - \kappa_0^2 \exp\left(-\frac{4\alpha_1 L^2}{\beta a^2 \pi^2 n^2}\right) \right). \quad (21)$$

Последнее слагаемое в (21) определяет поправку, связанную с наличием дислокаций.

При исследовании однородного ферромагнитного резонанса обычно исходят из линеаризованного уравнения движения плотности магнитного момента, откуда следует, что переменное однородное магнитное поле возбуждает только однородные колебания плотности магнитного момента. На самом деле уравнение движения момента (1) является нелинейным, и однородные колебания связаны с неоднородными колебаниями. Следовательно, однородное переменное магнитное поле вызывает как однородные, так и неоднородные колебания плотности магнитного момента. Это возбуждение носит характер параметрического резонанса и называется параметрическим возбуждением спиновых волн [4]. Поскольку неоднородные колебания возбуждаются благодаря связи с однородными, то при записи уравнений (8, 9) нужно удержать не только линейные по  $m_x(\vec{k})$  и  $m_y(\vec{k})$  члены, но и билинейные члены типов  $m_{x,y}(0)m_{x,y}(\vec{k})$ .

Рассмотрим ниже один из наиболее интересных случаев, когда частота изменений однородного магнитного поля близка к удвоенной частоте  $\omega_s(k)$ , а также к частоте однородного ферромагнитного резонанса [4]:

$$\omega = 2\omega_s(k) + \varepsilon = \omega_0 + \varepsilon. \quad (22)$$

Для плоскопараллельной пластинки, поверхность которой перпендикулярна к оси легкого намагничения ( $n^{(x)} = n^{(y)} = 0, n^{(z)} = 1$ ), как известно из [4, 5, 6]:

$$\omega_s(k) = \gamma M_0 \sqrt{(\alpha k^2 + K - 4\pi)(\alpha k^2 + K - 4\pi \cos^2 \theta)}, \omega_0 = \gamma M_0 (K - 4\pi), \quad (23)$$

где  $\alpha = \alpha_2 \sin^2 \theta + \alpha_1 \cos^2 \theta$ , (24)  
 $\theta$  – угол между  $\vec{k}$  и  $\vec{v}$ .

В дальнейшем для простоты вычислений будем предполагать  $\alpha_1 = \alpha_2$ . Подставляя (23) в (22), находим выражение для величины волнового вектора возбуждаемой спиновой волны:

$$\alpha k^2 = \sqrt{(2\pi \sin^2 \theta_k)^2 + \frac{1}{4}(K - 4\pi)^2} - 2\pi \sin^2 \theta_k - (K - 4\pi). \quad (25)$$

Из (25) видно, что возбуждаемые спиновые волны распространяются в конусе, ось которого направлена вдоль вектора  $\vec{M}_0$ , причем угол раствора этого конуса определяется соотношением:

$$\sin \theta_k < \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{4\pi - K}{4\pi}}. \quad (26)$$

Согласно (26) очевидно, что для возбуждения спиновых волн необходимо выполнение условия

$$K < 4\pi. \quad (27)$$

Таким образом, наличие большой константы магнитной анизотропии  $K$  препятствует возможности параметрического возбуждения неоднородных колебаний плотности магнитного момента. Если  $K$  близко к  $4\pi$ , то возбуждаемые спиновые волны распространяются в узком конусе, ось которого направлена вдоль вектора  $\vec{M}_0$ , причем угол раствора этого конуса равен:

$$\theta_0 \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{4\pi - K}{4\pi}}. \quad (28)$$

Инкремент нарастания амплитуды спиновой волны  $\eta_k(\omega)$  будет особенно велик, если частота стороннего поля  $\omega$  близка к частоте ферромагнитного резонанса  $\omega_0$ .

Согласно [4]:

$$\eta_k(\omega) = \sqrt{|\alpha_k|^2 - \left(\frac{\omega}{2} - \omega_s(k)\right)^2}, \quad (29)$$

$$|\alpha_k| = \frac{\rho(\vec{k})}{M_0} \frac{|H_{внеш}^+|}{\sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma_r^2}}, \quad \rho(\vec{k}) = 2\pi(\gamma M_0)^2 \frac{k_z}{k^2} |u_k(k_+ u_k + k_- v_k^*)|,$$

где  $k_{\pm} = k_x \pm ik_y$ ,

$H_{внеш}^+ = H_{хвнеш} + iH_{увнеш}$ ,

$\gamma_r$  – коэффициент затухания при резонансе;

$$m_-(k) = u_k^* c_{-k}^* + v_k c_k, \quad (30)$$

где  $c_k, c_{-k}^*$  – нормальные координаты,

$$u_k = \sqrt{\frac{A_k + \omega_s(k)}{2\omega_s(k)}}, v_k = -\frac{B_k^*}{|B_k|} \sqrt{\frac{A_k - \omega_s(k)}{2\omega_s(k)}}. \quad (31)$$

В (31) обозначено:

$$A_k = \gamma M_0 \left( \alpha k^2 + (K - 4\pi) + 2\pi \frac{k_+ k_-}{k^2} \right), B_k = 2\pi \gamma M_0 \frac{k_+^2}{k^2}, \omega_s(k) = \sqrt{A_k^2 - |B_k|^2} \quad (32)$$

Предполагая, что  $\theta < \theta_0$ , где  $\theta_0$  определяется условием (28), и приближенно полагая  $k_z \approx k$  и  $k_x, k_y \ll k$ , из (32) находим:

$$A_k \approx \gamma M_0 (\alpha k^2 + (K - 4\pi)), \quad B_k \approx 0, \quad \omega_s(k) \approx A_k. \quad (33)$$

При этом, согласно (31):

$$u_k \approx 1, \quad v_k \approx 0. \quad (34)$$

Из (30) имеем:

$$m_+(k) \approx c_k, \quad m_-(k) \approx c_{-k}^*. \quad (35)$$

Нормальные координаты  $c_k$  имеют вид:

$$c_k(t) = x_k(t) \cdot e^{-i\omega_s(k)t}, \quad (36)$$

где  $x_k(t) \approx x_k^{(1)} e^{\lambda_+ t}$ ,  $\lambda_+ = -i \left( \frac{\omega}{2} - \omega_s(k) \right) + \eta_k(\omega)$ . (37)

Окончательно из (35) и (37):

$$m_+(k) \approx x_k^{(1)} e^{-i\frac{\omega}{2}t} e^{\eta_k(\omega)t}, \quad m_-(k) \approx x_{-k}^{(1)} e^{i\frac{\omega}{2}t} e^{\eta_k(\omega)t}. \quad (38)$$

Здесь  $x_k^{(1)}$  и  $x_{-k}^{(1)}$  – произвольные постоянные. Выбираем в дальнейшем:

$$x_k^{(1)} = m_{k0}(t=0) e^{i\frac{\pi}{2}}, \quad x_{-k}^{(1)} = m_{k0}(t=0) e^{-i\frac{\pi}{2}}. \quad (39)$$

Из (39) и (38) находим окончательно:

$$m_x(k) = m_{k0}(t=0) \sin \frac{\omega}{2} t \cdot e^{\eta_k(\omega)t}, \quad m_y(k) = m_{k0}(t=0) \cos \frac{\omega}{2} t \cdot e^{\eta_k(\omega)t}. \quad (40)$$

Подставляя (34) в (29), получаем:

$$\eta_k(\omega) \approx \frac{2\pi(\gamma M_0)^2 \theta}{M_0} \cdot \frac{|H_{внеш}^+|}{\sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma_r^2}}. \quad (41)$$

Из (29) видно, что возбуждение однородным полем неоднородных колебаний будет происходить в том случае, если амплитуда стороннего переменного магнитного поля превосходит некоторое минимальное критическое значение:

$$|H_{внеш}^+| > H_c, \quad (42)$$

определяемое, согласно (29), из неравенства:

$$|\alpha_k| > \left| \frac{\omega}{2} - \omega_s(k) \right|. \quad (43)$$

Подставляя сюда  $|\alpha_k|$  из (29), находим:

$$H_c = M_0 \frac{\sqrt{[(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma_r^2] \cdot \left[ \left( \frac{\omega}{2} - \omega_s(k) \right)^2 + \gamma_s^2(k) \right]}}{\rho(k)}. \quad (44)$$

В условиях резонанса (22) критическое поле определяется соотношением [4]:

$$H_c = \frac{\gamma_s(k)\gamma_r}{\rho(k)} M_0 \approx M_0 \frac{\gamma_s(k)}{\gamma M_0} \frac{\gamma_r}{\gamma M_0} \approx 10^{-2} M_0 \approx 10 \text{ Гс}. \quad (45)$$

Предполагая в дальнейшем, что выполняется условие  $|H_{внеш}^+| \gg H_c$ , и полагая для определенности  $|H_{внеш}^+| = 10H_c$ , из (45) и (41) находим:

$$\eta_k \approx 20\pi\gamma_s(k)\theta. \quad (46)$$

Полагаем здесь  $\gamma_s \approx 0,1\gamma M_0$ ,  $\gamma = 2\mu_0/\hbar$ ,  $\mu_0 \approx 0,9 \cdot 10^{-20}$  'эрг/Гс,  $M_0 = 10^3$  Гс. Отсюда находим, что  $\gamma_s \approx 1,8 \cdot 10^9$  Гц. Из требования  $\eta_k \ll \omega_s(k)$  следует ограничение на величину угла  $\theta \ll 0,16$ . Из (28) видно, что при этом  $4\pi - K \ll 0,4$ . Для удобства дальнейших вычислений представим инкремент в виде:

$$\eta_k \approx \frac{\theta}{\tau}, \quad \tau \approx \frac{1}{20\pi\gamma_s}. \quad (47)$$

Подставляя (47) и (40) в (15), находим:

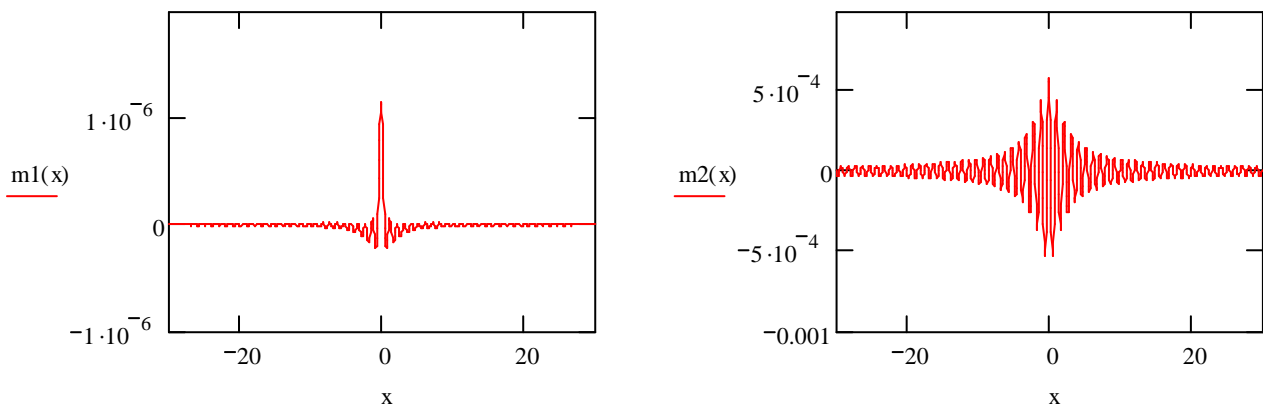
$$m_x(\rho, z, t) = \frac{\beta}{\alpha} (ak)^2 m_{k_0}(t=0) \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{\theta_0} \frac{\theta \cdot \exp\left(\frac{\theta t}{\tau}\right)}{\theta^2 + 1} d\theta \int \cos(k\theta\rho \cos\varphi) d\varphi \sin k_n z \sin \frac{\omega_0}{2} t. \quad (48)$$

Амплитуда локализованных колебаний для пучности стоячей волны определяется соотношением:

$$m_{0,x}(\rho) \approx \frac{\beta}{\alpha} (ak)^2 m_{k_0}(t=0) \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{\theta_0} \frac{\theta \cdot \exp\left(\frac{\theta t}{\tau}\right)}{\theta^2 + 1} d\theta \int \cos(k\theta\rho \cos\varphi) d\varphi. \quad (49)$$

Результат вычисления интеграла (49) в MATHCAD для  $\beta/\alpha = 0.1$ ,  $ak = 0.1$ ,  $\theta_0 = 0,016$ ,  $x \equiv k\rho$  и различных значениях  $t/\theta$  представлен на рис. 1.

На рис. 1 введено обозначение  $m(x) \equiv m_{0,x}(\rho)/m_{k_0}(0)$ , где  $x = k\rho$ . Видно, что амплитуда локализованных спиновых волн быстро увеличивается с течением времени. При этом резкое убывание амплитуды локализованных колебаний с удалением от дислокации сменяется существенно более медленным. Это связано с ростом инкремента компонент Фурье (40) с увеличением угла  $\theta$  между волновым вектором  $\vec{k}$  и осью легкого намагничивания (47).





а

б

Рис. 1. Колебания магнитного момента, локализованные на дислокациях в ферромагнетике (развитие неустойчивости с течением времени): а)  $t/\tau = 0.15$ , б)  $t/\tau = 1.5$

Заметим, однако, что этот рост не будет продолжаться бесконечно долго, так как при достаточно больших амплитудах начнут играть роль ранее не учтенные нелинейные эффекты, которые, в конечном счете, приведут к некоторому стационарному режиму, который будет характеризоваться определенными амплитудами как однородных, так и неоднородных колебаний плотности магнитного момента.

Выше рассмотрено параметрическое возбуждение спиновых волн с частотой  $\omega_s(k) = \omega_0/2$ , однако возможно также параметрическое возбуждение волн с частотами  $\omega_s(k) = (n/m)\omega_0$ , где  $n$  и  $m$  – произвольные целые числа. В частности, возможно параметрическое возбуждение спиновых волн с частотой  $\omega_s(k) = \omega_0$ . При этом  $\omega_s(k)$  определяется (21). Однако для возбуждения таких волн нужны значительно большие магнитные поля:

$$H'_c \approx M_0 \left( \frac{\gamma_s(k)}{\gamma M_0} \right)^{1/2} \frac{\gamma_r}{\gamma M_0} \gg H_c. \quad (50)$$

Таким образом, в работе изучен спин-волновой резонанс в тонкой ферромагнитной пленке, содержащей дислокации, ориентированные вдоль оси ее легкого намагничивания. Показано, что наличие дислокаций оказывает существенное влияние на характер резонанса, приводя к преимущественному росту с течением времени локализованных на них колебаний плотности магнитного момента.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гестрин С.Г. Локализация поляритонов вблизи дислокаций в ионных кристаллах // Известия ВУЗов. Физика. 1996. №10. С. 45-50.
2. Гестрин С.Г. Локализация плазменных колебаний вблизи заряженных дислокаций и дислокационных стенок в полупроводниках // Известия ВУЗов. Физика. 1998. №2. С. 92-95.
3. Гестрин С.Г., Сальников А.Н. Локализация экситонов Френкеля на дислокациях // Известия ВУЗов. Физика. 2005. №7. С. 23-25.
4. Ахиезер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В. Спиновые волны. М.: Наука, 1967. 368 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.IX. Статистическая физика. М.: Наука, 1978. 447 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.

**Гестрин Сергей Геннадьевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная физика» Саратовского государственного технического университета

**Gestrin Sergey Gennad'evich** – Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor of the Department “Applied Physics”, Saratov State Technical University

**Пилипенко Елена Александровна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Инженерная физика» Саратовского государственного аграрного университета

**Pilipenko Elena Aleksandrovna** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of the Department “Engineering Physics”, Saratov State Agrarian University

**Шукина Елена Вячеславовна** –  
кандидат физико-математических наук, доцент  
кафедры «Прикладная физика» Саратовского  
государственного технического университета

**Shchukina Elena Vjacheslavovna** –  
Candidate of Physical and Mathematical  
Sciences, Assistant Professor of the  
Department “Applied Physics”, Saratov State  
Technical University

*Статья поступила в редакцию 06.02.2011, принята к опубликованию 07.08.2011*

УДК 539.193/.194;535/33.34

**В.Ф. Пулин, П.М. Элькин, Е.Ю. Степанович, Е.Н. Минаев**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СПЕКТРОВ ЦИКЛОЗАРИНА**

*Проведен теоретический анализ конформационной структуры и колебательных спектров циклозарина (GF-agent) в рамках метода DFT/B3LYP.*

Колебательные спектры, циклозарин, конформационная структура, водородная связь

**V.F. Pulin, P.M. Elkin, E.Yu. Stepanovith, E.N. Minaev**

### **STRUCTURAL-DYNAMIC MODELES OF CYCLOZARINE**

*An analysis of vibrational spectra and conformational structure for cyclozarine(GF-agents) is carried out by the method DFT/B3LYP.*

Vibrational spectra, cyclozarine, conformational structure

#### **Введение**

Циклозарин (GF-agent) – известное химическое и биологически активное соединение ( $C_6H_{11}-O-P=O(F)(CH_3)$ ), синтез которого контролируется Международной конвенцией о запрещении химического оружия.

Одним из способов его ликвидации является гидролиз, на первой стадии которого исходное соединение (рис. 1) превращается в циклогексилметилфосфовую кислоту (СМРА), а на второй СМРА разлагается на циклогексанол (циклогексиловый спирт -  $C_6H_{11}OH$ ) и метилфосфовую кислоту (МРА). Более подробно такая технология описана в публикации [1], где предлагается использовать возможности SERS (surface-enhanced Raman spectroscopy) спектроскопии для спектральной идентификации продуктов гидролиза и тем самым осуществлять контроль за технологическим процессом ликвидации химического оружия группы G-agents (зарин, зоман, циклозарин). Однако предлагаемая авторами в [1] интерпретация колебательных спектров не подтверждена теоретическим расчетом, как это принято в колебательной спектроскопии [2].

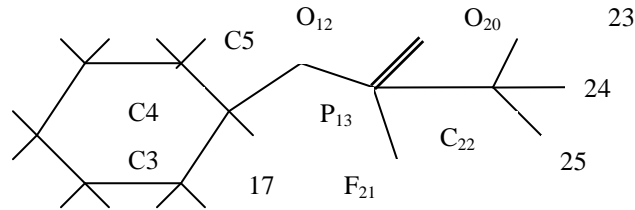


Рис. 1. Молекулярная модель токсичного фрагмента циклозарина

Осуществить такую теоретическую интерпретацию колебательного спектра циклозарина и продуктов его распада можно на основании неэмпирических квантовых расчетов параметров адиабатического потенциала и конформационных свойств соединений (например, [3]).

Цель данного сообщения – анализ структуры и колебательного спектра циклозарина в рамках метода функционала плотности DFT/B3LYP/6-311+G(d,p) [4].

### Модельные расчеты структуры и колебательных состояний

Исходное модельное уравнение (гамильтониан) во втором порядке теории возмущения имеет вид [5]:

$$2H^{(v)} = v_s(P_s^2 + (Q^s)^2) + F_{srt}Q^sQ^rQ^t + F_{strtu}Q^sQ^rQ^tQ^u \quad (1)$$

где  $v_s$  частоты гармонических колебаний (в  $cm^{-1}$ );

$Q^a$  безразмерные нормальные колебательные координаты;

$F_{srt}$  и  $F_{strtu}$  – кубические и квартичные силовые постоянные.

Решение уравнения (1) методами теории возмущения приводит к известному выражению для энергий колебательных состояний:

$$E^{(v)} = v_s(n_s + g_s/2) + \chi_{sr}(n_s + 1/2)(n_r + 1/2)(1 + 1/2\delta_{sr}). \quad (2)$$

Оптимизация геометрии для различных исходных конформаций, задаваемых различными значениями двугранных углов между мостиком  $C_4O_{12}P_{13}$  и циклогексановым и токсичным фрагментами, приводит к двум конформационным моделям циклозарина (K1 и K2). Значения двугранных углов конформеров представлены в табл.1. Отметим, что смена атомного базиса, как показано в [3], приводит к сдвигу расчетных значений двугранных углов не более чем на  $2^\circ$ .

Значения двугранных углов в молекуле циклозарина (в °)

Углы	K1	K2	Углы	K1	K2	Углы	K1	K2
D <sub>(3,4,12,13)</sub>	84.2	89.9	D <sub>(10,5,6,19)</sub>	53.1	61.1	D <sub>(12,13,22,24)</sub>	169.9	49.4
D <sub>(5,4,12,13)</sub>	-153.3	-148.3	D <sub>(18,5,6,1)</sub>	57.8	65.7	D <sub>(12,13,22,25)</sub>	-71.2	169.9
D <sub>(17,4,12,13)</sub>	-35.5	-30.0	D <sub>(18,5,6,11)</sub>	179.2	-173.3	D <sub>(20,13,22,23)</sub>	-179.6	60.0
D <sub>(4,5,6,1)</sub>	-62.2	-53.4	D <sub>(18,5,6,19)</sub>	-64.7	-56.8	D <sub>(20,13,22,24)</sub>	-59.0	-179.4
D <sub>(4,5,6,11)</sub>	59.1	67.5	D <sub>(4,12,13,20)</sub>	27.8	27.5	D <sub>(20,13,22,25)</sub>	59.8	-58.9
D <sub>(4,5,6,19)</sub>	175.3	-176.0	D <sub>(4,12,13,21)</sub>	-94.9	-95.2	D <sub>(21,13,22,23)</sub>	-56.9	-177.4
D <sub>(10,5,6,1)</sub>	175.6	-176.4	D <sub>(4,12,13,22)</sub>	159.7	159.5	D <sub>(21,13,22,24)</sub>	63.6	-56.8
D <sub>(10,5,6,11)</sub>	-63.0	-55.4	D <sub>(12,13,22,23)</sub>	49.4	-71.2	D <sub>(21,13,22,25)</sub>	-177.5	63.7

Отличие валентных углов циклогексанового остова от тетраэдрических значений не превышает 3.5°, а для токсичного фрагмента оптимизация приводит к следующим результатам:  $A_{\text{COP}}=120.2$ ,  $A_{\text{OP=O}}=116.8$ ,  $A_{\text{OPF}}=102.5$ ,  $A_{\text{OPC}}=102.3$ ,  $A_{\text{FP=O}}=111.7$ ,  $A_{\text{CP=O}}=118.2$ ,  $A_{\text{FPO}}=101.4$ .

Для длин валентных связей оптимизация дает следующие значения (в Å):

$$R_{\text{CC}} = 1.52-1.54, R_{\text{CH}} = 1.09-1.10, R_{\text{CO}} = 1.46, R_{\text{OP}} = 1.60, R_{\text{P=O}} = 1.47, R_{\text{PF}} = 1.60, R_{\text{PC}} = 1.80.$$

Для токсичного фрагмента полученные значения длин валентных связей и валентных углов полностью согласуются с соответствующими значениями в зарине и зомане.

Набор вычисленных значений фундаментальных частот колебаний циклозарина разделен на две части. Первая, представленная в табл. 2, относится к токсичному фрагменту, вторая (табл. 3) интерпретирует колебания циклогексанового фрагмента.

Таблица 2

Интерпретация колебаний токсичного фрагмента конформеров циклозарина

Форма колебаний	$\nu_{\text{экс}}$ [7,8]	Конформер_1			Конформер_2		
		$\nu_m$	ИК	КР	$\nu_m$	ИК	КР
Q <sub>O=P</sub>	1276	1245	215	9.66	1245	184	7.79
$\beta, Q_{\text{CO}}$	1015	1007	11.54	0.54	990	87.1	1.94
Q <sub>OP</sub> , Q <sub>CO</sub>	933	957	587	3.12	960	525	3.94
Q <sub>PF</sub>	780	777	120	3.29	778	125	2.69
Q <sub>CO</sub> , Q <sub>PC</sub>	725	754	7.03	7.91	734	15.4	2.79
$\beta_{\text{COP}}$ , Q <sub>PC</sub> , Q <sub>PF</sub>		710	51.7	12.1	699	41.1	20.4
$\gamma, \beta_{\text{OPF}}$ , $\beta_{\text{COP}}$	515	499	24.4	3.05	487	31.1	2.30
$\beta_{\text{OPF}}$ ,	450	449	20.1	2.90	416	12.8	0.48
$\alpha_{\text{OPF}}$ , $\beta_{\text{ORO}}$	410	409	13.7	1.49	412	26.6	1.67
$\alpha_{\text{OPF}}$ , X		397	18.4	0.65	402	10.1	2.01
$\alpha_{\text{OPF}}$ , $\alpha_{\text{OPC}}$ , X		377	8.12	1.20	356	7.36	1.72
$\beta_{\text{OPF}}$ ,		327	7.28	0.91	314	4.48	0.95
$\alpha_{\text{FPO}}$ , $\beta_{\text{OPF}}$		258	0.32	1.22	262	0.12	1.10
$\beta_{\text{OPC}}$ , XX		225	1.98	1.43	214	1.11	1.94
XXPC		167	1.32	0.14	171	0.10	0.10
XX, $\beta_{\text{COP}}$		150	7.52	0.62	127	7.97	0.40
XX		89	2.22	0.47	58	1.66	0.14
XXOP		51	1.08	0.21	44	0.63	0.19
XXCO		29	2.69	0.07	21	2.11	0.09

Примечание. Частоты колебаний в  $\text{см}^{-1}$ , интенсивности в спектрах ИК в  $\text{Км/Моль}$ , в спектрах КР в  $\text{Å}^4/\text{а.е.м.}$

Поскольку мы не располагаем экспериментальными данными по колебательным спектрам циклозарина, то представленные в табл.2, 3 масштабированные [6] частоты колебаний ( $\nu_m$ ) следует считать предсказательными результатами, которые, для сравнения, сопоставлены с экспериментальной интерпретацией колебательного спектра циклогексана, предложенной в монографии [2], и модельным расчетом методом DFT/B3LYP/6-311+G(d,p).

Для токсичного фрагмента результаты модельных расчетов частот колебаний сопоставлены с экспериментом для зарина и зомана [7, 8] и теоретической интерпретацией [3].

Таблица 3

Интерпретация колебаний циклогексанового остова циклозарина

Форма колеб	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>		Конформер_1			Конформер_2		
	$\nu_{\text{экс}}[2]$	$\nu_m$	$\nu_m$	ИК	КР	$\nu_m$	ИК	КР
$\alpha$		1460	1448	11.1	4.51	1460	11.9	3.93
$\alpha$	1445	1457	1445	7.29	5.14	1448	4.15	4.79
$\alpha$		1451	1440	4.08	8.50	1444	0.51	10.5
$\alpha, \beta$		1444	1431	5.38	10.8	1434	7.24	6.57
$\beta, \alpha$	1348	1337	1359	5.17	1.93	1361	9.79	4.87
$\beta$	1342	1329	1339	0.23	1.03	1336	2.26	1.77
$\alpha, \beta$		1312	1327	1.93	6.61	1319	1.59	1.53
$\beta$	1268	1257	1261	3.69	14.15	1262	2.65	5.62
$\beta$	1262	1231	1254	5.10	6.71	1239	21.4	9.47
$\beta$		1221	1229	5.85	1.55	1211	7.07	1.23
$\beta, Q$	1158	1139	1142	7.09	2.31	1163	1.63	1.09
$\beta$		1118	1112	2.75	0.69	1115	3.40	1.40
$\beta$	1110	1083	1110	2.15	0.93	1106	4.92	2.12
$Q, \beta$		1065	1055	0.47	0.45	1076	6.85	1.98
$Q, \beta$	1029	1025	1018	3.78	5.64	1046	2.20	5.37
$Q, \beta$		999	1011	7.67	7.50	1004	0.25	7.20
$\beta$	906	916	917	13.4	0.86	940	6.48	2.61
$\beta$	862	879	861	6.90	1.54	868	6.18	0.98
$Q, \beta$		845	856	4.17	0.50	855	3.50	0.89
$Q$	802	781	793	2.41	16.4	798	5.69	17.1
$\beta$	785	758	764	1.31	0.66	752	1.46	0.33
$\gamma$		748	601	5.15	6.83	562	6.03	1.15

Колебания алкильного фрагмента из рассмотрения исключены [2], как и частоты валентных колебаний связей СН для циклогексанового фрагмента. Для задачи спектральной идентификации циклозарина они интереса не представляют. Расчетные данные по ним хорошо согласуются с соответствующими частотами фрагмента СН<sup>3</sup> и циклогексана, как по частоте, так и по интенсивности, приведенными в монографии [2]. Отметим только, что по отношению к валентным колебаниям метильной группы токсичного фрагмента они смещены в низкочастотную область на величину от 40 до 100 см<sup>-1</sup>.

Анализ представленных в табл. 3 результатов модельного расчета частот, форм нормальных колебаний и интенсивностей в ИК и КР спектрах дает основание сделать вывод, что их использование для идентификации конформеров затруднено. Различие в частотах для одинаково интерпретируемых колебаний не превышает 40 см<sup>-1</sup>, не наблюдается резких изменений интенсивностей полос в ИК и КР спектрах. Как в самом циклогексане [2], полосы рассматриваемого частотного диапазона по интенсивности значительно уступают интенсивностям полос, интерпретированных как валентные колебания связей СН.

Наличие сильных по интенсивности ИК полос в диапазонах 720-870 см<sup>-1</sup>, 920-1020 см<sup>-1</sup> и 1270-1330 см<sup>-1</sup>, интерпретированных как валентные колебания связей РС, РF, ОР, Р=О характерны для всех соединений группы G-agents (зарин, зоман, циклозарин), содержащих общий по геометрической и электронной структуре фрагмент. Идентификация

конформеров по указанным полосам представляет лишь теоретический интерес. В практическом плане такая идентификация затруднена, поскольку различие в вычисленных значениях частот и интенсивностей в ИК и КР спектрах не столь существенны. Что касается диапазона ниже  $400\text{ см}^{-1}$ , то эксперимент для этого диапазона в использованной литературе не приводится, а проведенные модельные расчеты указывают на низкую интенсивность полос в обоих спектрах.

### Выводы

1. Неэмпирические квантовые методы DFT/b3LYP позволяют осуществлять предсказательные расчеты геометрической и электронной структуры соединений группы G-agents. Выбор базиса расчета не меняет качественной оценки интенсивности полос в колебательных спектрах, а при анализе геометрической структуры и конформационных свойств циклозарина - и количественных значений.

2. Идентификацию токсичного фрагмента можно осуществлять по интенсивным полосам ИК спектра в диапазоне  $700\text{-}1300\text{ см}^{-1}$ . Идентификация конформеров циклозарина по положению и интенсивностям колебательных полос затруднена.

3. Качественная оценка ангармонического смещения полос можно осуществлять в рамках процедуры масштабирования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Inscore F., Gift A., Maksymiuk P., Farquharson S. Characterization of chemical warfare G-agent hydrolysis products by surface-enhanced Raman spectroscopy. SPIE-2004-5585 (2004) P. 46-52.

2. Свердлов Л.М., Ковнер М.А., Крайнов Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул. М.: Наука, 1970. 559 с.

3. Элькин М.Д., Колесникова О.В., Гречухина О.Н. Возможности информационной технологии "Gaussian" в моделировании колебательных спектров фосфорорганических соединений // Вестник СГТУ. 2008. №2(32). Выпуск 1. С. 105-112.

4. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. and auth. Gaussian, Inc., Pittsburgh PA. 2003.

5. Браун П.А., Киселев А.А. Введение в теорию молекулярных спектров. Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1983. 324 с.

6. Краснощеков С.В., Степанов Н.Ф. Масштабирующие множители как эффективные параметры для коррекции неэмпирического силового поля // Журнал Физической Химии. Т.81. №4. 2007. С. 680-689.

7. Braue Ernest H., Pannella Michael G. Jr. FT-Ir Analysis of Warfare Agents // Applied Spectrosc. 44. N.9. 1990. P. 1513-1520.

8. Organisation for the prohibition of chemical weapons. Cert. No DB/007 (2001) Infrared-Spectrometry.

#### **Пулин Виктор Федотович –**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета

#### **Pulin Victor Fedotovich –**

Candidate of Science in Physics and Mathematics, Assistant Professor of the Department «Physics», Saratov State Technical University

#### **Элькин Павел Михайлович –**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической физики и информационных технологий Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

#### **Elkin Pavel Mihailovich –**

Candidate of Science in Physics and Mathematics, Assistant Professor of the Department «Technical Physics and Information Technologies», Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

**Степанович Екатерина Юрьевна** –  
ассистент кафедры общей физики  
Астраханского государственного университета

**Stepanovich Ekaterina Yuryevna** –  
Assistant of the Department “Physics”,  
Astrakhan State University

**Минаев Евгений Николаевич** –  
доктор технических наук, профессор кафедры  
физики Саратовского государственного  
технического университета

**Minaev Evgeny Nikolaevich** –  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department “Physics”, Saratov State  
Technical University

*Статья поступила в редакцию 02.03.2011, принята к опубликованию 08.07.2011*

УДК 539.194: 541.183.12

**В.Ф. Пулин, П.М. Элькин, М.А. Эрман****МОДЕЛИРОВАНИЕ АДИАБАТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ  
ГИДРОКСИЗАМЕЩЕННЫХ БЕНЗОЛА**

*В рамках неэмпирических квантовых расчетов электронной структуры гидроксизамещенных бензола проведено исследование формы адиабатического потенциала возможных изомеров соединений.*

Колебательные состояния, гидроксильный фрагмент, ангармоничность, замещенные бензола

**V. F. Pulin, P.M. Elkin, M.A. Erman****MODELLING OF ADIABATIC POTENTIAL  
FOR HYDROXY SUBSTITUTED BENZENES**

*Investigation of adiabatic potential parameters for isomers of hydroxyl substituted benzene is carried using unempirical methods.*

*Vibrational spectra, hydroxyl fragment, anharmonicity, substituted of benzenes*

**Введение.** Цель данной работы – оценка конформационных свойств и колебательных состояний моно ( $C_6H_5X$ )- и дигидроксизамещенных ( $C_6H_4X_2$ ) бензола ( $X=OH$ ), основанный на модельных расчетах параметров адиабатического потенциала исследуемых соединений в рамках гибридного метода функционала плотности DFT/b3LYP [1] с учетом ангармонизма колебаний.

Из соображений симметрии, к примеру, для моногидроксибензола плоскости бензольного кольца и фрагмента СОН должны быть нормальны друг к другу. Однако результаты, представленные в публикациях [2, 3], свидетельствуют об обратном: фрагмент СОН лежит в плоскости кольца.

Для дигидроксизамещенных бензола (орто-, мета-, пара- [4]) возможно наличие изомеров, связанных с взаимным расположением гидроксильных фрагментов как относительно плоскости шестичленного кольца так и относительно друг друга.

**Ангармоническая модель молекулярных колебаний.**

Для описания молекулярных колебаний будем исходить из модельного гамильтониана во втором порядке теории возмущения вида [5]:

$$2H = v_s(P_s^2 + (Q^s)^2)/2 + \mu^{1/4} P_\alpha \mu^{-1/4} P_\beta \mu^{1/4} + 1/3 F_{rst} Q^r Q^s Q^t + 1/12 F_{rstu} Q^r Q^s Q^t Q^u, \quad (1)$$

где  $P_\alpha = L(\alpha; sr) Q^s P_r$ ;  
 $L(\alpha; sr)$  – постоянные Кориолиса,  
 $v_s$  – частоты гармонических колебаний (в  $cm^{-1}$ );



$Q^s$  – безразмерные нормальные колебательные координаты, линейно связанные с декартовыми смещениями атомов;

$F_{srt}$  и  $F_{srtu}$  – кубические и квартичные силовые постоянные (параметры разложения адиабатического потенциала молекулы).

Решение уравнения (1) методами теории возмущения известно [5]:

$$E^V = v_s(V_s + 1/2) + \chi_{sr}(V_s + 1/2)(V_r + 1/2). \quad (2)$$

Здесь  $V_s$  – квантовые числа рассматриваемого колебательного состояния.

Полученные нами в рамках классической схемы теории возмущения [6] ангармонические постоянные  $\chi_{sr}$  в выражении (2) имеют вид [5]:

$$\chi_{ss} = 1/16F_{ssss} - 5/48(F_{sss})^2/v_s + 1/32(F_{ssr})^2(1/(2v_s - v_r) - 1/(2v_s + v_r) - 4/v_r) (1 - \delta_{sr}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \chi_{sr} = & 1/16F_{ssrr} - 1/8(F_{ssr})^2(1/(2v_s - v_r) + 1/(2v_s + v_r)) (1 - \delta_{sr}) + 3/8(F_{srt})^2 (1/(v_s + v_r + v_t) + \\ & 1/(v_t - v_r - v_s) + 1/(v_s + v_t - v_r) + 1/(v_t + v_r - v_s)) (1 - \delta_{sr}) (1 - \delta_{st}) (1 - \delta_{rt}) + \\ & L(a;sr)^2/(1/(v_s + v_r) + 1/(v_s - v_r))/2. \end{aligned} \quad (4)$$

Анализ гармонических и ангармонических параметров адиабатического потенциала (квадратичных, кубических и квартичных силовых постоянных), конформационных свойств исследуемых гидроксизамещенных фенола осуществлялся в различных атомных базисах: от 6-31G\* до 6-311++G\*\*, что позволило выяснить влияние поляризационных и диффузионных свойств базиса на расчетные значения геометрических параметров и силовые постоянные соединений.

Модельные расчеты проводились для различного положения плоскостей гидроксильного фрагмента относительно плоскости шестичленного кольца. Положительные значения частоты крутильного колебания гидроксильного фрагмента ( $\chi_{\text{ССОН}}$ ) достигается лишь для плоской конфигурации соединения. Этот факт исключает возможность свободного вращения фрагмента ОН относительно оси СО и дает основание предполагать наличие двух локальных минимумов для соответствующего сечения адиабатического потенциала, разделенных высоким потенциальным барьером. Подобная ситуация имеет место для молекулы аммиака [4].

Замещение атома водорода на гидроксильный фрагмент ОН приводит к изменению длин валентных связей бензольного остова в пределах 0.01 Å. Для валентных углов это изменение не превышает 0.6°.

Оптимизация геометрии дает следующую оценку параметрам фрагмента СОН:  $R_{\text{CO}} = 1.37 \text{ Å}$ ,  $R_{\text{ОН}} = 0.97 \text{ Å}$ ,  $\angle_{\text{СОН}} = 108.3 - 109.7^\circ$ .

Значения смежных валентных углов  $\text{ССО} \sim 117^\circ$  и  $123^\circ$ . Смена атомного базиса сказывается на третьем знаке мантиссы для длин связей и втором для валентных углов.

Выбор атомного базиса несущественно отражается на величинах рассчитанных частот фундаментальных колебаний моно- и дигидроксизамещенных бензола в гармоническом приближении. Исключение составляет значение частоты валентного колебания связи ОН. Различие достигает величины  $\sim 80 \text{ см}^{-1}$ .

Для оценки ангармонического смещения частот фундаментальных колебаний воспользуемся формулами (3) и (4), поскольку формальное использование для этих целей технологии “Gaussian” наталкивается на проблему достоверности результатов расчета кубических и квартичных силовых постоянных.

Для гидроксизамещенных бензола модельные расчеты указанных силовых постоянных, связанных с низкочастотными колебаниями, дают значения, значительно превышающие оценки частот соответствующих фундаментальных колебаний. Вопрос о

применимости теории возмущения к таким колебаниям отпадает, а формализованные ангармонические расчеты в рамках технологии “Gaussian” в таком случае лишены смысла.

Таким образом, оценка ангармонического смещения частот для гидроксизамещенных бензола в рамках метода DFT/b3LYP корректно может быть осуществлена лишь для высокочастотной области спектра, к примеру, для валентных колебаний связей ОН.

Согласно проведенным модельным расчетам имеет место характеристичность кубических ( $F_{sss}$ ) и квартичных ( $F_{ssss}$ ) силовых постоянных (в естественных координатах), значения которых укладываются, соответственно, в интервалы  $2590-2610 \text{ см}^{-1}$  и  $1505-1580 \text{ см}^{-1}$ . Кубическими и квартичными силовыми постоянными, определяющими связь валентных колебаний фрагментов ОН в дигидроксизамещенных бензола можно пренебречь. Оценить ангармоническое смещение фундаментальных колебаний можно по первым двум слагаемым в выражении (3).

Набор фундаментальных колебаний моно- и дигидроксизамещенных бензола можно разделить на две части. Первая часть включает колебания бензольного остова, вторая связана с колебаниями фрагментов СОН. В табл. 1-4 предложена интерпретация тех фундаментальных колебаний, в которых участвуют фрагменты СОН. При этом мы ограничились лишь интенсивными в спектрах ИК и КР полосами. Интерпретация колебаний бензольного остова ( $\text{C}_6\text{H}_5$  и  $\text{C}_6\text{H}_4$ ) находится в полном согласии с подобной интерпретацией моно- и дизамещенных бензола, представленной в монографии [4].

Таблица 1

Интерпретация колебательного спектра моногидроксифенола

Симметрия	Форма	$\nu_{\text{экс}} [2,3]$	$\nu_{\Gamma}$	$\nu_{\text{M}}$	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
A'	$\rho_{\text{ОН}}$	3615	3834	3639	3636	54.1	106
A'	$\beta, \beta_{\text{ОН}}$	1326 [7]	1371	1330	1338	35.1	0.32
A'	$Q_{\text{CO}}, \beta$	1260	1289	1251	1260	78.5	7.97
A'	$\beta_{\text{ОН}}, \beta, Q$	1176	1200	1165	1175	138	4.97
A'	$\beta_{\text{CO}}$	423	406	397	405	9.95	0.39
A''	$\rho_{\text{CO}}, \chi$	501	516	504	511	13.3	0.10
A''	$\chi_{\text{ОН}}$	303	342	335	-	111	2.77

Примечание. Частоты колебаний в  $\text{см}^{-1}$ , интенсивности в спектрах ИК в  $\text{км/моль}$ , в спектрах КР в  $\text{Å/а.е.м.}$

Интенсивные в ИК и КР спектрах полосы, интерпретированные как валентные колебания связей ОН, служат надежным признаком спектральной идентификации соединений. В рамках каждого типа дигидроксизамещенных бензола по интенсивностям ряда полос в ИК спектрах можно идентифицировать конформационную модель. Для парадигробензола (табл. 2) это, в первую очередь, полосы  $\sim 1360 \text{ см}^{-1}$ ,  $1200 \text{ см}^{-1}$ . Для ортодигробензола (табл. 3) следует обратить внимание на четыре полосы в диапазоне  $1370-1150 \text{ см}^{-1}$ . Полосы в этом же диапазоне позволяют идентифицировать модели метадиброфенола (Табл. 4).

Таблица 2

Интерпретация колебательных состояний парадигробензола

Форма Колеб.	Модель симметрии $\text{C}_{2\text{h}}$				Модель симметрии $\text{C}_{2\text{v}}$				
	Тип	$\nu_{\Gamma}$	$\nu_{\text{M}}$	ИК/КР	Тип	$\nu_{\Gamma}$	$\nu_{\text{M}}$	ИК	КР
$\rho_{\text{ОН}}$	AG	3839	3644	210	A1	3839	3644	42.6	151
$\rho_{\text{ОН}}$	BV	3838	3643	110	B2	3838	3643	63.7	57.3
$Q, \beta_{\text{ОН}}$	BV	1362	1321	59.1	A1	1363	1322	10.1	2.63
$\beta, \beta_{\text{ОН}}$	AG	1361	1320	1.27	B2	1357	1316	102	0.56
$Q_{\text{CO}}$	AG	1295	1257	18.2	A1	1296	1258	0.02	18.5
$Q_{\text{CO}}, \gamma, \beta$	BV	1270	1233	165	B2	1271	1233	123	0.27

$\beta_{\text{OH}}, \beta$	AG	1205	1170	9.75	B2	1201	1167	325	3.66
$\beta_{\text{OH}}, Q, \beta$	BU	1188	1154	282	A1	1186	1152	9.40	4.09
$\beta_{\text{CO}}$	AG	449	438	0.45	B2	448	438	22.3	0.18
$\beta_{\text{CO}}$	BU	343	335	17.4	A1	342	335	0.01	0.40
$\rho_{\text{CO}}, \chi$	AU	520	508	23.5	B1	519	507	23.6	0.00
$\chi_{\text{OH}}$	AU	300	293	221	B1	298	292	219	1.67

Таблица 3

## Интерпретация колебательного спектра ортодигидроксифенола

Форма Колеб.	Модель симметрии $C_s$					Модель симметрии $C_{2v}$				
	Тип	$\nu_T$	$\nu_M$	ИК	КР	Тип	$\nu_T$	$\nu_M$	ИК	КР
$\rho_{\text{OH}}$	A'	3850	3655	73.7	106	A1	3835	3640	13.7	171
$\rho_{\text{OH}}$	A'	3789	3598	93.9	62.4	B2	3834	3639	101	42.6
$Q, \beta, \beta_{\text{OH}}$	A'	1401	1358	36.1	2.37	A1	1379	1337	69.7	7.32
$\beta, \beta_{\text{OH}}$	A'	1363	1322	66.1	1.61	B2	1370	1328	11.8	1.16
$Q_{\text{CO}}, Q, \beta$	A'	1299	1261	177	7.07	A1	1308	1270	134	7.55
$Q_{\text{CO}}, \beta$	A'	1274	1236	81.9	1.86	B2	1286	1248	24.2	3.32
$\beta_{\text{OH}}, Q$	A'	1212	1177	44.1	4.25	A1	1200	1165	314	0.45
$\beta_{\text{OH}}, \beta$	A'	1170	1137	95.1	3.52	B2	1186	1152	14.4	3.45
$\beta_{\text{CO}}$	A'	448	438	7.77	0.76	B2	454	443	4.06	1.29
$\beta_{\text{CO}}$	A'	310	304	5.02	0.27	A1	311	305	12.2	0.63
$\rho_{\text{CO}}, \chi$	A''	459	449	4.14	1.04	B1	462	452	1.70	0.28
$\chi_{\text{OH}}$	A''	429	419	72.7	1.10	B1	344	336	174	1.45

Таблица 4

## Интерпретация колебательных состояний метадиоксифенола

Форма колеб	Модель сим. $C_s$				Модель сим. $C_{2v}$				Модель сим. $C_{2v}$			
	Тип	$\nu_M$	ИК	КР	Тип	$\nu_M$	ИК	КР	Тип	$\nu_M$	ИК	КР
$\rho_{\text{OH}}$	A'	3639	55.3	110	A1	3641	4.30	206	A1	3641	90.5	158
$\rho_{\text{OH}}$	A'	3637	58.9	96.5	B2	3640	112	1.54	B2	3640	12.2	43.7
$Q, \beta_{\text{OH}}$	A'	1337	22.5	1.10	B2	1333	139	0.02	A1	1335	56.5	1.47
$\beta, \beta_{\text{OH}}$	A'	1307	6.11	3.06	B2	1303	37.7	1.02	A1	1301	30.1	8.37
$Q_{\text{CO}}, \gamma$	A'	1295	72.8	7.64	A1	1294	76.6	9.72	B2	1184	98.9	4.95
$\beta_{\text{OH}}, Q_{\text{CO}}$	A'	1196	13.2	2.81	B2	1201	0.06	0.93	B2	1178	123	0.09
$\beta_{\text{OH}}, Q_{\text{CO}}$	A'	1170	243	2.92	A1	1181	62.8	4.92	B2	1152	108	4.27
$\beta$	A'	1138	135	2.25	B2	1123	223	0.08	B2	1134	138	0.84
$\beta_{\text{CO}}$	A'	468	6.67	0.24	B2	464	17.6	0.20	A1	471	21.9	0.18
$\beta_{\text{CO}}$	A'	325	11.7	0.80	A1	326	3.31	0.26	A1	325	4.18	1.40
$\rho_{\text{CO}}, \chi$	A''	668	15.9	0.03	B1	664	15.1	0.04	B1	667	19.5	0.00
$\chi_{\text{OH}}$	A''	330	38.2	3.72	B1	327	206	0.02	B1	320	210	4.12

Идентификация соединений в диапазоне ниже  $1700 \text{ см}^{-1}$  по КР спектрам соединений затруднена ввиду низких значений интенсивностей.

Отметим также хорошее согласие результатов, полученных масштабированием частот колебаний с параметрами из работы [7], с оценкой ангармонического смещения частот на основании квантовых расчетов параметров адиабатического потенциала.

**Заключение.** Результаты проведенного вычислительного эксперимента в рамках предложенной схемы оценки ангармонического смещения полос дают основание утверждать, что методы функционала плотности позволяют осуществлять предсказательные расчеты геометрической структуры и колебательных состояний циклических соединений, содержащих гидроксильные фрагменты. Ангармоническое смещение полос можно оценить с помощью процедуры масштабирования. Использование численных методов для оценки

ангармонических параметров адиабатического потенциала, заложенных в технологии “Gaussian”, для низкочастотной области может привести к некорректным результатам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H.B. and ath. Gaussian 03, Revision B.03, Gaussian.Inc., Pittsburgh PA(2003).
2. Evans J.C. The vibrational spectra phenol and phenol-OD // Spectrochim. Acta, 1960. 26A. №16. P. 1913-1938.
3. Rao P.R., Rao G.R. Vibrational analysis of substituted phenols //Spectrochim. Acta, 2002. 58A. №14. P. 3039-3065.
4. Свердлов Л.М., Ковнер М.А., Крайнов Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул. М.: Наука, 1970. 560 с.
5. Hoy A.R. , Mills I.M., Strey G. Anharmonic force constants calculation. // J. Mol. Phys. 21. N.6 (1972). P. 1265-1290.
6. Эрман Е.А., Элькин М.Д., Джалмухамбетова Е.А. Модельные оценки ангармонического смещения полос в колебательных спектрах димеров карбоновых кислот // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2010. №4 (12). С. 53-58.
7. Элькин М.Д., Шальнова Т.А., Пулин В.Ф. Моделирование адиабатических потенциалов карбоновых кислот // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. №1(37), С. 109-114.

**Элькин Павел Михайлович –**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Техническая физика и информационные технологии» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

**Elkin Pavel Mihailovich –**

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Assistant Professor of the Department “Technical Physics and Information Technologies”, Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

**Пулин Виктор Федотович –**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Саратовского государственного технического университета

**Pulin Victor Fedotovitch –**

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Assistant Professor of the Department of «Physics», Saratov State Technical University

**Эрман Михаил Анатольевич –**

аспирант кафедры «Информационные технологии» Астраханского государственного технического университета

**Erman Mikhail Anatolievich –**

Graduate Student of Department of the «Informatics Technologies», Astrahan Technical University

*Статья поступила в редакцию 22.01.2011, принята к опубликованию 10.06.2011*

УДК 615.47

**А.В. Власов, Н.В. Корнилова**

**ОЦЕНКА ОСЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ МАГНИТОЖИДКОСТНЫМИ СЕНСОРАМИ**

*Решена задача оценки осевой компоненты электромагнитного поля при управлении магнитожидкостными сенсорами.*

Электромагнитное поле, магнитожидкостный сенсор, многослойная электромагнитная обмотка

**A.V. Vlasov, N.V. Kornilova**

**ASSESSMENT OF AXIAL COMPONENT OF ELECTROMAGNETIC FIELDS  
BY MANAGEMENT OF MAGNETIC-FLUID SENSORS**

*Task of axial component of electromagnetic fields by management magnetic-fluid sensors is resolved.*

Electromagnetic field, magnetic-fluid sensor, laminated electromagnetic winding

Разработка и исследование новых элементов электрогидравлических систем управления позволили расширить области использования гидрофицированного технологического оборудования не только в технических системах, но и в медицине, фармакологии, пищевых производствах. Одним из перспективных направлений разработки является создание электрогидравлических и гидроэлектрических магнитожидкостных элементов систем управления, основанных на управлении магнитной жидкостью, заключенной в упругую оболочку [1-3]. Одной из важнейших задач при разработке таких элементов является синтез управляющей электромагнитной оболочки, предназначенной для формирования функционально заданного в пространстве градиента управляющего магнитного поля [4, 5]. В настоящей работе предложены расчетные соотношения для оценки осевой компоненты магнитного поля управляющей цилиндрической обмотки электромагнитной оболочки.

Волновой насос и одностворчатый клапан с магнитожидкостными сенсорами (МЖС) относятся к элементной базе нового поколения аппарата «Искусственное сердце» [6, 7]. Отличительной особенностью таких устройств является то, что трение скольжения между МЖС и патрубками проточной части отсутствует. Здесь присутствует трение качения. Это свойство элементов с МЖС является определяющим в медицине при создании аппарата искусственное сердце, где трение скольжения является основной причиной разрушения формообразующих элементов крови – лейкоцитов [8]. Устройства с МЖС лишены этого недостатка: в них разрушения формообразующих элементов крови не происходит. Функциональная схема элементов управления потоками жидкостей с МЖС состоит из 6 блоков (рис. 1).

Первым блоком является преобразователь напряжение - ток  $U \rightarrow I$ . Это блок, где напряжение на управляющей обмотке преобразуется в ток. Динамика такого блока должна описываться в операторах систем с сосредоточенными параметрами (ССП). Второй блок - это преобразователь ток – напряженность магнитного поля вокруг управляющей обмотки  $I \rightarrow \bar{H}$ . Динамика такого блока должна описываться в операторах систем с распределенными параметрами (СПП). Третий блок - это преобразователь градиента

напряженности магнитного поля в объемную плотность силы вокруг обмотки управления  $\nabla H \rightarrow f_M$ . Уравнение преобразования здесь простое [4]:

$$f_M = \mu_0 M \nabla H,$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$M$  - максимальная намагниченность насыщения МЖ, А/м;

$\nabla H$  - градиент напряженности магнитного поля, А/м<sup>2</sup>;

$f_M$  - объемная плотность силы втягивания МЖ в область неоднородного магнитного поля, Н/м<sup>3</sup>.

Динамика такого блока должна описываться в операторах ССП.

Четвертый блок – это преобразователь объемной плотности силы вокруг управляющей обмотки в перемещение МЖС  $f_M \rightarrow L$ . Динамика такого блока должна описываться в операторах СРП. Пятый блок - это преобразователь перемещения МЖС в гидравлическое сопротивление проточной части элемента  $L \rightarrow \xi$ . Динамика такого блока должна описываться в операторах СРП. Шестой блок – это преобразователь гидравлического сопротивления проточной части элемента в расход гидравлического контура (проточная часть элемента, соединительные гидравлические диссипаторы, нагрузка)  $\xi \rightarrow Q$ . Динамика такого блока должна описываться в операторах ССП.

Динамика элемента определяется результирующей динамикой всех шести блоков.

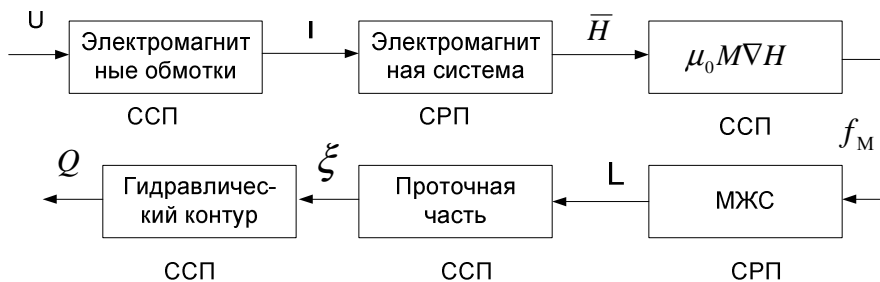


Рис. 1. Функциональная схема электрогидравлического элемента с магнитожидкостным сенсором

Первый и второй блоки представляет интерес для специалистов по расчетам электромагнитных полей. Третий блок анализируется простым пересчетом матрицы значений  $\bar{H}$  в матрицу значений  $f_M$ . Четвертый блок является наиболее инерционным, поэтому динамика электрогидравлического элемента определяется в основном его постоянной времени. Пятый блок анализируется в сосредоточенных параметрах по нормативным коэффициентам гидравлических сопротивлений. Шестой блок представляет интерес для специалистов – гидравликов и его расчет алгоритмически прописан в любом учебнике по гидродинамике.

Остановимся на втором блоке, поскольку он составляет основу электромагнитной управляющей оболочки [9-12].

Рассмотрим частный случай простейшей электромагнитной управляющей оболочки - цилиндрическую обмотку [4, 5] (рис. 2).

На патрубок 1 устанавливается секция электромагнитной обмотки 2, на которую подается управляющее напряжение  $U_1$ . МЖС 3 представляет собой упругую оболочку из каучука, которая заполнена магнитной жидкостью. При подаче управляющего напряжения на секцию у МЖС образуется гребень, который при возрастании управляющего напряжения полностью перекрывает поперечное сечение патрубка 1. Когда гребень не перекрывает поперечное сечение, в патрубке может образовываться поток рабочей жидкости  $Q$ . Когда поперечное сечение перекрыто, потока нет ( $Q=0$ ).

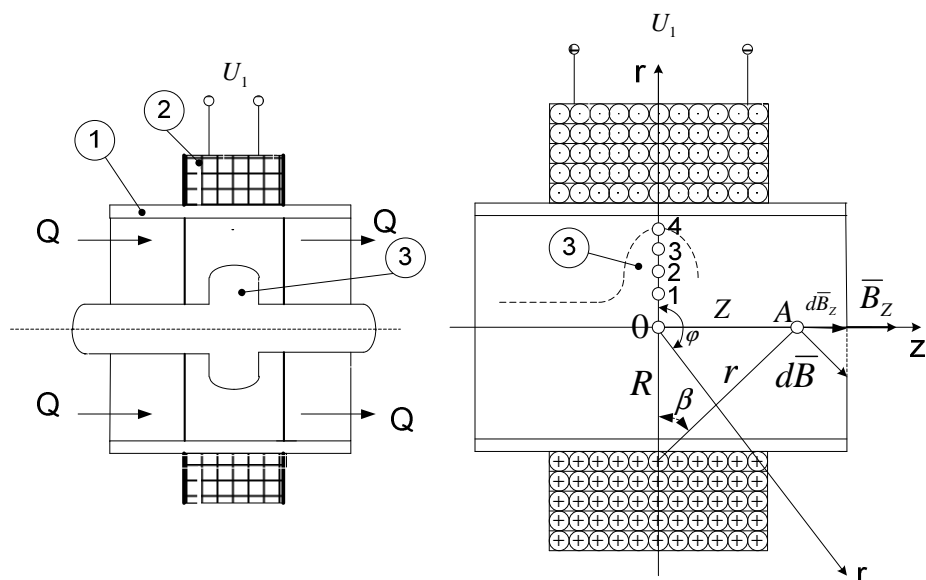


Рис. 2. Цилиндрическая обмотка управления с магнитожидкостным сенсором

Именно поэтому такое устройство может использоваться как в качестве коммутатора потоков (клапана), так и в качестве волнового насоса, если на патрубке 1 установлено несколько обмоток, например 5. В электромагнитном клапане гребень 3 МЖС под действием управляющего поля перемещается от центральной оси патрубка 1 к стенкам патрубка 1, перекрывая в той или иной степени поперечное сечение проточной части. В волновом насосе такое поперечное перемещение гребня 3 МЖС сочетается с продольным перемещением его вдоль проточной части под действием нескольких обмоток управления, создавая поток (волну) жидкости.

Допустим, что ток в управляющей обмотке направлен от нас (в нижнем сечении обмотки) и к нам (в верхнем сечении обмотки). Выберем цилиндрическую систему координат  $r, \varphi, z$  с центром на оси проточной части в точке 0. Каждый виток обмотки управления с током  $I$  создает вокруг себя магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ , причем при указанном направлении протекания тока в обмотке вектор индукции  $\vec{B}$  будет направлен слева направо (правило буравчика).

Определение вектора  $\vec{B}$  в любой точке проточной части при ограниченных размерах электромагнитных обмоток управления является необходимым условием синтеза как электромагнитного клапана с МЖС, так и волнового насоса с МЖС. Без этого ни статической, ни динамической характеристики этих элементов получить невозможно. Причем, если учесть тот факт, что МЖС всегда перемещается в проточной части в область наибольшей напряженности магнитного поля, то становится очевидным что приближенные методы расчета магнитных полей (типа эквивалентного витка) здесь использоваться не могут.

В классической литературе [13-16] внимание в основном уделено осевой компоненте магнитного поля, а именно компоненте  $\vec{B}_z$ . А что касается компонент  $\vec{B}_z, \vec{B}_\varphi, \vec{B}_r$  на торцах обмотки и за их пределами, то аналитических методов расчета этих компонент до сих пор нет. Облегчает задачу осевая симметрия обмоток и автомодельность трехмерной модели по компоненте  $\vec{B}_\varphi$ . В результате задача может быть сведена к двумерной.

Оценим осевую компоненту  $\vec{B}_z$  в проточной части, т.е. в пределах ширины управляющей обмотки. По закону Био-Савара-Лапласа [13,14], элементарная слагающая магнитной индукции  $d\vec{B}$  в неферромагнитной среде создается элементом тока  $Idl$  в точке, удаленной от элемента  $dl$  на расстояние  $R$ :

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{dl \times \mathbf{1}_R}{R^2}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{1}_R$  - ортогональный поперечному сечению проводника единичный радиус-вектор элемента длины проводника с током  $dl$ .

Результирующая магнитная индукция в рассматриваемой точке, создаваемая током, проходящим по проводнику длиной  $l$ , составит:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl \times \mathbf{1}_R}{R^2}. \quad (2)$$

Используем (1) и (2) для оценки осевой компоненты  $\bar{B}_Z$ , которая создается кольцевым витком тока, находящимся на оси, проходящей через начало координат в точке 0. Т.е. допустим для начала, что у обмотки управления имеется всего один виток, находящийся в начале координат и уложенный в нижний слой обмотки на расстоянии  $R$  от оси  $Z$ . Кольцевой виток будет образовывать в каждой точке оси  $Z$  конус векторов  $d\bar{B}$ , ортогональных к текущему радиусу  $r$ , соединяющему центр сечения кольцевого витка с текущей точкой  $A$  оси  $Z$ . Это означает, что для нахождения вектора  $d\bar{B}_Z$  достаточно сложить проекции векторов  $d\bar{B}$  на ось  $Z$ . Каждая такая проекция имеет вид:

$$dB_Z = dB \cdot \cos\beta. \quad (3)$$

Интегрируя (3) по всем  $dl$  (по длине кольцевого витка равной  $2\pi R$ ) и учитывая, что  $\cos\beta = \frac{R}{r}$  и  $r = \sqrt{(Z^2 + R^2)}$ , получим:

$$B_Z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{(Z^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

Таким образом, один кольцевой виток с током  $I$  создает в каждой точке оси  $Z$  осевую компоненту магнитного поля  $B_Z$ , которую можно точно вычислить по формуле (4). В частности, при  $Z = 0$  (непосредственно под кольцевым витком) на оси  $Z$  осевая компонента индукции магнитного поля составит

$$B_Z = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (5)$$

Теперь переходим к случаю, когда управляющая обмотка имеет  $N_1$  кольцевых витков, уложенных в один слой, расположенный на расстоянии  $R$  от оси  $Z$ . Каждый из  $N_1$  кольцевых витков будет создавать в каждой точке оси  $Z$  вектор магнитной индукции  $B_Z$ , который можно вычислить по формуле (4). В силу симметрии обмотки управления относительно оси  $Z$  можно положить, что центральный виток создает одинаковое магнитное поле как слева, так и справа от начала координат. Именно поэтому можно анализировать только одну половину обмотки управления. Для анализа рассмотрим рисунок правой половины обмотки, на которой изображены расчетные векторы и расстояния. Второй кольцевой виток относительно центрального смещен вправо на диаметр провода. Это означает, что второй правый кольцевой виток будет создавать в каждой точке оси  $Z$  осевую компоненту магнитного поля  $B_Z$  (формула (4)), если в ней заменить  $Z$  на  $(Z - d_{\text{п}})$ , где  $d_{\text{п}}$  - диаметр провода, м. Таким образом, если центральный кольцевой виток (расположенный в плоскости, проходящей через начало координат 0) создает в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{z0} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{(Z^2 + R^2)^{3/2}}, \quad (6)$$



то соседний правый кольцевой виток создаст в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{Z+1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{((Z - d_{\Pi})^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (7)$$

Второй правый кольцевой виток создаст в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{Z+2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{((Z - 2d_{\Pi})^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (8)$$

В общем случае  $i$ -й правый кольцевой виток создаст в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{Z+i} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{((Z - i \cdot d_{\Pi})^2 + R^2)^{3/2}} \quad (9)$$

Последний правый (последний от центрального вправо) кольцевой виток создаст в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{Z+\frac{N_1}{2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{((Z - \frac{N_1}{2} d_{\Pi})^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (10)$$

Т.о. получается, что правые витки в правой части обмотки учтены. Теперь переходим к левой половине обмотки. Рассмотрим влияние каждого кольцевого витка левой половины обмотки на правую полуось  $Z$  обмотки. Вместо знаков «минус» в выражении координаты  $Z$  надо ставить знак «плюс» для приведения левых витков первого слоя обмотки к началу координат. Соседний левый (первый от центрального влево) кольцевой виток создаст в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{Z-1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{((Z + d_{\Pi})^2 + R^2)^{3/2}} \quad (11)$$

Второй левый (второй от центрального влево) кольцевой виток создаст в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{Z-2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{((Z + 2d_{\Pi})^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (12)$$

В общем случае  $i$ -й левый кольцевой виток создаст в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{Z-i} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{((Z + i \cdot d_{\Pi})^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (13)$$

Последний левый (последний от центрального влево) кольцевой виток создаст в каждой точке оси  $Z$  (в правой части обмотки) осевую компоненту:

$$B_{Z-\frac{N_1}{2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2\pi R^2}{((Z + \frac{N_1}{2} d_{\Pi})^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (14)$$

Итак, для получения вектора магнитной индукции  $B_z$  на оси  $Z$  обмотки, которая создается первым слоем кольцевых витков, все компоненты необходимо сложить. После несложных преобразований можно получить:

$$B_{Z1} = B_{Z0} + \sum_{i=1}^{N_1/2} B_{Z+i} + \sum_{i=1}^{N_1/2} B_{Z-i} = \frac{\mu_0 I R^2}{2} \left( \sum_{i=0}^{N_1/2} (Z + i \cdot d_{\Pi})^2 + R^2 \right)^{-3/2} + \left( \sum_{i=0}^{N_1/2} (Z - i \cdot d_{\Pi})^2 + R^2 \right)^{-3/2}. \quad (15)$$

Переходим ко второму слою управляющей обмотки. Нетрудно догадаться, что он отличается от первого тем, что расположен от оси  $Z$  на расстояние  $(R + d_{\Pi})$ . Таким образом, если заменить в формуле (15)  $R$  на  $(R + d_{\Pi})$ , получим магнитную индукцию на оси  $Z$  от второго слоя обмотки управления:

$$B_{Z2} = B_{Z0} + \sum_{i=1}^{N_1/2} B_{Z+i} + \sum_{i=1}^{N_1/2} B_{Z-i} = \frac{\mu_0 I (R + d_{\Pi})^2}{2} \left( \sum_{i=0}^{N_1/2} (Z + i \cdot d_{\Pi})^2 + (R + d_{\Pi})^2 \right)^{-3/2} + \left( \sum_{i=0}^{N_1/2} (Z - i \cdot d_{\Pi})^2 + (R + d_{\Pi})^2 \right)^{-3/2}. \quad (16)$$

Если заменить в формуле (15)  $R$  на  $(R + 2d_{\Pi})$ , получим магнитную индукцию на оси  $Z$  от третьего слоя обмотки управления:

$$B_{Z3} = B_{Z0} + \sum_{i=1}^{N_1/2} B_{Z+i} + \sum_{i=1}^{N_1/2} B_{Z-i} = \frac{\mu_0 I (R + 2d_{\Pi})^2}{2} \left( \sum_{i=0}^{N_1/2} (Z + i \cdot d_{\Pi})^2 + (R + 2d_{\Pi})^2 \right)^{-3/2} + \left( \sum_{i=0}^{N_1/2} (Z - i \cdot d_{\Pi})^2 + (R + 2d_{\Pi})^2 \right)^{-3/2}. \quad (17)$$

Если слоев катушки  $K$ , то от последнего (внешнего) слоя обмотки управления получим магнитную индукцию на оси  $Z$ :

$$B_{Zk} = B_{Z0} + \sum_{i=1}^{N_1/2} B_{Z+i} + \sum_{i=1}^{N_1/2} B_{Z-i} = \frac{\mu_0 I (R + (k-1)d_{\Pi})^2}{2} \left( \sum_{i=0}^{N_1/2} (Z + i \cdot d_{\Pi})^2 + (R + (k-1)d_{\Pi})^2 \right)^{-3/2} + \left( \sum_{i=0}^{N_1/2} (Z - i \cdot d_{\Pi})^2 + (R + (k-1)d_{\Pi})^2 \right)^{-3/2}. \quad (18)$$

Теперь остается по принципу суперпозиции сложить магнитные индукции на оси  $Z$  от всех слоев управляющей обмотки:

$$B_Z = B_{Z1} + B_{Z2} + B_{Z3} + \dots + B_{ZK} = \sum_{j=1}^K B_{Zj}. \quad (19)$$

Задача решена. Магнитная индукция на оси  $Z$  обмотки определена точно.

Возвратимся к МЖС (позиция 3 на рис. 2). Необходимо определить, куда сместится граница МЖС при подаче управляющего напряжения (позиции 1, 2, 3, 4 в проточной части). Как известно [9], причиной смещения континуума МЖ является плотность объемной силы  $f_M$ , направленная в область с большей напряженностью магнитного поля:

$$f_M = \mu_0 M \nabla H, \quad (20)$$

где  $M$  - максимальная намагниченность МЖ,  $\left[ \frac{A}{M} \right]$ ;

$H$  - напряженность магнитного поля,  $\left[ \frac{A}{M} \right]$ ;  $f_M$ ,  $\frac{Дж}{M^3}$ .

Т.о., сила втягивает контур МЖС в область наибольшей напряженности магнитного поля, создаваемой управляющей обмоткой. Из этого следует, что индукцию  $\bar{B}$  магнитного

поля надо точно знать не только по оси  $Z$ , но и в любой точке проточной части. В силу цилиндрической симметрии достаточно знать распределение индукции  $\bar{B}$  по текущему радиусу  $r$  проточной части устройства, т.е. надо уметь определять и компоненту  $B_r$ .

Определение компоненты  $B_r$  магнитной индукции является самостоятельной задачей и до сих пор посильной только численному моделированию пакетами Matlab, Femlab, Ansys, Comsol. Исходя из представленных выше в статье расчетов можно предположить, что и такую задачу можно решить аналитическими методами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов А.В. Электрогидравлическое магнитоожидкостное регулирующее устройство. Балаково: БИБиУ, 2010. 258 с.
2. Власов А.В. Упругооболочечные магнитоожидкостные элементы систем управления. Том 1. Балаково: БИБиУ, 2011. 353 с.
3. Власов А.В. Упругооболочечные магнитоожидкостные элементы систем управления. Том 2. Балаково: БИБиУ, 2011. 289 с.
4. Корнилова Н.В., Власов А.В. Обоснование параметров управляющей электромагнитной оболочки для МЖ сенсоров аппарата «Искусственное сердце» // Вестник БИБиУ. 2009. № 1(2). С. 44-48.
5. Корнилова Н.В., Поторочина Л.Е., Власов А.В. Анализ формирователей пространственно распределенных электромагнитных полей // Вестник БИБиУ. 2009. № 1(2). С. 48-55.
6. Николаенко Ю.В., Власов А.В. Векторно-энергетический анализ формирователей гидравлических импульсов для систем кровообращения // Вестник БИБиУ. 2009. № 1(2). С. 84-88.
7. Кузнецова Э.М., Власов А.В. Анализ энергетики низконапорного клапана для синтеза аппарата «Искусственное сердце» // Вестник БИБиУ. 2009. № 1(2). С. 69-74.
8. Шумаков В.И., Толпекин В.Е., Шумаков Д.В. Искусственное сердце и вспомогательное кровообращение. М.: Янус-К, 2003. 376 с.
9. Орлов Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
10. Власов В.В.. Синтез интегральной передаточной функции для объектов управления с распределёнными параметрами. Школа академика Власова. Вып. 1. М.: Буркин, 1998. С. 65-127.
11. Власов В.В. Физика в уравнениях математической физики // Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах. Доклады 5 Российской научной конференции. СООО «АН ВЭ». Саратов. 2002. С. 3-10.
12. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. Справочник. М.: Наука, 1979. 224 с.
13. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля. Справочное пособие. М.: ВШ, 1989. 271 с.
14. Иродов И.Е.. Основные законы электромагнетизма. Учебное пособие. М.: ВШ, 1991. 288 с.
15. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи М.: ВШ, 1978. 528 с.
16. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1975. 752 с.

**Власов Андрей Вячеславович** – кандидат технических наук, докторант кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» Саратовского государственного технического университета

**Vlasov Andrey Vyacheslavovich** – Candidate of Technical Sciences, doctoral candidate of the Department “Automation and management of technological processes”, Saratov State Technical University

**Корнилова Наталья Валерьевна** –  
аспирант кафедры «Управление и информатика  
в технических системах» Балаковского  
института техники, технологии и управления  
Саратовского государственного технического  
университета

**Kornilova N Natalia Valerievna** –  
Post-graduate Student of the Department  
«Management and Information Science in  
Technical Systems», Balakovo Institute of  
Techniques, Technology and Management  
(branch) of Saratov State Technical  
University

*Статья поступила в редакцию 02.04.2011, принята к опубликованию 25.08.2011*

УДК 621.372.8

А.Л. Бондаренко, Б.К. Сивяков, Г.П. Самуйлов

**ФАЗОВРАЩАТЕЛИ НА ВОЛНОВОДАХ СЛОЖНОГО СЕЧЕНИЯ  
С ПЛАНАРНЫМИ ПЕТЛЯМИ СВЯЗИ И P-I-N-ДИОДАМИ**

*Рассматриваются вопросы проектирования проходных фазовращателей с p-i-n- диодами и планарными петлями связи на волноводах П-образного сечения. Представлены эквивалентные схемы фазовращателей, проведено электродинамическое моделирование многодисcretного фазовращателя на П-волноводе.*

Проходной фазовращатель, волновод сложного сечения, p-i-n-диод, планарная петля связи, фазосдвигающая ячейка

A.L. Bondarenko, B.K. Sivyakov, G.P. Samuilov

**PHASE SHIFTER BASED ON COMPLICATED CROSS SECTION WAVEGUIDES  
WITH PLANAR COUPLING LOOPS AND P-I-N-DIODES**

*The method of technical designing of passed waveguide phase shifters using p-i-n diodes and planar coupling loops in ridge waveguide is considered in this article. The equivalent networks of phase shifters are presented. Electromagnetic simulation conducted on a ridge waveguide multi discrete phase shifter.*

Passed phaseshifter ridge waveguide, complicated cross-section waveguide, p-i-n diode, planar loop connection, retarders cell

**Введение**

Волноводные фазовращатели на p-i-n-диодах применяются в фазированных антенных решетках (ФАР) радиолокационных станциях, а также в качестве фазовых модуляторов в приемных и передающих трактах радиоэлектронной аппаратуры.

Одним из важных преимуществ решётки является возможность быстрого обзора пространства за счёт электрического сканирования. Они обеспечивают создание ряда дискретных фазовых сдвигов по всему раскрытию и значительную скорость изменения этих сдвигов при сравнительно небольших потерях мощности.

В настоящее время ведутся интенсивные разработки в направлении дальнейшего развития теории и техники ФАР и расширения области их применения. Особенно актуальным является использование фазовращателей в качестве управляемых устройств ФАР. Анализ технических параметров фазовращателей, достигнутых на сегодняшний день, показывает, что основными тенденциями их развития являются: уменьшения массогабаритных показателей; расширение полосы рабочих частот; точность установки фазы; повышение мощности входного высокочастотного сигнала; улучшения качества согласования; повышение быстродействия; увеличение динамического диапазона установки фазы.

На сегодняшний день стоит задача уменьшения поперечных размеров волноводных фазовращателей и увеличение количества дискретов сдвигов фаз, так как это способствует уменьшению полотна антенной решетки, а соответственно мобильности передвижных

радиолокационных станций. Все выше перечисленные задачи возможно наиболее полно решить конструктивными методами, а именно изменяя форму волновода. Применение волноводов П- и Н-образного сечения для таких целей видится наиболее приемлемым. Определение параметров такого волновода является актуальной задачей для перспективной радиолокации.

### 1. П- и Н- волноводы

Волноводы сложной формы занимают важное место среди СВЧ устройств, благодаря своим высоким экономическим и техническим характеристикам [1]. П- и Н- волноводы (рис. 1) имеют ряд преимуществ перед прямоугольным волноводом для построения фазовращателей. Их особенность состоит в том, что при тех же габаритных размерах  $a$  и  $b$  они имеют большую критическую длину волны основного типа, чем прямоугольные волноводы, в то время как критическая длина волны высших типов изменяется мало. Волноводные П- и Н-образные элементы СВЧ тракта обладают большей широкополосностью одномодового режима и меньшими габаритами по сравнению с прямоугольным волноводом. Благодаря меньшим размерам излучатели в ФАР можно ставить на более близком расстоянии друг от друга и тем самым увеличить сектор обзора пространства решетки [2].

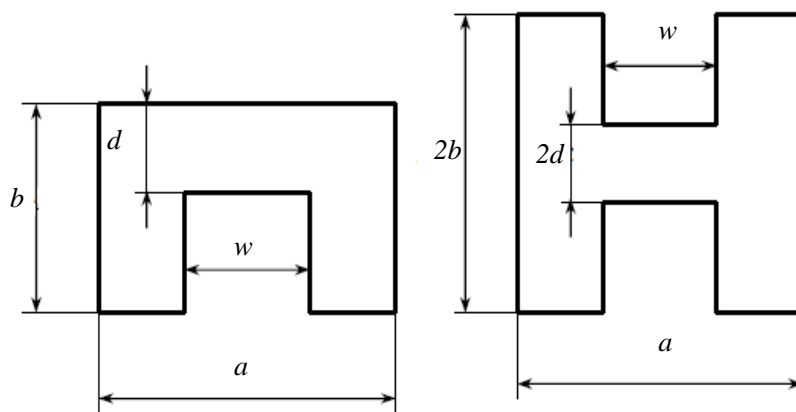


Рис. 1. Сечения П-образного и Н-образного волноводов

В плоскости симметрии Н-волновода можно поставить магнитную стенку. Тогда Н-волновод можно представить двумя П-волноводами. По характеру дисперсионные характеристики Н-волновода не будут отличаться от П-волновода. Волновое сопротивление Н-волновода при одинаковых размерах в два раза больше П-образного волновода. При некоторых размерах Н-волновода волна  $H_{10}$  не будет являться основной.

Рассмотрим возможность применения П- волновода, как более технологичного, для построения фазовращателей отражательного и проходного типов с планарными петлями связи и управляющими р-і-п диодами.

Наличие гребня сильно искажает структуру силовых линий по сравнению с прямоугольным волноводом. Металлический гребень как бы «выдавливает» поле к боковым стенкам. Для основной волны  $H_{10}$  в П-образном волноводом имеет место замыкание силовых линий электрического поля на боковую стенку. С увеличением высоты гребня  $b-d$ , который располагается в максимуме напряженности электрического поля волны  $H_{10}$ , увеличивается концентрация поля и энергия в месте погружения гребня. Поэтому свойства волны, в частности критическая длина, определяются в промежутке между гребнем и верхней стенкой. Пока отношение ширины гребня  $w$  не превышает 0,2 - 0,3 ширины волновода  $a$ , энергия электрического и магнитного полей вблизи боковых стенок сравнительно мала. Распространяющиеся в П-образном волноводом волна  $H_{10}$  близка по структуре к волне типа Т,

у которой  $\lambda_{кр}$  равна бесконечности. Появление гребня приводит к повышению критической длины волны  $H_{10}$ . С увеличением высоты гребня  $b-d$  возрастает уровень потерь и снижается электрическая прочность по сравнению с прямоугольным волноводом за счет искривления силовых линий электрического поля на краях гребня [1]. Увеличение ширины волновода  $a$  приводит к сужению рабочей полосы, за счет увеличения критической длины волны.

Емкостный зазор - это область с интенсивным электрическим полем, которое по своей структуре близко к полю прямоугольного волновода. В этой области целесообразно располагать продольные диэлектрические пластины с петлями связи и управляющими р-і-п диодами для отражательных фазовращателей на основе закороченного отрезка П-волновода. При малых толщинах диэлектрика, расположенного в центральной части емкостного зазора П-волновода, наибольшее влияние будет оказываться на критическую длину волны основного типа и минимальное на критическую длину волны первого высшего типа. Это приводит к увеличению широкополосности фазовращателя на П-волноводе.

В фазовращателях проходного типа диэлектрические пластины с петлями связи и управляющими р-і-п диодами следует располагать в плоскости поперечного сечения волновода между гребнем и боковой стенкой волновода.

## 2. Фазовращатели отражательного типа на П-волноводе

Конструкция многопозиционного отражательного фазовращателя с планарными петлями на П-волноводе показана на рис. 2.

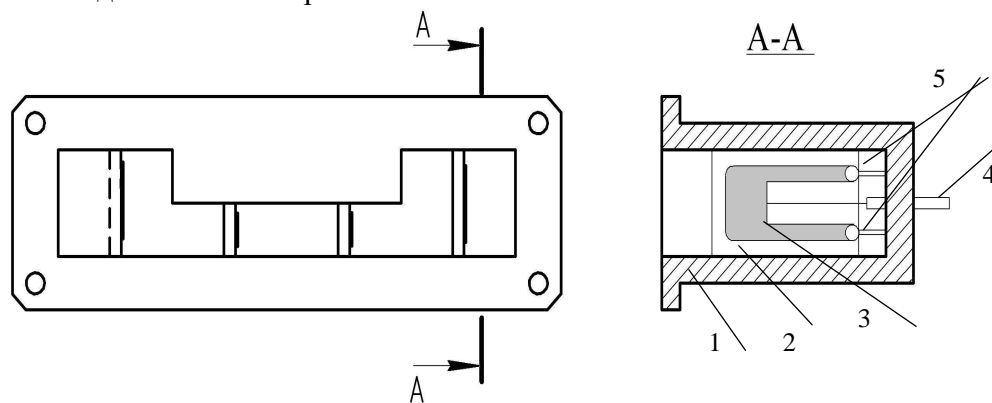


Рис. 2. Многопозиционный отражательный фазовращатель с планарными петлями связи  
(1 – волновод; 2 - диэлектрическая пластина;  
3 – петля связи; 4 – управляющий электрод; 5 – р-і-п-диоды)

Фазовращатель представляет собой закороченный отрезок волновода, в котором вблизи от закоротки установлен ряд диэлектрических пластин параллельно узким стенкам волновода. На каждой диэлектрической пластине имеется выполненная методом печатного монтажа петля связи. К концам каждой петли связи подсоединены р-і-п-диоды. Таким образом, петля связи, р-і-п диоды и закоротка образуют замкнутый контур.

Управляющий электрод, предназначенный для подачи управляющего напряжения на р-і-п диоды, присоединяется к средней точке петли. В силу симметричности конструкции относительно Н-плоскости волновода, суммарная составляющая наведенных СВЧ токов на управляющем электроде равна нулю.

В исследуемом многопозиционном фазовращателе, изображенном на рис. 2, можно выделить ряд двухпозиционных фазовращателей. Следует отметить, что двухпозиционные фазовращатели являются базовыми элементами многопозиционного фазовращателя не только функционально, но и конструктивно, так как они выполнены в виде отдельных модулей, каждый из которых можно удалять из прибора или добавлять в него без нарушения целостности остальных модулей и без ограничения их функциональных свойств.

Проведем анализ процессов в таком фазовращателе, основываясь на результатах работы [3]. Планарная петля вместе с включенными диодами образуют контур, который пронизывают силовые линии магнитного поля, что позволяет рассматривать закороченный отрезок волновода и петлю как трансформатор, преобразующий волноводную волну в волну, распространяющуюся по боковым горизонтальным участкам петли к диодам. Причем эти участки можно рассматривать как отрезки планарной линии. Следовательно, в волноводе с петлей связи распространяются не одна, а две волны: волноводная волна, структура которой сходна с волной  $H_{10}$ , и Т-волна в планарной линии. Причем электромагнитная энергия на участке с петлей связи переносится Т-волной к р-і-n диодам и обратно.

С учетом вышеизложенного эквивалентная схема фазовращателя будет иметь вид, показанный на рис. 3.

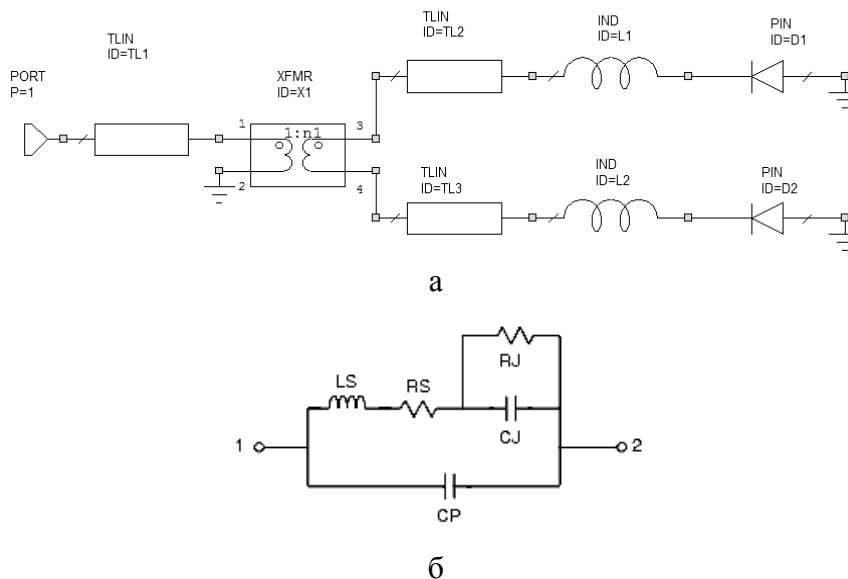


Рис. 3. а) Эквивалентная схема отражательного фазовращателя и б) линейная модель р-і-n диода,  $L_s$  – индуктивность вывода р-і-n диода,  $R_s$  – прямое сопротивление потерь,  $R_j$  – сопротивление базы р-і-n диода,  $C_j$  – емкость базы р-і-n диода.  $C_p$  – емкость корпуса

На рис. 3а обозначены: PORT P=1 – П-волновод, TLIN ID=TL1 – П-волновод, частично заполненный диэлектриком, XFMR ID=XF1 – идеальный трансформатор с соотношением витков 1: n, TLIN ID=TL2, TLIN ID=TL3 – планарные линии передачи, IND ID=L1, IND ID=L2 – сосредоточенные индуктивности, PIN ID=D1, PIN ID=D2 – р-і-n-диоды.

Индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  в схеме играют роль настроечных элементов, и в реальной конструкции это может быть индуктивность вывода р-і-n диода, или, если длины вывода недостаточно, вводится дополнительная индуктивность как элемент топологии. Так как фазовращатели обычно работают в линейном режиме, то для р-і-n диода выбрана линейная модель, представленная на рис. 3б.

Представленная эквивалентная схема позволяет составить качественное и количественное представление о влиянии различных элементов конструкции фазовращателя на его характеристики.

### 3. Фазовращатели проходного типа на П-волноводе

Конструктивно волноводный фазовращатель проходного типа представляет собой отрезок П-волновода, внутри которого установлен ряд реактивных элементов (РЭ) с р-і-n диодами. Два варианта конструкции РЭ проходного типа с планарной петлей связи показаны на рис. 4а, б, в.



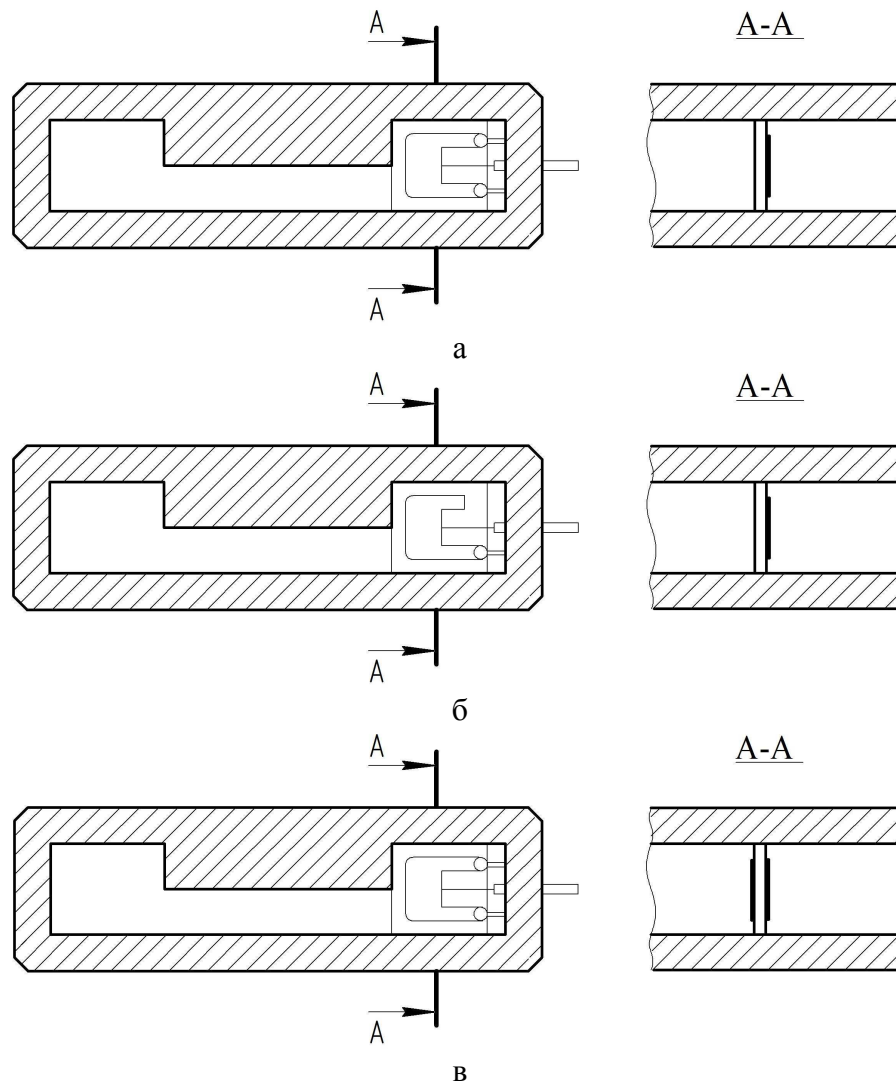


Рис. 4. РЭ проходного типа с а) симметричной, б) несимметричной и в) двойной симметричной планарными петлями связи

При несимметричной конструкции (рис. 4б) один конец петли нагружен р-і-п диодом, а другой остается разомкнутым. Электрическая длина ненагруженного конца петли связи (считая по средней линии от плоскости симметрии петли) примерно равна  $90^\circ$ . Несмотря на то, что конструкция реактивного элемента является несимметричной, излучение СВЧ мощности через управляющий электрод будет минимальным, так как он присоединен к точке с нулевым напряжением.

Существенным преимуществом несимметричной петли связи является то, что она позволяет использовать только один р-і-п диод, что дает снижение тока управления и повышение надежности. Указанный фактор является немаловажным в многопозиционных фазовращателях с большим количеством РЭ. Там, где нужен большой уровень допустимой СВЧ мощности, используется обычная симметричная петля связи с двумя р-і-п диодами (рис. 4а).

Базовым элементом проходного фазовращателя является элементарная фазосдвигающая ячейка. Такая ячейка фазовращателя представляет собой две реактивности, разделенные отрезком линии передачи. Каждая реактивность может принимать два значения в зависимости от полярности напряжения, приложенного к р-і-п-диодам.

Обычно элементарные фазосдвигающие ячейки используются для получения фазовых сдвигов до  $45^\circ$ . Для получения больших значений фазового сдвига, например,  $90^\circ$  или  $180^\circ$ , необходимы большие реактивности, при этом полоса частот резко сужается из-за увеличения коэффициента отражения и снижения точности установки фазы. Поэтому для

получения больших фазовых сдвигов используют метод каскадного соединения нескольких элементарных ячеек.

Для удвоения реактивной проводимости применяются симметричные двойные планарные петли связи [4]. Конструкция реактивного элемента с симметричной двойной планарной петлей связи представлена на рис. 4в.

Двойная планарная петля связи представляет собой две одинаковые петли связи, выполненные на противоположных сторонах диэлектрической подложки. Петли связи соединены на концах при помощи металлических перемычек. РЭ с двойной петлей связи обеспечивает фазовый сдвиг примерно вдвое больший, чем реактивный элемент с одной петлей. Указанный эффект объясняется тем, что двойная петля связи имеет две поверхности, пронизываемые магнитным потоком, и потокосцепление у такой петли должно быть два раза больше, чем у одиночной петли связи.

Эквивалентные схемы РЭ с несимметричной, симметричной односторонней и двухсторонней планарными петлями связи представлены на рис. 5.

На рис. 5а, 5б, 5в волновые сопротивления входного и выходного портов  $P=1$ ,  $P=2$ , а также отрезков линии передачи TL1 и TL2 равны волновому сопротивлению П-волновода. Также как и в эквивалентной схеме отражательного фазовращателя, имеются следующие элементы: трансформаторы XF1 и XF2, отрезки планарной линии передачи TL3 - TL6, сосредоточенные индуктивности L1, L4 и р-і-п-диоды D1, D2. Кроме указанных элементов, в схеме с несимметричной петлей связи имеется разомкнутый отрезок планарной линии передачи TL3, который является эквивалентом ненагруженного плеча планарной петли связи. Длина отрезка TL3 приближается к четверти длины волны, а его волновое сопротивление, в общем случае, может отличаться от волнового сопротивления отрезка TL4.

Фазовращатели, обеспечивающие малые фазовые сдвиги:  $5,6^\circ$ ,  $11,25^\circ$ ,  $22,5^\circ$  и  $45^\circ$ , строят по схеме элементарной фазосдвигающей ячейки. Фазовращатели с фазовыми сдвигами  $90^\circ$  и  $180^\circ$  образуют каскадным соединением  $45^\circ$ -х элементарных ячеек и представляют собой фазовращатели типа нагруженной линии.

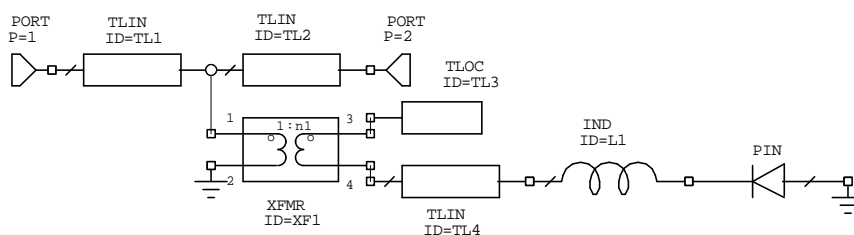
Элементарная ячейка фазовращателя проходного типа состоит из отрезка линии передачи с волновым сопротивлением  $Z_0$  и электрической длиной  $\theta$ , на концах которого включены две переменные полные проводимости  $Y$ . Каждая из переменных полных проводимостей состоит из цепи, содержащей р-і-п диод. В соответствии с тем или иным смещением диодов переменная проводимость принимает два значения  $Y_1$  и  $Y_2$ , обуславливающие дифференциальный сдвиг фазы передаваемой волны.

При расчете фазового сдвига в первом приближении можно пренебречь активными потерями и считать полные проводимости  $Y$  чисто реактивными проводимостями,  $Y_1=jB_1$  и  $Y_2=jB_2$ .

Для обеспечения согласования в двух состояниях фазы должны выполняться условия [5]:

$$jB_1=0; \quad \theta = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta\varphi}{2}; \quad jB_2 = j \frac{1}{Z_0} \operatorname{tg} \frac{\Delta\varphi}{2},$$

где  $\Delta\varphi$ - фазовый сдвиг,  $Z_0$  – волновое сопротивление линии передачи.



а

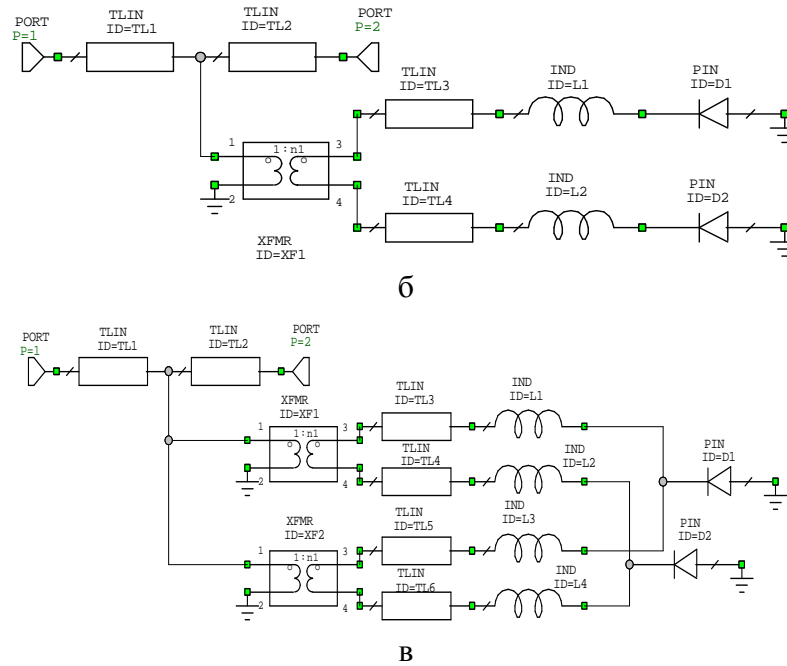


Рис. 5. Эквивалентные схемы РЭ с а) несимметричной, б) симметричной односторонней и в) двухсторонней планарными петлями связи

В фазовращателях типа нагруженной линии имеются два вида проводимостей:  $Y$  и  $2Y$ . Они реализуются соответственно двумя видами РЭ: с односторонней (рис.5,б) и с двухсторонней симметричной петлей связи (рис.5,в).

Параметры элементов эквивалентных схем фазовращателей на П-волноводе могут быть определены аналогично параметрам схем на прямоугольном волноводе [3].

#### 4. Электродинамическое моделирование фазовращателей

Более точные результаты могут быть получены в результате электродинамического моделирования фазовращателей. В связи с большой трудоемкостью и обилием конструктивных параметров электродинамического моделирования целесообразно, чтобы ему предшествовало схемотехническое рассмотрение на основе эквивалентных схем, которое позволяет определить основные параметры и обладает большей физической наглядностью в плане влияния различных элементов на характеристики фазовращателей.

Расчет волноводной структуры был произведен в программе Ansoft HFSS. На входе и выходе волновода стоят волноводные порты (Wave Port). На конце каждой петли связи располагается поверхность с заданными параметрами индуктивности или емкости (Lumped RLC). Такая поверхность будет отражать основные характеристики р-і-п-диода 2A517A, в зависимости от того, в каком состоянии находится диод. Соответственно, когда р-і-п-диод закрыт, у него преобладает емкость ( $C = 0,15$  пФ), когда открыт – индуктивность выводов ( $L = 1,9$  нГн). Для петель задана поверхность с конечной проводимостью (Finite Conductivity).

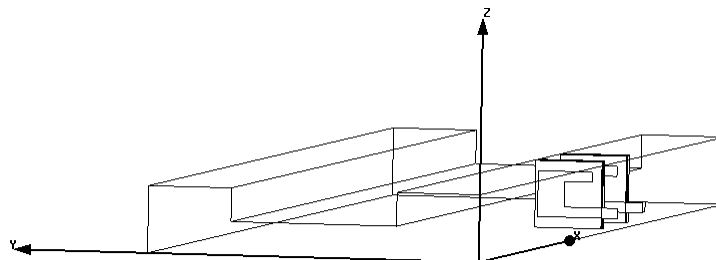


Рис.6. Структурная модель элементарной ячейки проходного фазовращателя в программе HFSS

Каждая элементарная ячейка может быть либо включена, либо выключена. Управление состоянием ячейки осуществляется р-і-п-диодами. Диоды в одной ячейке одновременно либо закрыты, либо открыты.

Планарная петля связи представляет собой несимметричную конструкцию, у которой один конец нагружен р-і-п-диодом, а другой остается разомкнутым. Для определения фазового сдвига необходимо знать фазы коэффициентов передачи  $S_{12} = S_{21}$  в двух состояниях элементарной ячейки. Тогда фаза прошедшей волны определяется как разность фаз  $S_{12}$  выключенного и включенного состояний.

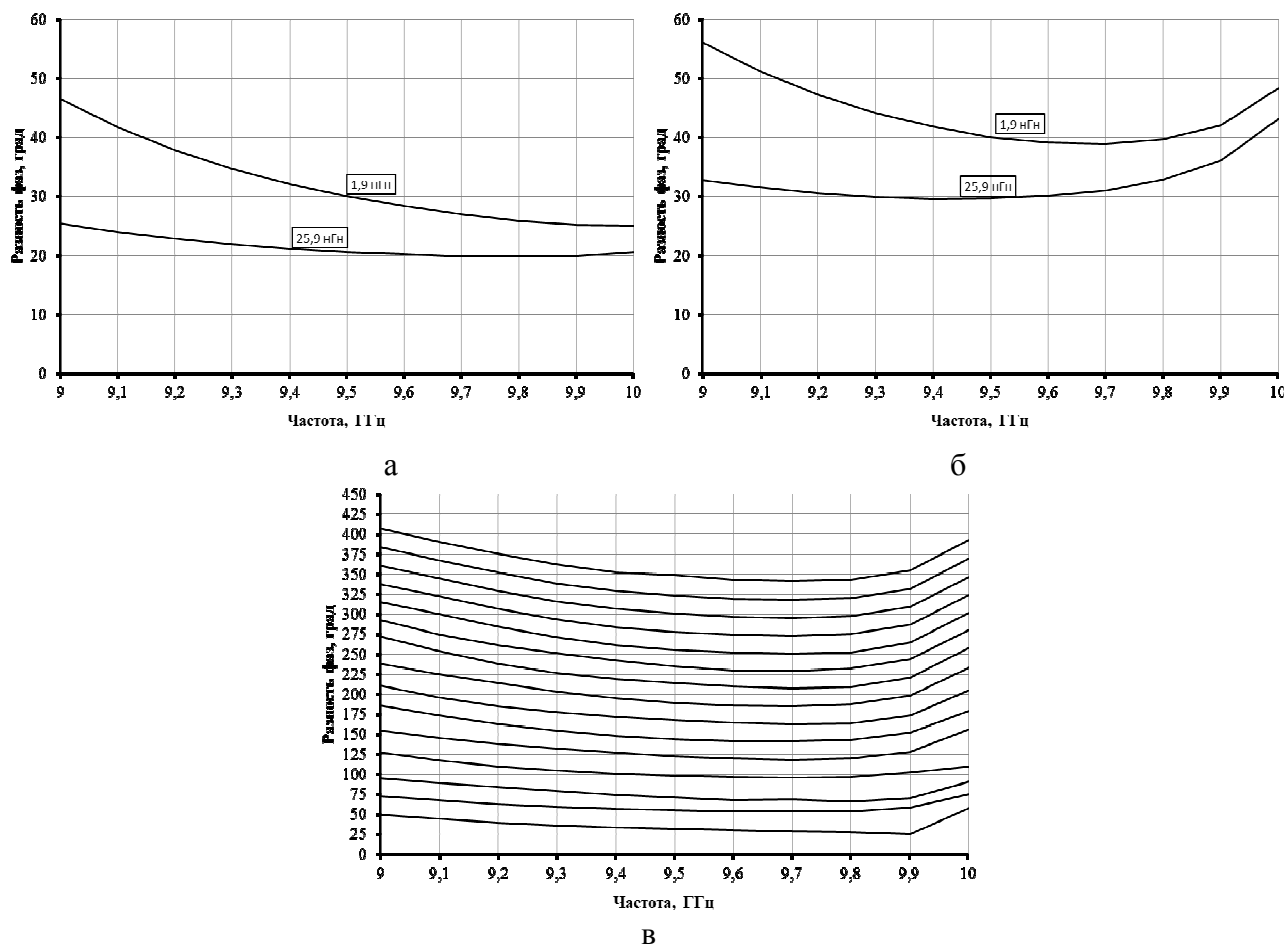


Рис. 7. ФЧХ элементарной ячейки фазовращателя:  
а) односторонняя, б) двусторонняя петля;  
и в) проходного фазовращателя на 16 положений фазы

Проведенное моделирование ячейки, с двухсторонней и односторонней петлей связи показало, что добавление второй петли связи на обратную сторону пластины вызывает увеличение фазового сдвига (рис 7а и 7б). Расчет проведен при индуктивности выводов р-і-п-диодов, соответственно при 1,9 нГн и 25,9 нГн.

Был проведен расчет многодискретного фазовращателя на 16 положений фаз. Конструкция состоит из ряда последовательно включенных элементарных ячеек. На стыке двух ячеек, из теории четырехполюсников известно, что реактивность имеет удвоенное значение. Поэтому на стыке диэлектрическая пластина должна иметь двухстороннюю несимметричную петлю связи. ФЧХ такого фазовращателя представлена на рис. 7в, а уровни отраженной мощности – на рис. 8.

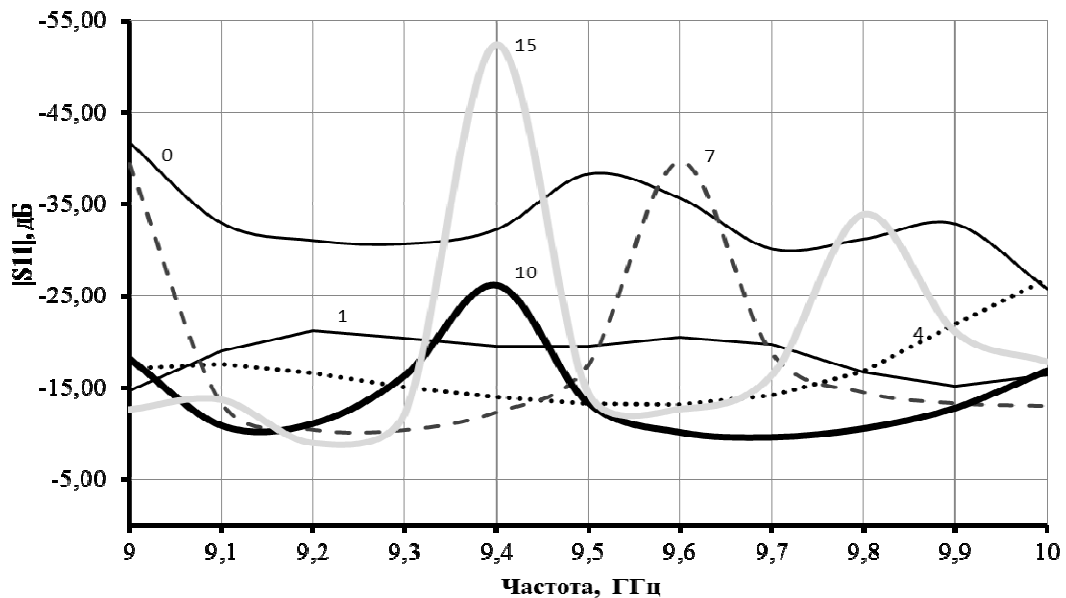


Рис. 8. Уровни отраженной мощности от входа фазовращателя на 16 положений фаз (цифры у каждой характеристики указывают количество последовательно включенных элементарных ячеек)

Таким образом, показана возможность создания многопозиционных фазовращателей с планарными петлями связи и р-і-п диодами на основе П-волновода. Разработаны методики проектирования фазовращателей отражательного и проходного типов методом эквивалентных схем и электродинамическим методом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заргано Г.Ф., Ляпин В.П., Михалевский В.С. и др. Волноводы сложных сечений. М.: Радио и связь. 1986. 124 с.
2. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. Под ред. Л.Д. Бахраха. М.: Советское Радио, 2001. 250 с.
3. Пазухина Т. Г., Сивяков Б.К. Проектирование волноводных фазовращателей с р-і-п диодами и планарными петлями связи // Вестник СГТУ. 2008. №1. Выпуск 2. С. 246-255.
4. Пазухина Т.Г., Зилов В.Т., Киселева О.Т. .А.с. № 331719 доп. к а.с. № 230421. МКИ Н01Р1/18. Дискретный отражательный фазовращатель.
5. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973. 608 с.
6. Davis M.E., Williams E.W., Celestini A.C. Finite-Boundary Corrections in the Coplanar Waveguide Analysis // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1973. v. MTT-21. No.9. P. 594–596.

**Бондаренко Антон Леонидович** – аспирант кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

**Bondarenko Anton Leonidovich** – Post-graduate Student of the Department “Electrical Engineering and Electronics”, Saratov State Technical University

**Сивяков Борис Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета

**Sivyakov Boris Konstantinovich** – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department “Electrical Engineering and Electronics”, Saratov State Technical University

**Самуйлов Генрих Павлович** –  
кандидат технических наук, начальник  
системного отдела ОАО КБ «Кунцево»,  
г. Москва.

**Samuilov Henry Pavlovich** –  
Candidate of Technical Sciences, Chief of the  
System Department of OJSC KB “Kuncevo”,  
Moscow

*Статья поступила в редакцию 10.03.2011, принята к опубликованию 20.08.2011*

УДК 637.133.5

**М.Г. Поздеева, Т.О. Рябухова, Н.А. Окишева, Э.Р. Ягудина****НАНОМЕМБРАНЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО  
МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ**

*Разработаны ультрафильтрационные мембраны из вторичного ацетата целлюлозы для разделения вторичного молочного сырья с целью выделения ценных пищевых компонентов. Мембраны модифицированы активным углем двух фракций: мелкой и крупной (соответственно 85 и 160 мкм). Исследованы их адсорбционные и эксплуатационные характеристики: пористость, проницаемость, селективность.*

Мембраны, вторичное молочное сырье, адсорбция, пористость, проницаемость, селективность

**M.G. Pozdeeva, T. O. Ryabuhova, N.A. Okisheva, E.R. Yagudina****NANOMEMBRANES FOR THE SEPARATION OF SECONDARY RAW MILK**

*Ultrafiltration membranes made from recycled cellulose acetate for the separation of secondary raw milk in order to select valuable food ingredients. Membranes were modified with activated charcoal of two fractions: fine and coarse (respectively 85 and 160 microns). Their adsorption and operational characteristics: porosity, permeability, and selectivity have been investigated.*

Membrane, the secondary dairy raw materials, adsorption, porosity, permeability, selectivity

На предприятиях молочной промышленности образуется, как отход производства, так называемое вторичное молочное сырье (ВМС) – молочная сыворотка, пахта – ценное белково-углеводное сырье. Благодаря своим биологическим и физиологическим свойствам, ВМС вполне отвечает характеристике «минимум калорий – максимум биологической ценности». Однако значительную часть технологических отходов ВМС не используют и сбрасывают в канализацию. В то же время сбор и утилизация технологических отходов – экономически выгодное мероприятие, также способствующее охране окружающей среды и водоемов от загрязнения.

Увеличение производства продуктов питания – одно из важнейших направлений экономического и социального развития общества. Дополнительное количество высококачественной продукции можно получить путем комплексного использования сырья и внедрения в производство новых безотходных технологий. В этой связи важным резервом является рациональное использование вторичного молочного сырья, переработка которого имеет не только экономическое, но и важное экологическое значение.

Широкое применение для обработки ВМС, с целью выделения ценных пищевых компонентов, находит мембранный метод – ультрафильтрация, позволяющая снизить энергетические затраты при переработке и выделять из ВМС до 100% белка [1]. Данный процесс основан на задерживании мембраной растворенных частиц, когда размер частиц превышает размер пор в поверхностном слое мембраны. Задерживание растворенных частиц при ультрафильтрации может иметь место также вследствие адсорбции частиц

поверхностью мембраны. Таким образом, процессу ультрафильтрации сопутствует процесс адсорбции компонентов сыворотки мембранами.

В нашем регионе и в РФ в целом переработка вторичного молочного сырья мембранными методами не имеет широкой промышленной реализации, в связи с высокой стоимостью и недостаточно высокой производительностью мембранного оборудования. Поэтому разработка принципиально новых ультрафильтрационных мембран является актуальной задачей.

Авторами разработаны и получены ультрафильтрационные мембраны на основе вторичного ацетата целлюлозы методом полива с использованием наполнителя активного угля двух фракций (85 и 160 мкм), массовая доля которого изменялась от 0,15 до 0,35.

Ацетаты целлюлозы получают на основе природной целлюлозы (древесной и хлопковой).

Процесс ацетилирования целлюлозы (получения диацетата целлюлозы) состоит из двух стадий: получение первичного ацетата целлюлозы (триацетат целлюлозы) и его частичного омыления [2].

Диацетат целлюлозы имеет состав  $[C_6H_7O_2(OH)_{3-m}(OCOCH_3)_m]_n$ , где  $m=2,5\div 2,9$ ;  $n=200\div 300$ , степень замещения гидроксильных групп ( $\gamma=240\div 260$ ), средняя степень полимеризации 220-250 и растворяется в ацетоне.

Макромолекулы полимера, используемые для получения мембран, должны быть достаточно жесткими или образовывать жесткие надмолекулярные структуры. Это, во-первых, облегчает получение рыхлой матрицы при формовании асимметричных мембран, а во-вторых, затрудняет расстекловывание полимера при эксплуатации мембран, препятствуя их деформации под влиянием давления. Повышению жесткости полимера способствует наличие в цепи вторичного ацетата целлюлозы циклических звеньев, которые составляют не менее половины массы полимера

Важной характеристикой полимера является его молекулярная масса, которая изменяется от  $1\cdot 10^4$  до  $40\cdot 10^4$ . Ее величина оказывает влияние на эксплуатационные свойства мембран. Кроме того, важным фактором является инертность полимера к компонентам разделяемой системы.

Мембраны были изготовлены из 5%, 7% и 10%-ных исходных растворов ВАЦ в ацетоне. Рассчитанное количество активного угля помещали в ацетоновый раствор ВАЦ и тщательно перемешивали.

Для исследования адсорбции белка на мембранах нами был использован кровезаменяющий препарат 10% раствор альбумина, стабилизированный NaCl. Адсорбцию изучали интерферометрическим методом по методике [3]. Экспериментальная изотерма избыточной адсорбции альбумина на мембранах, модифицированных углем и  $NaHCO_3$ , представлена на рис. 1.

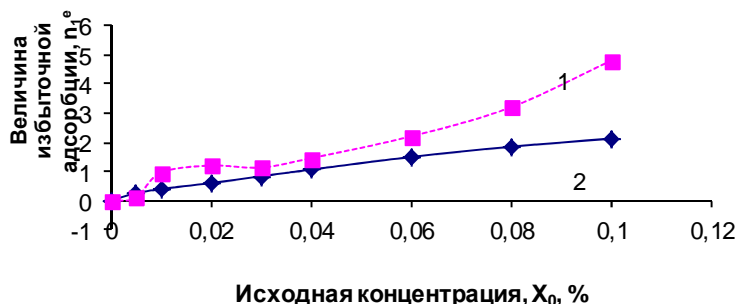


Рис.1. Изотермы адсорбции альбумина:  
1 - мембраны модифицированы  $NaHCO_3$ , ( $n_1^e \cdot 10^{-5}$ );  
2 - мембраны модифицированы активным углем ( $n_1^e \cdot 10^{-3}$ )

Адсорбция альбумина на мембранах, модифицированных  $NaHCO_3$  была изучена ранее [4].



Полученные результаты были обработаны по методу Гиббса: рассчитаны изменения химического потенциала сорбента  $\Delta\Phi$  и свободной энергии Гиббса  $\Delta G$  в зависимости от концентрации [5]. Графики представлены на Рис. 2а, 2б.

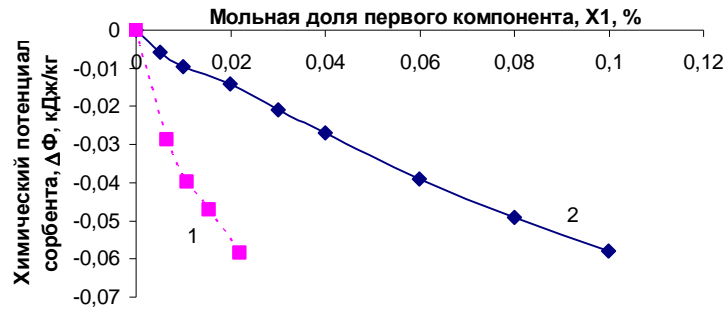


Рис. 2а. Зависимость химического потенциала сорбента от концентрации раствора:  
1- мембраны модифицированы  $\text{NaHCO}_3$  ( $\times 10^{-2}$  %),  
2- мембраны модифицированы активным углем

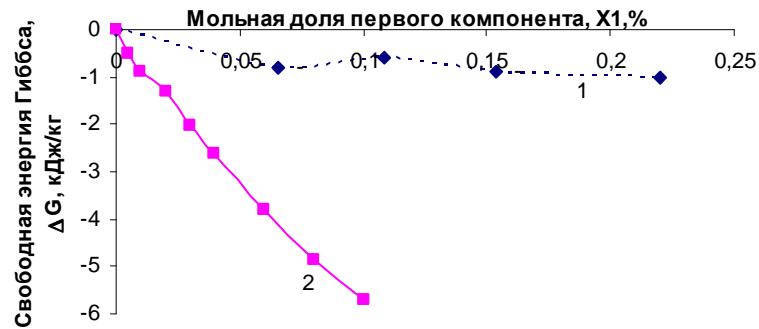


Рис. 2б. Зависимость свободной энергии Гиббса от концентрации раствора:  
1- мембраны модифицированы  $\text{NaHCO}_3$  ( $\times 10^{-3}$  %,  $\Delta G \cdot 10$  кДж/кг),  
2- мембраны модифицированы активным углем

При сопоставлении экспериментальных результатов можно сделать вывод, что адсорбционные свойства мембран, модифицированных углем, по отношению к альбумину в 100 раз выше, чем у мембран, модифицированных  $\text{NaHCO}_3$ .

Определена также пористость мембран (распределение пор по размерам не рассматривался) и их эксплуатационные свойства: проницаемость, селективность в зависимости от их пористости.

Пористость определяли методом электронной микроскопии на микроскопе Hitachi HU-12A, разрешение 50 Å.

Обнаружено, что мембраны из 5%-го исходного раствора обладают большей пористостью: у модифицированных крупной фракцией активного угля максимальное значение ее равно 18,42%, а у модифицированных мелкой фракцией активного угля – 15,33%. Пористость зависит также от концентрации наполнителя (чем выше концентрация, тем больше пористость) и от размеров частиц наполнителя: мембраны с частицами крупной фракции (160 мк) имеют большую пористость, чем с частицами мелкой фракции (85 мк).

Скорость фильтрации определяли на лабораторном модуле. Давление фильтрации 0,3-0,5 МПа.

Проницаемость мембран на основе 7%-го исходного раствора ВАЦ с наполнителем мелкой фракции и 10%-го с наполнителем и мелкой, и крупной фракции равна нулю (как по воде, так и по сыворотке).

Экспериментальные данные показывают, что проницаемость зависит от пористости мембран. Чем больше пористость, тем выше проницаемость, следовательно, получены мембраны с большим количеством сквозных пор. Также проницаемость зависит и от концентрации исходного раствора ВАЦ в ацетоне (наилучшей проницаемостью обладают мембраны на основе 5%-го исходного раствора). Проницаемость по воде выше, чем по сыворотке.

Селективность мембран по белку определяли с помощью метода Кьельдаля [6]. Полученные результаты представлены в виде графика зависимости селективности от концентрации наполнителя на рис. 3.

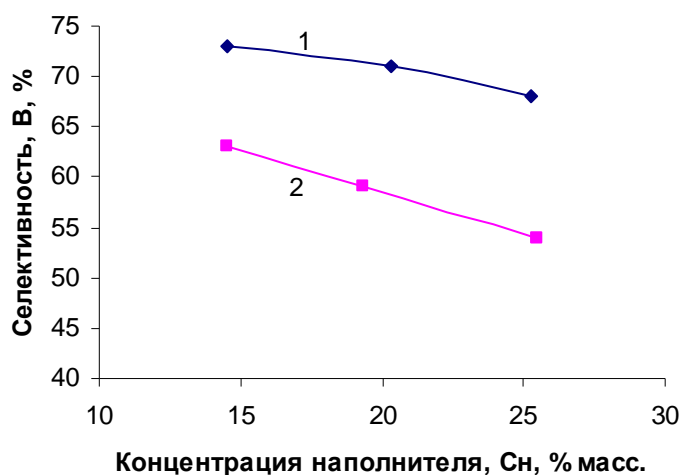


Рис. 3. Зависимость селективности от концентрации наполнителя:

- 1 - 5%-й исходный раствор ВАЦ в ацетоне с наполнителем крупной фракции (160 мк), с концентрацией наполнителя 14,5÷25,3%;
- 2 - 7%-й исходный раствор ВАЦ в ацетоне с наполнителем крупной фракции (160 мк), с концентрацией наполнителя 14,5÷25,3%.

С увеличением проницаемости селективность мембран понижается. Наибольшей селективностью обладают мембраны из 5%-ных растворов с наполнителем крупной фракции 15% масс. и пористостью 15%. Однако с увеличением концентрации исходного раствора селективность уменьшается. Таким образом, полученные результаты (Рис. 3, кривые 1 и 2) показывают, что мембраны на основе 5%-х растворов обладают оптимальными свойствами по всем показателям (пористость, проницаемость, селективность).

Для исследуемых мембран проницаемость изменяется от 0,17 до 24,45 л/(м<sup>2</sup>·мин) (например, для промышленных мембран УАМ-500 проницаемость 21,3 л/(м<sup>2</sup>·мин)) - по воде и от 0,07 до 7,2 л/(м<sup>2</sup>·мин), соответственно, 0,32 л/(м<sup>2</sup>·мин) - по сыворотке. Селективность меняется от 50 до 75% (для промышленных мембран УАМ-500 селективность 62%).

Наполнитель (активный уголь), по-видимому, выполняет в растворе роль механической примеси, на границе с которой при испарении растворителя образуются поры, о чем свидетельствует увеличение проницаемости (получены мембраны с большим количеством сквозных пор). Общая пористость изменяется в интервале от 13 до 18%. Как следствие увеличивается их проницаемость по сравнению с промышленными по воде на 3 л/(м<sup>2</sup>·мин), а по сыворотке на 7 л/(м<sup>2</sup>·мин).

Разработанные мембраны имеют невысокую стоимость, изготовлены на основе природного полимера, совместимы с пищевыми продуктами, обладают достаточно

хорошими эксплуатационными характеристиками и могут быть рекомендованы для промышленного использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фетисов А. М., Чагаровский А.П. Мембранные молекулярноситовые методы переработки молока. М.: Агропромиздат, 1991. 272 с.
2. Роговин З.А. Основы химии и технологии химических волокон. Т. 1. 4-е изд., пер. и доп. М.: «Химия», 1974. 520 с.
3. Киселев А. В., Шикалова И. В. Адсорбция жирных спиртов и фенолов из водных растворов на сажах // Журнал физической химии. 1956. Т. 30. Вып. 1. С. 94-108.
4. Седелкин В.М., Рябухова Т.О., Окишева Н.А., Поздеева М.Г. Адсорбция белка на мембранах из вторичного диацетата целлюлозы, наполненных древесным углем // Журнал прикладной химии. 2007. Т. 80. Вып. 1. С. 59-62.
5. Гиббс Дж. Термодинамические работы. М.: - Л.: Химия, 1950. 492 с.
6. Коренман Я. И. Практикум по аналитической химии: учеб. 2-е изд., перераб. и доп. Воронеж: ВГУ. 1989. 320 с.

**Поздеева Марина Геннадьевна** – доцент кафедры «Машины, аппараты пищевых производств и теплотехника» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

**Pozdeeva Marina Genadevna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Machines and Mechanisms of Food industry and Heat Engineering”, Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

**Рябухова Татьяна Олеговна** – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физическая и органическая химия» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

**Ryabuhova Tatyana Olegovna** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of «Physical and Organic Chemistry» of Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

**Окишева Наталья Анатольевна** – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физическая и органическая химия» Энгельсского института (филиала) Саратовского государственного технического университета

**Okisheva Natalya Anatolievna** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department “Physical and Organic Chemistry”, Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

**Ягудина Эльмира Рушановна**, студентка кафедры «Машины, аппараты пищевых производств и теплотехника» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

**Yagudina Elmira Rushanovna** – Student of the Department “Machines and Mechanisms of Food industry and Heat Engineering”, Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 12.01.2011, принята к опубликованию 08.07.2011*

УДК 541.183

**Т.О. Рябухова, Н.А. Окишева, М.Г. Поздеева, Э.Р. Ягудина**

**ТЕРМОДИНАМИКА АДСОРБЦИИ  $\beta$ -АЛАНИНА И АЛЬБУМИНА  
НА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ МЕМБРАНАХ**

*В статье рассматривается адсорбция модельных растворов  $\beta$ -аланина и альбумина на ультрафильтрационных мембранах из вторичного ацетата целлюлозы, модифицированных активным углем. Рассчитаны основные термодинамические характеристики объемных и адсорбционных растворов, обоснована модель адсорбционного раствора.*

Мембраны, адсорбция, изотерма адсорбции, модель адсорбционного раствора

**T. O. Ryabuhova, N.A. Okisheva, M.G. Pozdeeva, E.R. Yagudina**

**THERMODYNAMICS OF ADSORPTION OF  $\beta$ -ALANINE  
AND ALBUMIN POLYMER FILM MEMBRANES**

*The article deals with the adsorption of model solutions  $\beta$ -alanine and albumin on ultrafiltration membranes made from secondary cellulose acetate, modified by activated carbon. The main thermodynamic characteristics of bulk and adsorption solutions have been calculated, the model of the adsorption solution have been proved.*

Membrane, adsorption, adsorption isotherm, the model of adsorption solution

При глубокой переработке молочного сырья (молочной сыворотки и пахты) все шире используются мембранные методы, в частности ультрафильтрация [1]. Мембранная технология постоянно совершенствуется, что приводит к появлению новых типов мембран. В настоящее время выделяют мембраны первого, второго и третьего поколений. Под мембранами первого поколения следует понимать мембраны, изготовленные из полимеров ацетатцеллюлозы, второго поколения – из ароматических полимеров (полиамида, полисульфона, полиэтилентерефталата и др.) и третьего поколения – из минеральных веществ, металлокерамики и др.

Эффективность процесса ультрафильтрации зависит от материала, из которого изготовлена мембрана. Поиск соответствующей композиции для производства мембран до настоящего времени является актуальным вопросом.

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к мембранам различных типов, являются: высокая разделяющая способность; высокая удельная производительность; инертность по отношению к компонентам разделяемой смеси; стабильность свойств по времени; низкая стоимость; механическая прочность [2].

Исходя из ранее выполненных исследований [3] и в соответствии с вышеперечисленными требованиями, для изготовления ультрафильтрационных мембран,

предназначенных для разделения вторичного молочного сырья, предложено использовать вторичный ацетат целлюлозы. Данный полимер имеет природное происхождение, наиболее совместим с пищевыми продуктами, инертен к компонентам разделяемой системы и, что очень важно, имеет низкую стоимость по сравнению с мембранами второго и третьего поколений.

Для извлечения из вторичного сырья белка и лактозы нами разработаны полимерные пленочные мембраны из вторичного ацетата целлюлозы (УФПП ВАЦ мембраны) [4]. Мембраны получены из исходных 5-, 7-, и 10% растворов вторичного ацетата целлюлозы в ацетоне методом каландрования. Ранее авторами было установлено, что введение в состав ВАЦ мембран в качестве наполнителя активного угля (АУ) значительно улучшает их прочностные и эксплуатационные свойства. Как показали сравнительные исследования [4], оптимальными эксплуатационными характеристиками обладают мембраны, изготовленные из 5% раствора ВАЦ в ацетоне и модифицированные АУ мелкой (85 мкм) и крупной (160 мкм) фракций. Представляло интерес изучить их адсорбционные свойства по отношению к компонентам молочного сырья.

Адсорбция изучалась для модельных растворов  $\beta$ -аланина и альбумина, т.к. эти вещества входят в состав всех молочных продуктов, в частности вторичного молочного сырья (пахты и молочной сыворотки).

В этой работе обсуждаются экспериментальные данные по адсорбции водных растворов  $\beta$ -аланина и альбумина на ультрафильтрационных мембранах из вторичного ацетата целлюлозы, модифицированных активным углем. На рис. 1, 2 представлены экспериментальные изотермы избыточной адсорбции  $\beta$ -аланина и альбумина соответственно при 293 К.

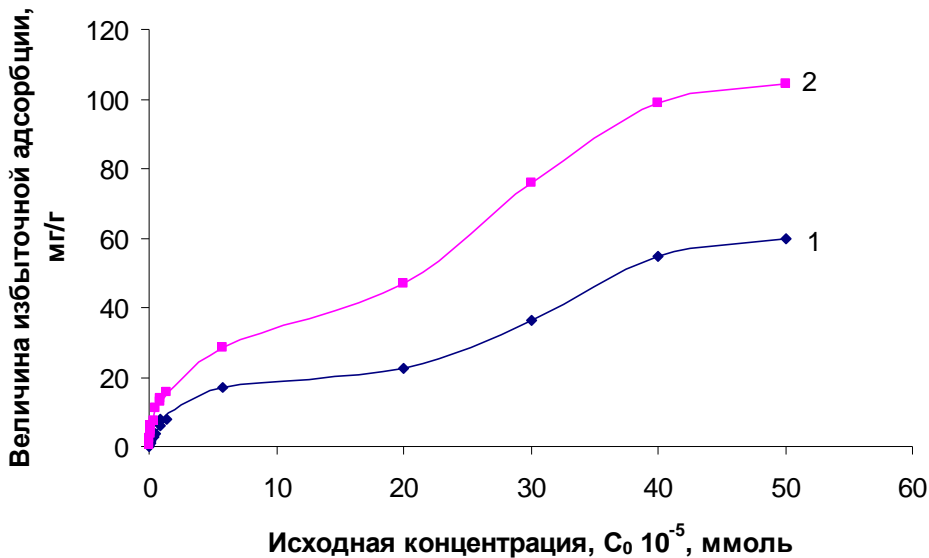


Рис. 1. Изотермы избыточной адсорбции  $\beta$ -аланина:  
1 - на мембране, наполненной мелкой фракцией активированного угля;  
2 - на мембране, наполненной крупной фракцией активированного угля

Ход изотерм не противоречит теоретическим представлениям об адсорбции: величины избыточной адсорбции  $\beta$ -аланина и альбумина выше при адсорбции на ВАЦ мембране, модифицированной активным углем крупной фракции из-за большей площади удельной поверхности адсорбента. Адсорбция альбумина больше адсорбции аланина, так как молекулярная масса альбумина больше и, следовательно, сильнее дисперсионные взаимодействия в системе альбумин – ВАЦ мембрана.

Анализ адсорбционных систем проводился на основе метода избыточных величин Гиббса и метода полного содержания [5, 6]. По методу избыточных величин Гиббса

рассчитывалось изменение химического потенциала сорбента  $\Delta\Phi$  и величины изменения свободной энергии Гиббса  $\Delta G$ .

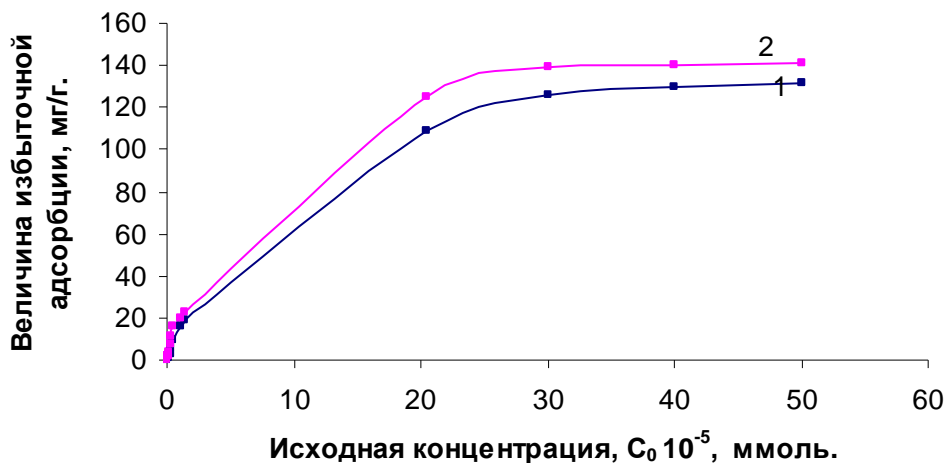


Рис. 2. Изотермы избыточной адсорбции альбумина:  
 1 - на мембране, наполненной мелкой фракцией активного угля;  
 2 - на мембране, наполненной крупной фракцией активного угля

Вычисленные при различных концентрациях компонентов изменения свободной энергии системы описывают интегральное изменение ее свойств с изменением состава раствора и являются объективной характеристикой адсорбционной системы в целом. Термодинамический анализ адсорбционной системы как двухфазной можно получить только в рамках метода полного содержания, позволяющего также рассчитать основные термодинамические характеристики каждой из фаз в отдельности.

Для рассмотрения адсорбционных систем по методу полного содержания необходимо выбрать модель адсорбционного раствора (адсорбционной фазы). В качестве модели адсорбционного раствора выбиралась модель, рассматривающая адсорбцию как процесс взаимного вытеснения компонентов в поверхностном слое при условии аддитивности молекулярных площадок компонентов.

Поверхность адсорбента рассчитывалась по данным адсорбции паров воды [7], а молярная площадка ( $\omega_i$ ) - из плотности растворов или молекулярных моделей. В некоторых случаях они могут быть взяты из литературных источников. В данной работе  $\omega_i$  определена по плотности соответствующих растворов.

Из работы [6] следует, что достаточно хорошее совпадение величин изменения свободной энергии Гиббса, рассчитанных по методу избыточных величин Гиббса ( $\Delta G_{\text{Гиб}}$ ) и методу полного содержания ( $\Delta G_{\text{Мод}}$ ), является одним из критериев правильности выбора модели адсорбционного раствора и достоверности предполагаемых параметров адсорбционной фазы (емкость монослоя, число адсорбционных слоев).

На основании предположения о несжимаемости раствора и плотной упаковке молекул компонентов в поверхностном слое были рассчитаны предельные величины адсорбции на примере  $\beta$ -аланина ( $m_s=0,0189$  ммоль/г - для мембраны с мелкой фракцией угля,  $m_s=0,0167$  ммоль/г - для мембраны с крупной фракцией угля). В нашем случае рассматривалась модель адсорбционного раствора, состоящего из одного слоя.

Для оценки достоверности выбранной модели адсорбционного раствора и найденных характеристик адсорбционного раствора были рассчитаны величины свободной энергии по

методу избыточных величин Гиббса и методу полного содержания. Эти данные для систем  $\beta$ -аланин-вода-ВАЦ мембрана и альбумин-вода-ВАЦ мембрана приведены на рис. 3.

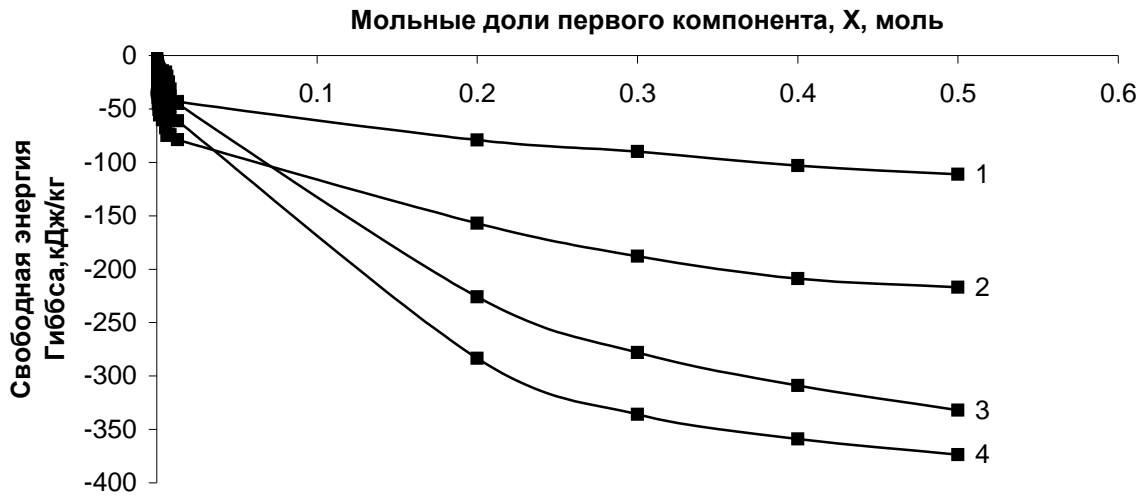


Рис. 3. Концентрационные зависимости изменения свободной энергии Гиббса  $\Delta G$  сорбционных систем: 1 -  $\beta$ -аланин – ВАЦ-мембрана с наполнителем мелкой фракции; 2 -  $\beta$ -аланин – ВАЦ-мембрана с наполнителем крупной фракции; 3 - альбумин – ВАЦ-мембрана с наполнителем мелкой фракции,  $\Delta G \cdot 10^3$  кДж/кг; 4 - альбумин – ВАЦ-мембрана с наполнителем крупной фракции,  $\Delta G \cdot 10^3$  кДж/кг. Линии – метод полного содержания; точки – метод избыточных величин Гиббса

Сопоставление  $\Delta G_{\text{мод}}$  и  $\Delta G_{\text{Гиб}}$  свидетельствует о хорошем согласовании полученных данных. Это является критерием правильности выбора модели адсорбционного слоя.

На рис. 4. приведены изменения термодинамических функций объемного и адсорбционного растворов для системы  $\beta$ -аланин-вода-ВАЦ мембрана: коэффициенты активности компонентов раствора ( $\gamma_i, \gamma_i^s$ ), избыточная свободная энергия смешения  $g^E$  и  $g^{ES}$ .

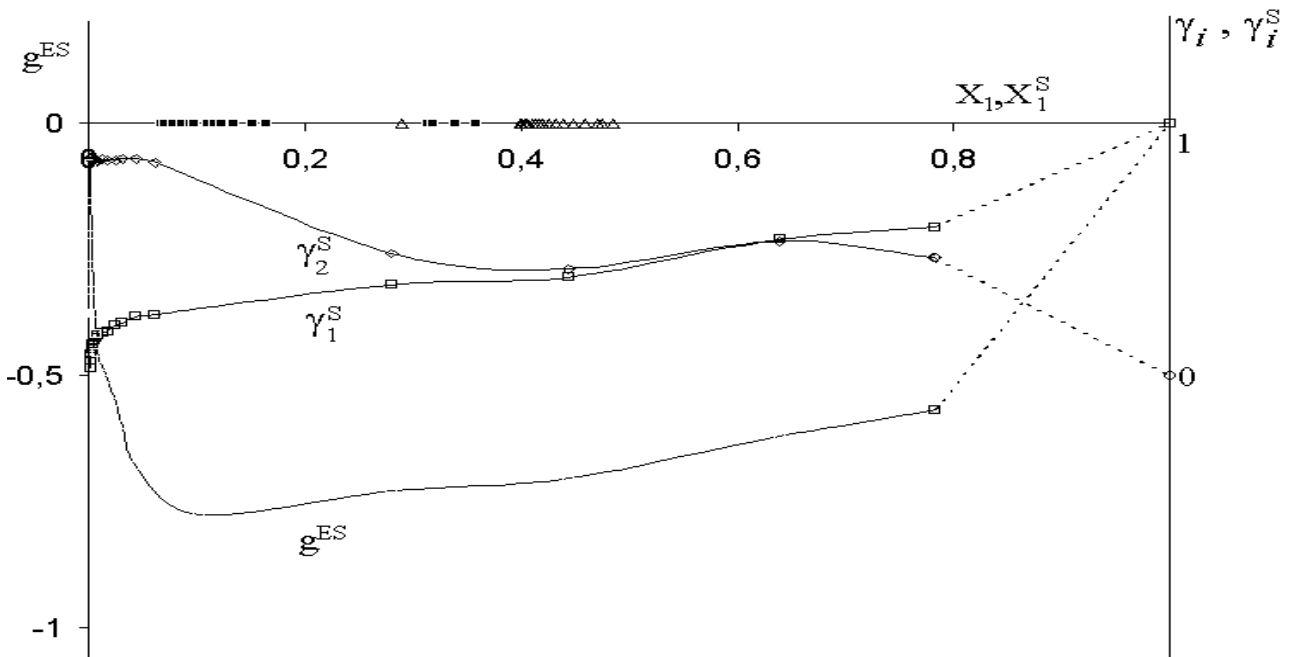


Рис. 4. Изменения термодинамических функций объемного и адсорбционного растворов для системы  $\beta$ -аланин- вода- ВАЦ мембрана

Сопоставление свойств объемных и адсорбционных растворов показало, что в изученных системах для адсорбционных растворов наблюдаются отрицательные отклонения от идеальности. Аналогичные результаты получены и для системы альбумин–вода–ВАЦ мембрана.

Таким образом, на основе термодинамического анализа полученных экспериментальных данных обоснована мономолекулярная модель адсорбционного раствора и рассчитаны основные термодинамические функции объемных и адсорбционных растворов.

Установлено, что при разделении белково-углеводного сырья на УФПП ВАЦ мембранах значительную роль играют адсорбционные процессы, т. е. ультрафильтрационная мембрана может работать не только по механизму проливания и закупоривания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Храмов А.Г., Нестеренко П.Г. Технология продуктов из молочной сыворотки. Учебное пособие. М.: ДеЛи принт, 2004. 587 с.
2. Фетисов А.М., Чагаровский А.П. Мембранные молекулярноситовые методы переработки молока. М: Агропромиздат, 1991. 272 с.
3. Седелкин В.М., Поздеева М.Г., Рамазаева Л.Ф. и др. Влияние кинетики испарения растворителя на эксплуатационные характеристики ультрафильтрационных мембран на основе вторичного ацетата целлюлозы // Химические волокна. 2005. № 2. С. 58-61.
4. Пат. 2287929 РФ. Смесь для формования ацетатцеллюлозной ультрафильтрационной адсорбционной мембраны / В.М.Седелкин, Л.Ф.Рамазаева, А.Н.Суркова, Г.П.Денисова, М.Г.Поздеева. Оpubл. в Изобретения. Полезные модели. 2006. № 33.
5. Ларионов О.Г. Некоторые особенности поведения адсорбционных растворов в микропористых адсорбентах // Адсорбция в микропорах: тр. V Всесоюзной конференции по теоретическим вопросам адсорбции. М.: Наука, 1983. С. 70-74.
6. Серпинский В.В., Якубов Т.С. Адсорбция как Гиббсов избыток и как полное содержание // Известия АН СССР. Сер. Химия. 1985. №1. С. 12-17.
7. Вартапетян Р.Ш., Волощук А.М. Механизм адсорбции молекул воды на углеродных адсорбентах // Успехи химии. 1995. Т.64. № 11. С. 1055-1072.

**Рябухова Татьяна Олеговна** – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физическая и органическая химия» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

**Ryabuhova Tatyana Olegovna** – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department “Physical and Organic Chemistry”, Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

**Окишева Наталья Анатольевна** – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физическая и органическая химия» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

**Okisheva Natalya Anatolievna,** Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department “Physical and Organic Chemistry”, Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University

**Поздеева Марина Геннадьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины, аппараты пищевых производств и теплотехника» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета

**Pozdeeva Marina Genadevna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Machines and Mechanisms of Food industry and Heat Engineering”, Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University



**Ягудина Эльмира Рушановна** –  
студентка кафедры «Машины, аппараты  
пищевых производств и теплотехника»  
Энгельсского технологического института  
(филиала) Саратовского государственного  
технического университета

**Yagudina Elmira Rushanovna** –  
Student of the Department “Machines and  
Mechanisms of Food industry and Heat  
Engineering”, Engels Technological Institute  
(branch) of Saratov State Technical  
University

*Статья поступила в редакцию 15.01.2011, принята к опубликованию 20.06.2011*

УДК 544.654.2:532.528:621.22.4

Л.А. Фоменко, Л.Г. Ловцова, Ю.В. Серянов

**КИНЕТИКА ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕДИ  
В УЗКИХ КАНАЛАХ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ УГЛУБЛЕНИЙ  
ПОД ВЛИЯНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ  
(ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)**

*Приводятся результаты теоретических исследований кинетики электрохимического осаждения металлов в узких каналах формообразующих углублений под влиянием ультразвука на эффекте аррениусовской размерно-кавитационной селективности (АРКС) применительно к задачам соногальванопластики. На основании решения задачи теплопроводности, в предположении протекания электрохимической реакции в режиме смешанной активационно-диффузионной кинетики, получены кинетические уравнения процесса, согласно которым линейная скорость зарастивания формообразующих углублений на эффекте АРКС увеличивается с поляризацией, интенсивностью ультразвука, форм-фактором симметрии углубления и уменьшается с частотой ультразвука, характерным размером углубления, коэффициентом теплопроводности и толщиной металлической пластины-матрицы.*

Электрохимическое осаждение металлов, ультразвуковая кавитация, субмиллиметровая соногальванопластика, кинетика, соноселективность, поляризация

L.A. Fomenko, L.G. Lovtsov, Yu.V. Seryanov

**KINETICS OF LOCAL ELECTROCHEMICAL DEPOSITIN OF COPPER  
IN NARROW CHANNELS SHAPING THE RECESSES  
UNDER THE INFLUENCE OF ULTRASONIC CAVITATION**

*The kinetics of the electrochemical deposition of copper in the narrow channels shaping the recesses under the influence of ultrasound due to the effect of cavitation Arrhenius size-selectivity (ARKS). The kinetic parameters of the process of frequency and intensity of ultrasound, as well as the depth and topological features of the grooves. It is shown that under optimal conditions, the value of the coefficient sonoselektivnosti deposition may reach values of 7-12, which proves the feasibility of submillimeter copper sonogalvanoplatiki.*

*Electrochemical deposition of metals, ultrasonic cavitation, kinetics, submillimeter sonogalvanoplastika, sonoselektivnost, polarization*

**Введение**

Задачей гальванопластики является электролитическое формообразование – изготовление объемных деталей посредством электроосаждения металлов в специально подготовленные катодные формы. Технология включает изготовление формы, подготовку ее

поверхности, электроосаждение металла и отделение готовой детали от формы, причем последняя операция может быть реализована селективным химическим травлением металла формы в присутствии металла гальванопластического изделия [1]. При субмиллиметровых размерах гальванопластического изделия или его отдельного узла возникают большие затруднения в заращивании формообразующего углубления, вызванные препятствиями в массообмене, омическими затруднениями и влиянием противодействия капиллярных сил. Как это было установлено в [2-4], наложение достаточно интенсивных ультразвуковых колебаний способствует преодолению этих препятствий за счет эффекта аррениусовской размерно-кавитационной селективности, впервые выявленного при разработке способа ультразвукового гальванического заращивания коммутационных отверстий ГИС СВЧ медью с целью элиминирования СВЧ-индуктивных потерь [5].

В продолжение этих исследований настоящая работа предпринята в целях расширения эффекта АРКС на медную соногальванопластику, для чего предпринята попытка построения математической модели процесса.

### Задача теплопроводности в условиях ультразвуковой кавитации

Рассмотрим металлическую пластину толщиной  $\ell$ , коэффициентом теплопроводности  $K$ , коэффициентом температуропроводности  $\chi$ , в непосредственной близости от которой на расстоянии  $\Lambda \sim \ell$  находится круговой излучатель ультразвука с радиусом  $R_u$  (например, оконечник экспоненциального волновода [6]), обеспечивающий тепловой эквивалент интенсивности ультразвука  $W$ , значительно превышающий кавитационный порог электролита. В этом случае радиальной расходимостью ультразвуковой волны можно пренебречь и считать, что радиус зоны термического влияния (ЗТВ) ультразвука совпадает с радиусом его излучателя  $R_u$  (рис. 1).

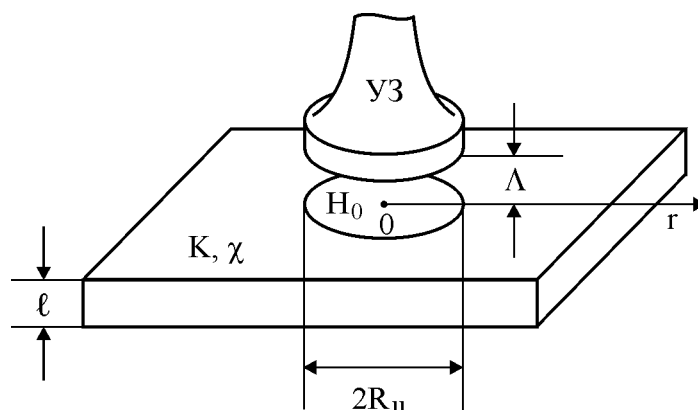


Рис. 1. К постановке задачи теплопроводности при толщине металлической пластины  $\ell$ , много меньшей радиуса кругового излучателя ультразвука  $R_u$  и примерно равной расстоянию от излучателя до пластины  $\Lambda$ .  $H_0$  – локальный коэффициент кавитационного микропузырькового теплообмена ультразвуковой ЗТВ при  $0 \leq r \leq R_u$

Возникающая кавитация обеспечивает генерацию микропузырьков с радиусом  $\bar{r}_\Pi$ , «схлопывающихся» в приповерхностном слое толщиной  $2\bar{r}_\Pi$  с очень высокими термобарическими параметрами ( $T_m$  и  $P_m$ ) за малое время рэлеевской релаксации  $\tau_p = 10^{-7} - 10^{-6}$  с на расстояниях, лишь несколько превышающих  $\bar{r}_\Pi$ . Поэтому, при  $\bar{r}_\Pi \ll R$  «схлопывающийся» кавитационный микропузырек можно интерпретировать как мгновенный точечный источник тепла, а весь стохастический ансамбль кавитационных микропузырьков, «схлопывающихся» в приповерхностном слое – как непрерывный круговой источник тепла, имеющий, в среднем, равномерное распределение интенсивности во времени и в пределах ЗТВ при  $0 \leq r \leq R_u$ .

В этом случае при  $\ell \ll R_u$  соответствующая задача теплопроводности сводится к рассмотренной ранее в [7] задаче по лазерному электроосаждению (ЛЭО) металлов, и при коэффициенте кавитационного микропузырькового теплообмена в пределах ЗТВ, равном  $H_0$ , можно записать следующее выражение для средней температуры кавитационного нагрева пластины, отсчитанной от температуры электролита:

$$\bar{t}_s = \frac{\bar{i}_{\Pi} S W}{2 \Omega H_0} \left[ 2 - \frac{1}{R_u} \sqrt{\frac{K \ell}{2 H_0}} \left( 1 - e^{\sqrt{\frac{2 H_0}{K \ell}} R_u} \right) \right], \quad (1)$$

где  $S/\Omega$  – отношение поверхность/объем для кавитационной области, которое в данном случае равно  $\Lambda^{-1}$ .

Кавитационные микропузырьки, «схлопывающиеся» в слое толщиной  $\Lambda - 2\bar{r}_{\Pi}$ , обеспечивают нагрев электролита. Выделяемое в объем электролита от излучателя ультразвука тепло быстро переносится в периферийные области электрохимической ячейки макроакустическими течениями типа течения Экарта [6].

Тем самым идет ультразвуковой нагрев объема электролита, который можно определить по следующей калориметрической формуле:

$$t_{\Omega}(\tau) = \frac{W \tau}{\rho_{ж} c_{ж}} \cdot \frac{S_u}{\Omega_{я}} \quad (2)$$

где  $\rho_{ж}$  и  $c_{ж}$  – плотность и удельная теплоемкость электролита.

Итак, если нагрев (поверхности) пластины увеличивается с  $W$ , уменьшаясь с  $H_0$ ,  $\Lambda$  и не зависит от времени воздействия ультразвука  $\tau$ , то нагрев объема электролита возрастает пропорционально дозе поглощенной ультразвуковой энергии  $W\tau$  и отношению поверхность излучателя/объем ячейки  $S_u/\Omega_{я}$ , зависящему от конструктивных решений.

Поскольку величина  $\bar{t}_s$  отсчитывается от температуры электролита  $T_0 + t_{\Omega}(\tau)$ , то с увеличением дозы  $W\tau$  эффективность ультразвукового кавитационного нагрева поверхности уменьшается, тем более что по мере приближения к температуре кипения электролита нарастает вклад паровой кавитации, характеризуемой снижением термобарических параметров «схлопывания».

### Теория термически стимулированного соноэлектроосаждения (СОЭ) металла на поверхности пластины-матрицы

Пусть на поверхности пластины, находящейся в растворе электролита при катодном перенапряжении  $\eta < 0$ , реализуется электрохимическая реакция выделения металла:



протекающая в режиме смешанной активационно-диффузионной ED-кинетики. Тогда для плотности тока электроосаждения металла можно записать [8]:

$$i = VT \left( 1 - \frac{i}{i_D} \right) \cdot i_0 e^{-\frac{\alpha^* F \eta}{RT}}, \quad (4)$$

где  $VT$  – выход металла по току, учитывающий влияние параллельной реакции катодного выделения водорода,

$i_D$  – плотность предельного тока диффузии,

$i_0$  – плотность тока обмена при комнатной температуре  $T_0 = 298$  К,

$\alpha^*$  – эффективный коэффициент переноса.

При  $i_D \gg i$  плотность тока электроосаждения металла приобретает «кинетический» характер (E – кинетика):

$$i_M^0 = BT \cdot i_0 e^{-\frac{\alpha F \eta}{RT}} \quad (5)$$

Рассмотрим протекание электрохимической реакции выделения металла со смешанной ED-кинетикой в окрестности «схлопывающегося» кавитационного микропузырька с радиусом  $\bar{r}_\Pi$ .

Согласно [9] скорость движения границы раздела фаз при «схлопывании» варьируется в пределах  $v_{ж} = 7,3 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$  см/с, и соответствующий критерий Рейнольдса (Re) определяется выражением:

$$Re = \frac{2\bar{r}_\Pi v_{ж}}{\nu_{ж}}, \quad (6)$$

и при  $\bar{r}_\Pi = 15 \cdot 10^{-4}$  см и кинематической вязкости электролита  $\nu_{ж} = 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с составляет от  $Re = 2190$  до  $Re = 12000$ . Нижняя граница  $Re = 2190$ , относящаяся к паровой кавитации, соответствует ламинарному осесимметричному кавитационному микропотоку электролита и толщине диффузионного слоя [10]:

$$\delta_D = 3(\bar{r}_\Pi)^{1/2} \cdot v_{ж}^{-1/2} \cdot \nu_{ж}^{1/6} \cdot D^{1/3} \quad (7)$$

которая при  $D = 7,2 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с (коэффициент диффузии катионов  $Cu^{2+}$ ) составляет всего лишь  $\delta_D = 1,18 \cdot 10^{-6}$  см, что свидетельствует о разрушении диффузионного слоя в непосредственной близости от «схлопывающихся» кавитационного микропузырька. Тем более это относится к «воздушной» кавитации, обеспечивающей турбулентный микропоток «схлопывания» с  $Re = 12000$ .

Пусть  $r^*$  – пороговое расстояние, на которое распространяется ускоряющее действие ударной кавитационной волны «схлопывания», отсчитанное от центра проекции кавитационного микропузырька с радиусом  $\bar{r}_\Pi$ . Тогда, проводя аналогию с феноменологической моделью локального лазерного электроосаждения (ЛЭО) металла [7], на основании вышеизложенного можно записать следующее выражение для локальной плотности тока термически стимулированного СЭО металла:

$$i(r, \tau) = BT \left[ 1 - X(\bar{r}_\Pi - r) \frac{r - \bar{r}_\Pi}{r^* - \bar{r}_\Pi} \right] \cdot i_M^0 \cdot e^{\frac{A_E [\bar{t}_s + t_\Omega(\tau)]}{RT_0 [T_0 + \bar{t}_s + t_\Omega(\tau)]}} \quad (8)$$

где  $X(\bar{r}_\Pi - r) = \begin{cases} 0, r \leq \bar{r}_\Pi \\ 1, r > \bar{r}_\Pi \end{cases}$  – функция эвсайда, учитывающая установленное выше

полное элиминирование диффузионных ограничений в центре ультразвуковой ЗТВ при  $r \leq \bar{r}_\Pi$ .

Для дальнейшего обсуждения более целесообразно использовать среднерадиальную плотность локального тока СЭО металла:

$$\bar{i}(\tau) = \frac{1}{r^*} \int_0^{r^*} i(r, \tau) dr = 0,5 BT \left( 1 + \frac{\bar{r}_\Pi}{r^*} \right) \cdot i_M^0 \cdot e^{\frac{A_E [\bar{t}_s + t_\Omega(\tau)]}{RT_0 [T_0 + \bar{t}_s + t_\Omega(\tau)]}} \quad (9)$$

Рассматривая динамику развития кавитационной области, можно получить следующее выражение для поверхностной концентрации «схлопывающихся» кавитационных микропузырьков:

$$n_s = \frac{2\bar{r}_\Pi n_\infty \tau_P f}{M} \quad (10)$$

где отношение  $\tau_P f / M$  отвечает доле «схлопнувшихся» микропузырьков.

Очевидно, что доля поверхности, занятой кавитационными ударными волнами, ускоряющими электроосаждение металла с ED-кинетикой, может быть выражена в виде:

$$\Phi = \pi(r^*)^2 n_s = \frac{2\pi(\bar{r}^*)^2 \bar{i}_{\Pi} n_{\infty} \tau_p f}{M} \quad (11)$$

и подставляя вместо  $\bar{r}_{\Pi}$ ,  $\tau_{\infty}$ ,  $\tau_p$ ,  $M$ ,  $n_{\infty}$  их значения для пузырьков Минаэрта [11], нетрудно получить:

$$\Phi = 1,83 \frac{(m-1)(r^*)^2 f^2 W^2}{a^2 \bar{v}_{\Pi} \Psi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{P_0}} \quad (12)$$

Плотность тока СЭО металла на пластину после этого можно рассчитать из соотношения:

$$i(\tau) = \bar{i}(\tau) \Phi = 0,915 \left( 1 + \frac{\bar{r}_{\Pi}}{r^*} \right) \left( \frac{r^*}{\bar{r}_{\Pi}} \right)^2 \text{ ВТ} \times \\ \times i_M^0 \frac{(m-1) \bar{r}_{\Pi}^2 f^2 W^2}{a^2 \bar{v}^2 \Psi} \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{P_0}} \cdot e^{\frac{A_E [\bar{t}_s + t_{\Omega}(\tau)]}{RT_0 [\bar{T}_0 + \bar{t}_s + t_{\Omega}(\tau)]}} \quad (13)$$

выражающего эту величину с точностью до неопределенного численного множителя  $(1 + \bar{r}_{\Pi}/r^*)(r^*/\bar{r}_{\Pi})^2$ , являющегося константой теории.

Для избавления от этой константы примем гипотезу «близкодействия» кавитационного «схлопывания», согласно которой ударная волна отражается поверхностью пластины – катода в нормальном направлении при  $r^* \approx \bar{r}_{\Pi}$  и  $(1 + \bar{r}_{\Pi}/r^*)(r^*/\bar{r}_{\Pi})^2 \approx 2$ . Кроме этого, еще раз воспользуемся формулой Минаэрта [11] для выражения  $\bar{r}_{\Pi}$ . В результате получается выражение:

$$i(\tau) = 1,37 \text{ ВТ} \cdot i_M^0 \frac{\gamma W^2}{\pi^2 a^2 \bar{v}_{\Pi} \Psi} \sqrt{\frac{P_0}{\rho_{ж}}} \cdot e^{\frac{A_E [\bar{t}_s + t_{\Omega}(\tau)]}{RT_0 [\bar{T}_0 + \bar{t}_s + t_{\Omega}(\tau)]}} \quad (14)$$

согласно которому нестационарная плотность тока СЭО металла на пластину, локализованная в пределах ультразвуковой кавитационной ЗТВ, резко возрастает с интенсивностью ультразвука  $W$  и, для преобладания крупных пузырьков Минаэрта, не зависит от частоты ультразвука  $f$ .

### Теория термически стимулированного СОЭ металлов в каналах формообразующих углублений

Предположим, что в пределах ЗТВ на пластине-матрице выполнено формообразующее углубление, имеющее хотя бы одну ось симметрии, площадь поверхности  $S$ , объем  $\Omega$  и начальный характерный размер  $\Delta_0 \ll R_u$ , которые удовлетворяют простому соотношению:

$$S/\Omega = \varphi/\Delta_0, \quad (15)$$

где  $\varphi$  – численный коэффициент, который можно назвать форм-фактором углубления.

Параметры  $S$ ,  $\Omega$ ,  $S/\Omega$ ,  $\Delta_0$  и  $\varphi$  для некоторых углублений с простой геометрией приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения  $S$ ,  $\Omega$ ,  $S/\Omega$ ,  $\Delta_0$  и  $\varphi$  для углублений простой формы.

Тип углубления	$S$	$\Omega$	$S/\Omega$	$\Delta_0$	$\varphi$
----------------	-----	----------	------------	------------	-----------

Пластина с шириной $a$ , длиной $b$ и расстоянием до плоскости излучателя ультразвука $\Lambda$	$ab$	$ab\Lambda$	$\Lambda^{-1}$	$\Lambda$	1
Прямоугольная щель или глухой паз с шириной $a$ , длиной $b$ и глубиной $L$ при $a \ll L$ и $b \gg a$	$2bL$	$abL$	$2a^{-1}$	$a/2$	1
Квадратное сквозное или глухое отверстие со стороной квадрата $a$ и глубиной $L$ при $a \ll L$	$4aL$	$a^2L$	$4a^{-1}$	$a/2$	2
Цилиндрическое сквозное или глухое отверстие с радиусом $R$ и глубиной $L$ при $R \ll L$	$2\pi RL$	$\pi R^2L$	$2R^{-1}$	$R$	2
Кубическое углубление со стороной куба $a$	$5a^2$	$a^3$	$5a^{-1}$	$a/2$	2,5
Круговое коническое углубление с радиусом $R$ и глубиной $L$	$\pi RL$	$1/3\pi R^2L$	$3R^{-1}$	$R$	3
Усеченное коническое углубление с радиусом верхнего устья $r$ , нижнего устья $R$ и глубиной $L$	$\pi(R+r)L$	$\frac{\pi L}{3} \times (R^2+Rr+r^2)$	$\frac{3(R+r)}{R^2+Rr+r^2}$	$\frac{R^2+Rr+r^2}{R+r}$	3
Полусферическое углубление с радиусом $R$	$2\pi R^2$	$2/\pi R^3$	$3R^{-1}$	$R$	3

При наложении ультразвука происходит постепенное зарастивание этих формообразующих углублений металлом, и характерный размер уменьшается со временем озвучивания по линейному закону:

$$\Delta = \Delta_0 - \bar{j}_\Delta \tau \quad (16)$$

где  $\bar{j}_\Delta$  – средняя линейная скорость гальванического зарастивания.

Для времени полного зарастивания углубления  $\tau_\Delta$  выполняется очевидное соотношение:

$$\Delta_0 = \bar{j}_\Delta \tau_\Delta \quad (17)$$

В связи с этим появляется возможность усреднения температуры ультразвукового нагрева объема электролита по  $\tau_\Delta$ . На основании соотношения (2) при этом получается:

$$\bar{t}_\Omega = \frac{1}{\tau_\Delta} \cdot \int_0^{\tau_\Delta} t_\Omega(\tau) d\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{W\tau_\Delta}{\rho_{ж}c_{ж}} \cdot \frac{S_u}{\Omega_\Delta} \quad (18)$$

Поэтому выражение для средней плотности тока СЭО металла в углублении приобретает вид:

$$\bar{i}_\Delta = 1,37 \cdot VTi_M^0 \frac{\gamma W^2}{\pi^2 a^2 \bar{v}_\Pi \Psi} \sqrt{\frac{P_0}{\rho_{ж}}} \cdot e^{\frac{A_E [t_s + t_\Omega]}{RT_0 [T_0 + t_s + t_\Omega]}} \quad (19)$$

или, с учетом  $\bar{T}_S = T_0 + \bar{t}_S + \bar{t}_\Omega$  (поскольку  $\bar{t}_S$  отсчитывается от  $\bar{t}_\Omega$ ) и при подстановке  $\bar{t}_S, \bar{t}_\Omega, S/\Omega$ , соответственно, получаем:

$$\bar{i}_{\Delta} = 1,37BT \frac{\gamma W^2}{\pi^2 a^2 \bar{v}_{\Pi} \Psi} \sqrt{\frac{P_o}{\rho_{ж}}} \cdot i_E^o \cdot e^{-\frac{\alpha^* FE}{R \bar{T}_S}} \cdot e^{\frac{A_E \tau_{\Delta} W}{2 \rho_{ж} c_{ж} R T_o \bar{T}_S}} \cdot \frac{S_u}{\Omega_{я}} \times$$

$$\times e^{\frac{A_E \phi W}{4 \pi f \Delta_o H_o}} \sqrt{\frac{3 \gamma \cdot P_o}{\rho_{ж}}} \left[ 2 - \frac{1}{R_U} \sqrt{\frac{K \ell}{2 H_o}} \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{2 H_o}{K \ell}} R_U} \right) \right] \quad (20)$$

где  $i_E^o = i_o \cdot e^{\frac{\alpha^* FE_p}{R \bar{T}_S}}$ ,  $E_p$  – равновесный потенциал  $M/M^{z+}$  при температуре СЭО металла  $\bar{T}_S$  и применима формула Минаэрта для  $\bar{r}_{\Pi}$ .

Для средней линейной скорости зарастивания

$$\bar{j}_{\Delta} = \frac{A_M}{\rho_M z F} \quad (21)$$

на основании вышеизложенного, получаем:

$$\bar{j}_{\Delta} = 1,37BT \frac{\gamma A_M W^2}{\pi^2 a^2 \rho_M z v_{\Pi} \Psi} \sqrt{\frac{P_o}{\rho_{ж}}} \cdot i_E^o \cdot e^{-\frac{\alpha^* FE}{R \bar{T}_S}} \cdot e^{\frac{A_E \tau_{\Delta} W}{2 \rho_{ж} c_{ж} R T_o \bar{T}_S}} \cdot \frac{S_u}{\Omega_{я}} \times$$

$$\times e^{\frac{A_E \phi W}{4 \pi f \Delta_o H_o}} \sqrt{\frac{3 \gamma P_o}{\rho_{ж}}} \left[ 2 - \frac{1}{R_u} \sqrt{\frac{K \ell}{2 H_o}} \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{2 H_o}{K \ell}} R_u} \right) \right] \quad (23)$$

Отсюда следует, что средняя линейная скорость зарастивания формообразующих углублений в соногальванопластике на эффекте АРКС увеличивается с  $E$ ,  $W$ ,  $P_o$ ,  $\phi$ ,  $S_u/\Omega_{я}$  и уменьшается с  $f$ ,  $\Delta_o$ ,  $K$ ,  $\ell$ ,  $H_o$ .

Пусть величина катодного потенциала  $E$  настолько отрицательна, что электроосаждение металла в формообразующее углубление идет в режиме предельного тока диффузии (D-кинетика). Тогда на основании критериального уравнения массообмена естественной конвекции [12]:

$$Nu_{\Delta} = \varepsilon (Gr_{\Delta}^* Pr)^{1/4} \quad (24)$$

нетрудно рассчитать плотность предельного диффузионного тока в виде:

$$i_{W=0}^{\Delta} = \frac{\varepsilon F D_o C_o (Gr_{\Delta}^* Pr)^{1/4}}{2 \Delta_o} \quad (25)$$

где  $\varepsilon < 1$  – некоторый численный множитель, характеризующий эффективность естественной конвекции (например,  $\varepsilon = 0,5$  – для пластины и  $\varepsilon = 0,76$  – для цилиндрического отверстия),

$Nu_{\Delta} = 2 \Delta_o / \delta_D$  – критерий Нуссельта,

$\delta_D$  – толщина диффузионного слоя при естественной конвекции,

$Gr_{\Delta}^* = 8 \Delta_o^3 h [g C_o - \delta_{\Delta} / (\Delta_o L_{\Delta})] / \nu_{ж}^2$  – модифицированный с учетом противодействия капиллярных сил критерий Грасгофа,

$C_o$  – объемная концентрация  $M^{z+}$ ,



$h = \partial \ln \rho_{ж} / \partial C_0$  - концентрационный коэффициент плотности электролита,

$g = 981 \text{ см/с}^2$  - ускорение силы тяжести,

$\delta_{\Delta}$  - коэффициент поверхностного натяжения на границе поверхности углубления с электролитом,

$L_{\Delta}$  - вертикальный размер углубления,

$\gamma_{ж}$  - кинематическая вязкость электролита,

$D_0$  - коэффициент диффузии  $M^{z+}$ ,

$Pr = \nu_{ж} \cdot D_0$  - критерий Прандля.

Если определить коэффициент соноускорения как

$$K_Y = \bar{i}_{\Delta} / \bar{i}_{W=0} \quad (26)$$

то, на основании вышесказанного, можно записать:

$$K_Y = 2,74 \text{ ВТ} \frac{\gamma \Delta_0 W^2}{\pi^2 a^2 \varepsilon \bar{v}_{II} \psi F D_0 C_0 (Gr_{\Delta}^* Pr)^{1/4}} \sqrt{\frac{P_0}{\rho_{ж}}} \cdot i_E^0 \cdot e^{-\frac{\alpha^* FE}{R T_S}} \times$$

$$\times e^{\frac{A_E \tau_{\Delta} W}{2 \rho_{ж} c_{ж} R T_0 T_S} \cdot \frac{S_v}{\Omega_{\alpha}} \cdot e^{-\frac{A_E \phi W}{4 \pi f \Delta_0 H_0} \sqrt{\frac{3 \gamma \cdot P_0}{\rho_{ж}}} \left[ 2 - \frac{1}{R_v} \sqrt{\frac{K \ell}{2 H_0}} \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{2 H_0}{K \ell}} R_v} \right) \right]}} \quad (27)$$

Коэффициент соноселективности можно определить как

$$K_C = \bar{i}_{\Delta} / \bar{i}_{\square} \quad (28)$$

где  $\bar{i}_{\square}$  - средняя плотность тока СЭО металла на поверхности пластины-матрицы за время заравнивания углубления.

По соотношению (20) и данным табл. 1 (первая строка) при этом получается:

$$K_C = e^{\frac{A_E W}{4 \pi \cdot f H_0} \left( \frac{\phi}{\Delta_0} - L^{-1} \right) \cdot \sqrt{\frac{3 \gamma \cdot P_0}{\rho_{ж}}} \left[ 2 - \sqrt{\frac{K \ell}{2 H_0}} \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{2 H_0}{K \ell}} R_v} \right) \right]} \quad (29)$$

Из выражений (27) и (29) видно, что значения  $K_Y$  порядка нескольких десятков и  $K_C$  порядка нескольких единиц можно получить в субмиллиметровом диапазоне характерных размеров формообразующих углублений при  $\phi/\Delta_0 \gg 1/L$  при относительно небольших коэффициентах теплопроводности материала матрицы [13, 14]. Для частоты ультразвука  $f = 2$  кГц нижняя граница селективного СЭО в формообразующие углубления отвечает условию  $\Delta_0 \cong \bar{r}_{II} = 100$  мкм, а верхняя -  $\Delta_0 \cong \phi L$ , что и оправдывает название эффекта АРКС. При этом кавитация, проникающая через устья в субмиллиметровые полости углублений, из-за размерного эффекта оказывает значительно большее ускоряющее воздействие на электрохимический процесс по сравнению с кавитацией на поверхности пластины, «обманывая» тем самым традиционное первичное и вторичное распределение плотности тока [15], т.е. давая аномальную экзальтацию [3].

Физический смысл аномального влияния  $\Delta_0$  и  $\phi$  на скорость СЭО металлов в углублениях заключается в более эффективном гидродинамическом и термобарическом воздействии кавитации на локализованные в субмиллиметровых полостях углублений электрохимические процессы, что обусловлено многократным отражением ударных волн от

стенок углубления и затрудненностью рассеяния тепловой энергии при  $\Delta_0 \cong \bar{\Gamma}_{II}$  и  $\varphi = 2-3$ . Эрозионное влияние кавитации на образуемое покрытие, напротив, резко снижается, поскольку уже наличие близлежащей второй отражательной стенки (щели или паза с  $\varphi = 1$  во второй строке табл. 1) способствует формированию кольцевой кумулятивной струи, делящей пузырек на две части и снижающей эрозивную активность, которую принято связывать с векторной кумулятивной струйкой, направленной к одной из двух отражающих стенок. Это было подтверждено экспериментами, в которых наблюдалось снижение интенсивности эрозионного процесса при кавитации в зазоре между двумя близко расположенными стенками [9]. По-видимому, кавитационная эрозия в узких высокосимметричных углублениях с  $\varphi = 2-3$  еще более ослаблена из-за дробления пузырька на большое число частей, вызванного многократным отражением кумулятивной струйки от стенок.

Противоречивой является роль параллельной реакции выделения водорода в процессах локального СЭО металлов. С одной стороны, накопление водорода в коллекторах катодной поверхности будет способствовать увеличению числа зародышей ультразвуковой кавитации и росту кавитационного индекса [3], а с другой – снижать ВТ и силовые термодинамические и термобарические параметры кавитационного «схлопывания» за счет малой молекулярной массы и большой теплопроводности водорода, которая в 7,5 раз превышает теплопроводность воздуха [16]. Впрочем, соноэлектрохимическое выделение водорода представляет самостоятельный интерес.

### Заключение

Согласно построенной нами математической модели электрохимического процесса на эффекте АРКС, адиабатическое «схлопывание» кавитационных микропузырьков приводит к росту плотности тока СЭО металлов с увеличением интенсивности ультразвука, фактора симметрии углубления и уменьшением его характерного размера по сложному экспоненциальному закону. При этом цепная природа термомеханической стимуляции электрохимической реакции отвечает пропорциональности коэффициента размножения зародышей кавитации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Попилков Л.Я. Гальванопластика. М.-Л.: Машгиз, 1961. 272 с.
2. Серянов Ю.В., Гришанин В.А., Волик Г.С. Влияние ультразвука на осаждение меди в каналах узких отверстий. Экспериментальные результаты // Электрохимия. 1998. Т.29, №5. С. 655-659.
3. Серянов Ю.В. Влияние ультразвука на осаждение меди в узких каналах. Механизм возбуждения и кинетика водородно-кавитационной экзальтации катодного тока // Электрохимия. 1993. Т. 29, №8. С. 983-988.
4. Серянов Ю.В. Ультразвуковое электроосаждение меди в каналах узких отверстий. Аррениусовская размерно-кавитационная селективность. / Ю.В.Серянов, Л.М.Квятковская, В.А.Гришанин // Электрохимия. – 1994. – Т. 30, № 3. – С. 403-405.
5. Серянов Ю.В. Ультразвуковое заравнивание каналов заземляющих отверстий МПП ГИС при электролитическом осаждении меди в режиме водородно-кавитационной экзальтации тока // Спецэлектроника: Сер 1. СВЧ-техника. 1992. Вып. 1-2. С. 83-88.
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: Советская Энциклопедия, 1979. 400 с.
7. Серянов Ю.И., Фоменко Л.А. Роль паровой кавитационной модуляции скорости реакций лазерного осаждения металлов // Электрохимия. 1998. Т. 73. С. 1066-1071.
8. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М.: Химия, 1967. 856 с.
9. Маргулис М.А. Основы звукохимии. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.
10. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физ-матгиз, 1959. 358 с.
11. Minaert M., Phil. Mag., 1933. V.16. P. 235.
12. Михеев М.А., Михеева А.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

13. Серянов Ю.В., Квятковская Л.М., Гришанин В.А. Оптимизация ультразвукового электроосаждения сплава олово-висмут в каналах узких коммутационных отверстий интегральных схем // Защита металлов, 1993. Т. 30, № 6. С. 938-931.

14. Серянов Ю.В., Квятковская Л.М., Гришанин В.А. Оптимизация ультразвукового электроосаждения меди в каналах узких коммутационных отверстий интегральных схем. // Защита металлов, 1994. Т. 30. № 30. С. 330-332.

15. Шацова С.А. Воздействие ультразвука на электрохимическое получение металлов из цианистых ванн. // ЖПХ, 1961. Т. 34. № 2. С. 331-335.

16. Химическая энциклопедия. / Под ред. Н.С.Зефирова. М.: Большая Российская энциклопедия. Т. 1-4, С. 1986-1995.

**Фоменко Любовь Афанасьевна** –  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Биотехнология и химия» Саратовского  
государственного аграрного университета  
имени Н.И. Вавилова

**Fomenko Lubov Afanasyevna** –  
Doctor of Technical Sciences, professor of the  
Department "Biotechnology and Chemistry",  
Saratov State Agrarian University on Name  
N.I. Vavilov

**Ловцова Лариса Геннадиевна** –  
старший преподаватель кафедры  
«Биотехнология и химия» Саратовского  
государственного аграрного университета  
имени Н.И. Вавилова

**Lovtsova Larisa Gennadievna** –  
Senior Lecturer of the Department  
"Biotechnology and Chemistry", Saratov State  
Agrarian University on Name N.I. Vavilov

**Серянов Юрий Владимирович** –  
доктор химических наук, ныне покойный

**Seryanov Yuri Vladimirovich** –  
Doctor of Chemical Sciences, is now dead

*Статья поступила в редакцию 07.04.2011, принята к опубликованию 08.08.2011*

УДК 621.9.02: 823(088.8)

**А.А. Серегин****РАСЧЁТ ПРОФИЛЯ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЗУБЬЕВ С ПЕРЕМЕННЫМ  
ЗНАЧЕНИЕМ ДИАМЕТРА ОСНОВНОЙ ОКРУЖНОСТИ**

*Приведены зависимости для расчёта и построения профиля зубьев колёс, обеспечивающих уменьшение коэффициента относительного скольжения.*

Зубчатая передача, коэффициент относительного скольжения, коэффициент профильного перекрытия, ЭПЭ профиль, модульные фрезы

**A.A. Seregin****PROFIL CALCULATION EVOLVENT'S TEETHS WITH VARIABLE VALUE  
DIAMETER OF THE BASIS CIRCL**

*Dependences for calculation and construction of a profile of cog of the cog-wheels providing reduction of coefficient of relative sliding are resulted.*

Gear, coefficient of relative sliding, coefficient of profile overlapping, EVE profile, pitch's milling cutter

Важнейшим резервом повышения долговечности эвольвентных зубчатых передач машин и механизмов и снижения затрат на их содержание и ремонт является уменьшение износа поверхностей зубьев. Одним из способов снижения износа является изменение характера контакта зубьев.

Профилирование зубьев по эвольвенте с переменной эволютой (ЭПЭ профиль) выгодно отличается тем, что обеспечивает уменьшение коэффициента относительного скольжения зубьев до 21% при сохранении передаточного отношения постоянным и обеспечении коэффициента  $\mathcal{E}$  профильного перекрытия  $1 < \mathcal{E} < 2$ . Однако формообразование ЭПЭ профиля возможно только методом копирования. Необходимо отметить, что методик расчёта ЭПЭ профиля модульных фрез в литературе не обнаружено.

Рассмотрим теоретическое обоснование зависимости изменения радиуса основной окружности ЭПЭ профиля зубьев. Оно базируется на следующих положениях теории зубчатых зацеплений.

С увеличением радиуса основной окружности увеличивается радиус-вектор  $\rho_C$  точки контакта зубьев зубчатого зацепления, который определим следующей зависимостью:

$$\rho_C = r_C \psi_C, \quad (1)$$

где  $r_C$  – радиус основной окружности, соответствующий некоторой С-й точке контакта зубьев передачи;

$\psi_C$  – угол развёрнутости эвольвенты, соответствующий С-й точке.

Необходимо отметить, что начало радиус-вектора  $\rho_C$ , определяемого по формуле (1), непостоянно в пространстве. Мгновенный центр  $\rho_C$  находится на линии основной окружности и принимает положения, соответствующие углу развёрнутости  $\psi_C$ .

При увеличении радиус-вектора точек контакта зубьев зубчатой передачи уменьшается коэффициент относительного скольжения зубьев  $\lambda$ , так как последний находится в обратно пропорциональной зависимости от радиус-вектора согласно формуле:

$$\lambda = (1 + i_{12}) \frac{P_0 C}{\rho_C}, \quad (2)$$

где  $i_{12}$  – передаточное отношение зацепления;

$P_0 C$  – расстояние от полюса  $P_0$  зацепления до  $C$ -й точки контакта зубьев.

Увеличение радиус-вектора в формуле (2) ограничено значением необходимой величины коэффициента профильного перекрытия зубьев  $\mathcal{E} > 1$  [1]. Приблизённо величину коэффициента перекрытия зубьев можно определить, заменив длину практической линии зацепления длиной теоретической линии:

$$\mathcal{E} = \frac{A \cdot R^2}{\pi m r_o^2}. \quad (3)$$

Для сохранения передаточного отношения постоянным и нечувствительным к монтажным погрешностям необходимо, чтобы отношение радиусов условных основных окружностей было всегда равно передаточному отношению зацепления во всех точках контакта зубьев практической линии зацепления. Исходя из условия  $\mathcal{E} > 1$  и формулы (3), возрастание радиусов условных окружностей лежит в пределах:

$$r_o \leq r \leq R \sqrt{\frac{A}{\pi m}}. \quad (4)$$

Используя систему ограничений (4) применительно к полярным координатам и принимая за параметр угол развёрнутости эвольвенты профиля зуба, получаем зависимость радиуса основной окружности профиля зубьев:

$$r = r_0 + \frac{\left[ \left( R \sqrt{\frac{A}{\pi m}} - r_0 \right) \right]}{\operatorname{tg} \left( \cos \frac{r_0}{R} \right)} \cdot \psi, \quad (5)$$

где  $r$  – радиус основной окружности как функция от текущего значения угла развёрнутости эвольвенты  $\psi$ ;

$r_0$  – радиус основной окружности, являющейся эволютой профиля зубьев аналогичного колеса, но с постоянной эволютой;

$R$  – наружный радиус наименьшего колеса;

$A$  – межосевое расстояние;

$m$  – модуль зацепления.

Изменение радиусов основных окружностей зубьев колёс, участвующих в передаче, обеспечивает уменьшение коэффициента скольжения зубьев. Коэффициент скольжения уменьшается для мелко модульных колёс от 2% у головки зуба до 7% у ножки, для крупномодульных – от 6,5% у головки до 21% у ножки. Коэффициент скольжения изменяется за счёт замены относительного проскальзывания зубьев колеса и шестерни качением. Это достигается за счёт изменения радиуса кривизны поверхности зубьев в пределах, допускаемых коэффициентом перекрытия.

Расчёт по формуле (5) показывает, что головка зуба колеса ЭПЭ профиля к наружному диаметру имеет меньшее сужение, чем у эвольвентного профиля. Для устранения возможного заклинивания от нагрева при работе зубчатого зацепления предлагаемой

конструкции необходимо предусматривать расширение впадин, а также фаску по всей длине вершины головки зуба.

Практическим применением формулы (5) является определение профиля модульных фрез. Профиль режущей кромки зуба фрезы для фрезерования цилиндрических колёс с прямым зубом в точности соответствует профилю впадины колеса. Наибольшую точность при конструировании инструмента даёт аналитический способ определения полярного угла произвольной точки профиля эвольвенты [2].

На рис. 1 дана схема для расчёта значения полярного угла произвольной точки Т, находящейся на режущей кромке зуба фрезы. Центр полярной системы координат ЭПЭ профиля режущей кромки фрезы совпадает с центром обрабатываемого колеса. Ось полярной системы совпадает с осью симметрии модульной фрезы. Необходимо отметить, что полярный угол  $\delta_T$  профиля режущей кромки зуба фрезы отличается от угла развёрнутости  $\psi_T$  эвольвенты на величину  $\alpha_T$ . Но при этом в расчётах нельзя использовать величину  $\delta_T$ , поскольку развёртка эвольвенты начинается при значении полярного угла  $\delta = \delta_0$ . В таком случае расчётное значение  $\delta_p$  полярного угла профиля будет равно:

$$\delta_p = \delta_T - \delta_0, \quad (6)$$

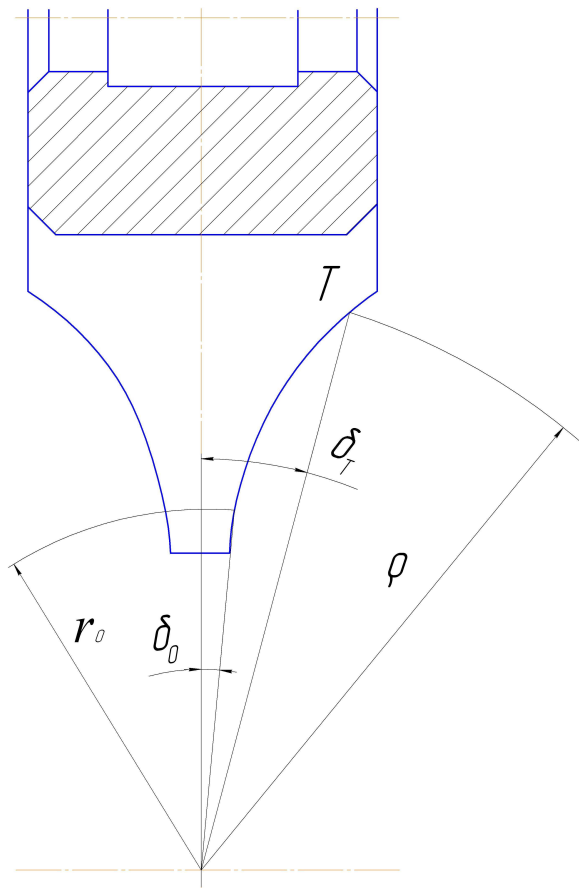


Рис. 1. Схема для расчёта профиля зуба фрезы

где  $\delta_T = \psi_T - \alpha_T$ ;  $\delta_0$  - полярный угол, соответствующий точке пересечения радиуса основной окружности с профилем зуба фрезы;  $\alpha_T$  - угол между радиус-вектором к эвольвенте и направлением радиуса основной окружности [1].

Рассмотрев рис. 1, и используя теорию зубчатого зацепления, определяем значение полярного радиуса произвольной точки ЭПЭ профиля:

$$\rho = \frac{r_0 + \Delta r(\delta_p + \text{arcinv} \delta_p)}{\cos(\text{arcinv} \delta_p)}, \quad (7)$$

Здесь  $\Delta r$  - вариационное изменение радиуса основной окружности, которое равно выражению в квадратных скобках в уравнении (5);  $\text{arcinv} \delta_p$  - функция, обратная инволюте функции полярного угла, широко используется в теории машин и механизмов [1, стр. 239].

Координаты любой точки ЭПЭ поверхности можно определить, решив уравнения (6) и (7). Данные решения были использованы при проектировании инструмента для

В результате испытаний зубчатых передач, содержащих колёса с ЭПЭ профилем, выявлено, что данные передачи сохраняют кинематическую точность и низкие шумовые характеристики в течение более длительного промежутка времени, чем передачи с эвольвентными колёсами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Г.Г. Курс теории механизмов и машин. М.: Машиностроение, 1967. 508 с.
2. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.

**Серегин Андрей Алексеевич** –  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Технология машиностроения,  
металлообрабатывающие станки и  
комплексы» Оренбургского  
государственного университета

**Seregin Andrey Alekseevich** –  
Candidate of Technical Sciences, Assistant  
Professor of the Department “Technology of  
Machine-building, Metal working’s Complex  
and Machine-tools” of Orenburg State  
University

*Статья поступила в редакцию 08.03.2011, принята к опубликованию 08.04.2011*

**С.П. Андросов, И.Г. Браилов**

## **ПЕРЕХОДНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ЗУБА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

*Определены зависимости, выраженные параметрическими векторными функциями, описывающие переходную поверхность зубьев прямозубых и косозубых цилиндрических колес.*

Зубчатое колесо, векторная функция, поверхность зуба, станочное зацепление

**S.P. Androsov, I.G. Brailov**

## **FILLET SURFACE OF CYLINDRICAL GEARS**

*This paper deals with the relations, expressed by parametric vector functions, describing fillet surface of straight and helical cylindrical gear tooth are presented.*

Gear tooth, vector function, tooth surface, machine mesh

Вопросы геометрии и кинематики цилиндрических косозубых передач требуют рассмотрения в пространственном отображении. В таких передачах, с учетом винтовой формы зубьев, условия зацепления сопряженной пары в торцевых сечениях по длине зубчатого венца различные [1]. В связи с этим необходимо рассматривать боковую поверхность зуба, не ограничиваясь только профилем зуба в торцевом сечении.

В пространственном отображении требуется рассматривать и сложные многопараметрические процессы зубообработки инструментами червячного типа. Это в первую очередь относится к вопросам моделирования процессов формообразования зубьев зубчатых колес [2].

Как известно, боковая поверхность зубьев зубчатых колес состоит из двух частей: эвольвентной цилиндрической и переходной. Переходная поверхность соединяет эвольвентную поверхность зуба с поверхностью впадин. В торцевом сечении часть профиля зуба, расположенную в пределах его переходной поверхности, называют переходной кривой. В зависимости от способа изготовления зубьев зубчатых колес переходная кривая может быть очерчена различно: по окружности, по удлиненной и укороченной эвольвентам, по эпициклоиде и другим кривым [1].

Данная работа посвящена описанию переходной поверхности зуба цилиндрических зубчатых колес векторными функциями в параметрах станочных систем.

Формообразование при зубофрезеровании методом обката происходит в станочном зацеплении, в процессе которого инструмент реечного типа формирует на нарезаемом колесе зубья с определенной геометрией и размерами. На рис. 1 приведены параметры исходного контура производящей рейки, которые определяют геометрию переходной поверхности зуба колеса:  $m$  – модуль зуба;  $h_a^*$  – коэффициент высоты зуба;  $c^*$  – коэффициент радиального зазора;  $\rho_{a0}$  – радиус скругления головки зуба;  $\alpha_0$  – угол профиля.

В статье авторами рассматривается переходная поверхность зуба, имеющая в торцевом сечении профиль в виде окружности (рис. 2). Такая переходная поверхность формируется при нарезании зубчатого колеса с положительным смещением исходного контура на величину:



$$\Delta h = x m \quad , \quad (1)$$

где  $x$  – коэффициент смещения.

Значение коэффициента смещения  $x$  определяется из соотношения [3]:

$$h_a^* m + c^* m - x m = \rho_{a0} \quad . \quad (2)$$

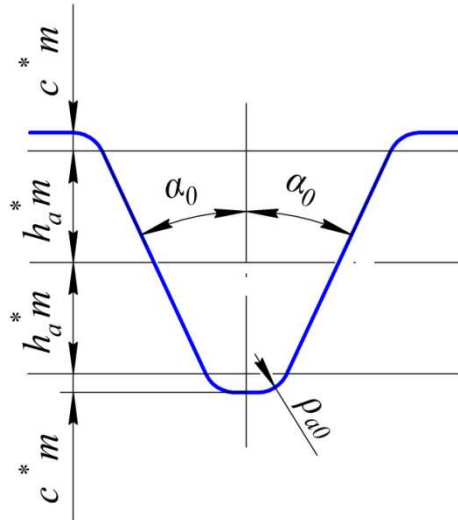


Рис. 1 Параметры исходного контура производящей рейки

Кривая  $LM_2$  (рис. 2) представляет эвольвентную часть профиля зуба колеса, а участок  $M_1L$  – переходную часть профиля. Сопряжение частей профиля происходит в граничной точке  $L$  по касательной, проведенной к обеим его частям. Центр скругления  $O_1$  переходной кривой  $M_1L$  расположен на начальной прямой 2.

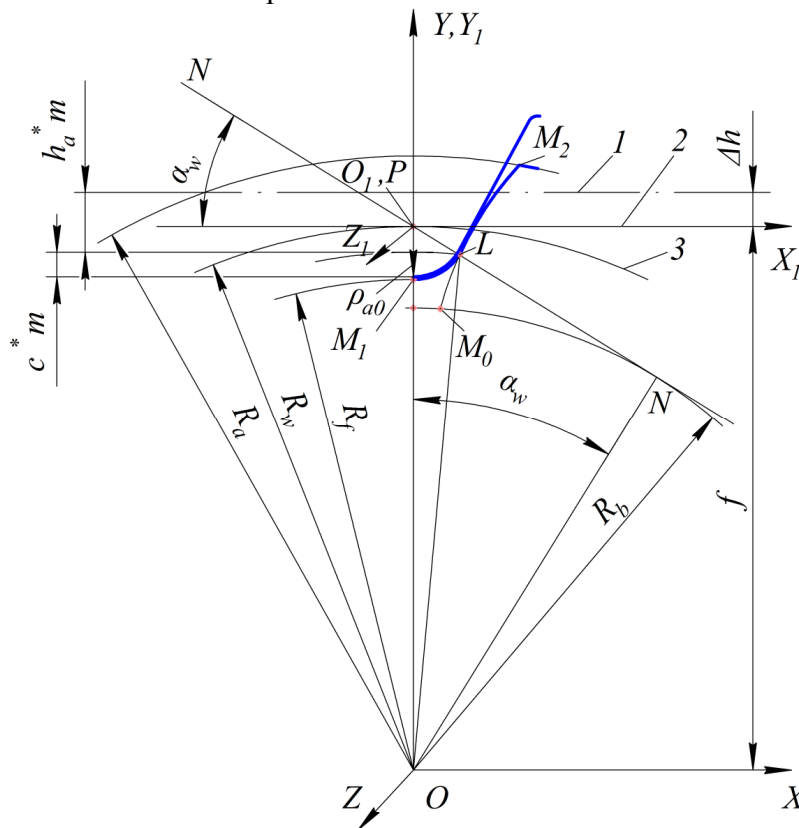


Рис. 2. Формирование переходной кривой:  
 $R_b$  – радиус основного цилиндра;  $R_f$  – радиус цилиндра впадин;

$R_a$  – радиус цилиндра вершин;  $R_w$  – радиус начального цилиндра 3;  $M_0M_2$  – эвольвента;  $NN$  – линия зацепления;  $P$  – полюс зацепления;  $\alpha_w$  – угол зацепления;  $f$  – координата центра скругления  $O_1$  переходной кривой в глобальной системе координат  $XOYZ$ ;  $l$  – средняя линия рейки;  $X_1O_1Y_1Z_1$  – локальная система координат, жестко связанная с исходным контуром производящей рейки

В любой момент формирования переходной кривой контактная нормаль проходит через центр скругления  $O_1$  и полюс станочного зацепления  $P$  [3]. Следовательно, в рассматриваемом случае центр  $O_1$  и полюс  $P$  совпадают.

Координата  $f$  центра скругления  $O_1$  переходной кривой в системе координат  $XOYZ$  равняется радиусу  $R_w$  начального цилиндра зубчатого колеса.

Величина радиуса  $\rho_{a0}$  (рис. 3) вычисляется из соотношения:

$$\rho_{a0} = c^* m + \rho_{a0} \sin \alpha_0, \quad (3)$$

откуда:

$$\rho_{a0} = \frac{c^* m}{1 - \sin \alpha_0}. \quad (4)$$

Переходная кривая  $M_1L$  в торцевом сечении прямозубого колеса в локальной системе координат  $X_1O_1Y_1Z_1$  (рис. 4) описывается векторной функцией:

$$\bar{r}_{ок} = \begin{bmatrix} \rho_{a0} \sin \gamma \\ \rho_{a0} \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

где  $\gamma$  – угол поворота радиуса – вектора  $\bar{r}_{ок}$ . Модуль вектора  $\bar{r}_{ок}$  равен значению радиуса  $\rho_{a0}$ .

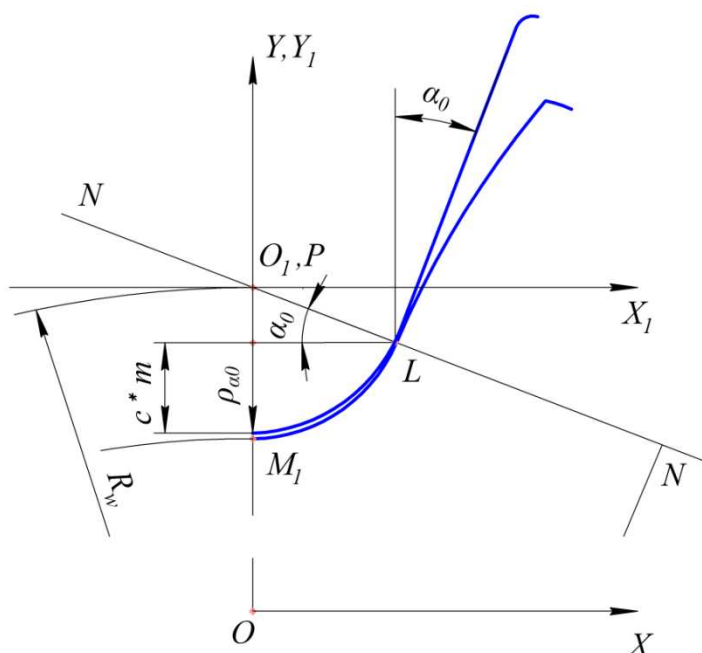


Рис. 3. Определение значения радиуса  $\rho_{a0}$

В глобальной системе координат  $XOYZ$  колеса вектор  $\bar{r}_{н.к}$  переходной кривой в торцевом сечении колеса, восстановленный в точку  $M$ , запишется:

$$\bar{r}_{n.k} = [M] \bar{r}_{ol} + \bar{r}_{ок} , \quad (6)$$

где  $[M]$  – матрица параллельного переноса системы координат;  
 $\bar{r}_{ol}$  – вектор переноса локальной системы координат  $X_l O_l Y_l Z_l$ .

Или в координатной форме:

$$\bar{r}_{n.k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ f \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_{a0} \sin \gamma \\ \rho_{a0} \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{a0} \sin \gamma \\ f + \rho_{a0} \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (7)$$

Произвольная точка  $M'$  (рис. 4) переходной поверхности прямого зуба колеса описывается вектором

$$\bar{r} = \bar{r}_{n.k} + \bar{r}_{см} , \quad (8)$$

где  $\bar{r}_{см}$  – вектор смещения, направленный по оси  $OZ$  колеса.

В координатной форме вектор  $\bar{r}$  имеет вид:

$$\bar{r} = \begin{bmatrix} \rho_{a0} \sin \gamma \\ f + \rho_{a0} \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -V t \end{bmatrix} , \quad (9)$$

где  $V$  – скорость перемещения конца вектора  $\bar{r}$  вдоль оси  $OZ$ ;  
 $t$  – время перемещения.

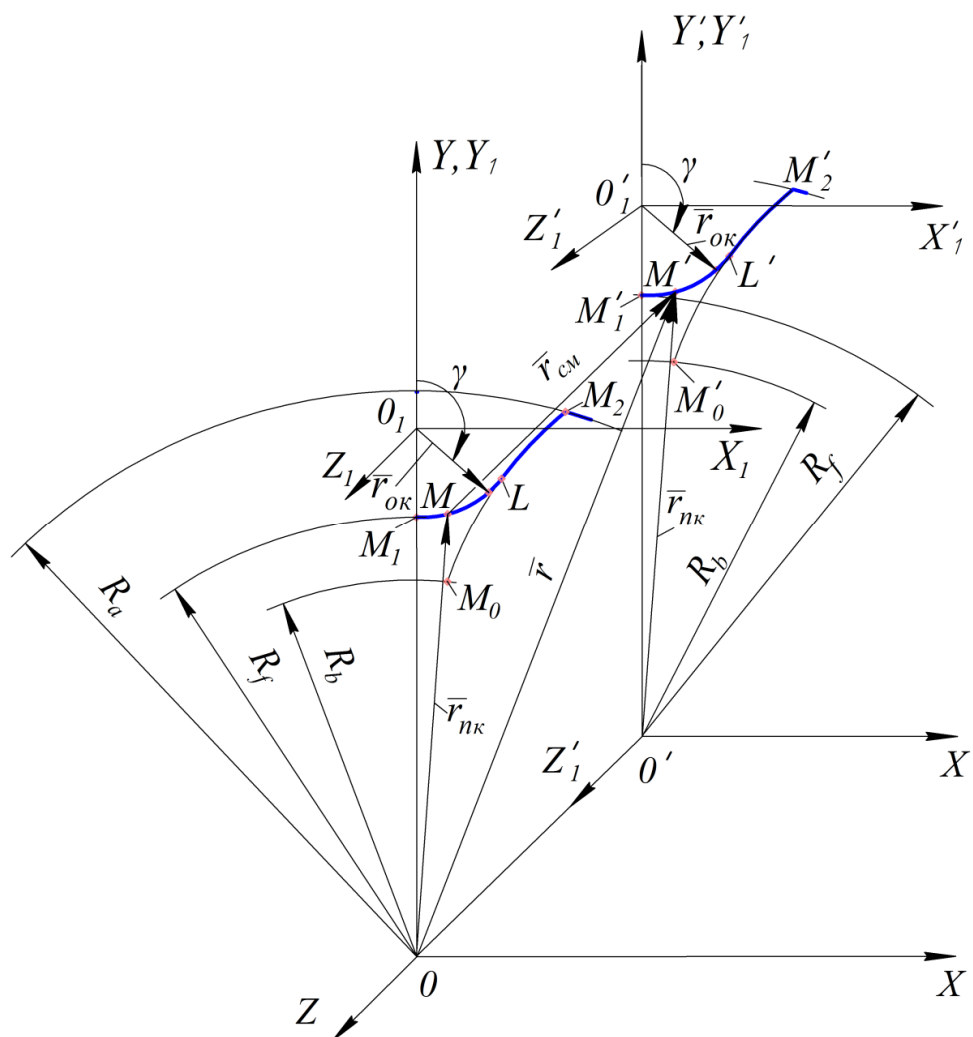


Рис. 4. Переходная поверхность прямого зуба

Для винтового зуба косозубого колеса необходимо учитывать, что каждая точка переходной кривой все время поворачивается в плоскости  $XOY$  на величину угла  $\varphi_1$  (рис. 5).

Текущий параметрический угол  $\varphi_1$  изменяется в пределах от своего нулевого значения до значения  $\varphi_{1\max}$ , которое он принимает на тыльном торцевом сечении зубчатого колеса. Величина  $\varphi_{1\max}$  определяется по формуле:

$$\varphi_{1\max} = \frac{b}{R_b} \operatorname{tg} \beta_b, \quad (10)$$

где  $b$  – ширина зубчатого венца колеса;

$\beta_b$  – угол наклона линии зуба на основном цилиндре.

В результате, после нахождения координат точки  $M'$  переходной кривой в произвольном ее положении, необходимо вектор  $\vec{r}$ , определяемый по формуле (8), повернуть на угол  $\varphi_1$  путем умножения на матрицу  $[M_1]$ .

В общем виде векторная функция винтовой переходной поверхности запишется:

$$\vec{r} = [M_1] (\vec{r}_{n.k} + \vec{r}_{cm}), \quad (11)$$

или

$$\bar{r} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{a0} \sin \gamma \\ f + \rho_{a0} \cos \gamma \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -a \varphi_1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

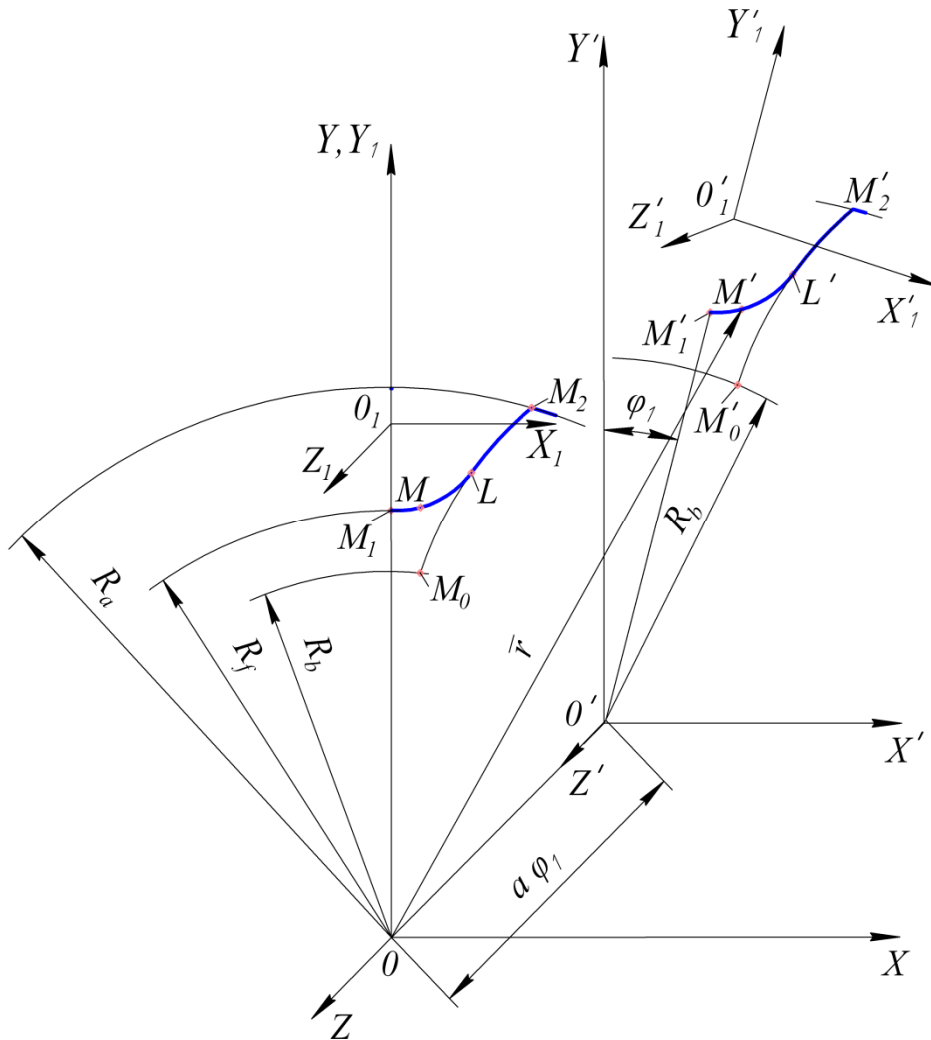


Рис. 5. Переходная поверхность косого зуба

В выражении (12) максимальное значение координаты вектора  $\bar{r}$  по оси  $OZ$  в принятой системе равняется по модулю ширине зубчатого венца

$$|-a \varphi_{1\max}| = b, \quad (13)$$

где  $a$  – параметр, характеризующий движение по винтовой линии вдоль оси  $OZ$  колеса.

Значение параметра  $a$  определяется отношением:

$$a = \frac{H}{2\pi} = \frac{b}{\varphi_{1\max}} = \frac{V}{\omega}, \quad (14)$$

где  $H$  – шаг винтовой линии,

$\omega$  – угловая скорость вращения проекции вектора  $\bar{r}$  на плоскость  $XOY$  вокруг оси  $OZ$ .

С учетом преобразований выражения (12), векторная функция боковой переходной поверхности зуба косозубого колеса опишется формулой:

$$\bar{r} = \begin{bmatrix} f \sin \varphi_1 + \rho_{a0} \sin(\gamma + \varphi_1) \\ f \cos \varphi_1 + \rho_{a0} \cos(\gamma + \varphi_1) \\ -a \varphi_1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

В результате вектор  $\bar{r}$ , восстановленный в точку  $M'$  винтовой переходной поверхности (рис. 5), имеет относительно вектора переходной кривой в лицевом торцевом сечении два аффинных преобразования: поступательное перемещение вдоль оси  $OZ$  зубчатого колеса и поворот относительно этой оси.

В заключение отметим, что запись уравнений переходной поверхности прямых и винтовых зубьев зубчатых колес в координатной форме, полученных авторами, позволяет любые пространственные преобразования, которые имеют место при зубофрезеровании. Пространственное описание боковых поверхностей зубьев дает возможность моделировать различные эксплуатационные и технологические процессы и определять их параметры. Например, определение таких параметров, как положение нормали в любой точке поверхности, необходимого для расчета сил резания при зубофрезеровании, расстояний от рассматриваемой точки поверхности до оси колеса и оси симметрии зуба, используемых при исследовании изгибной прочности зубьев, площади поверхности и других.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриленко В. А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи. М.: Машиностроение, 1969. 432 с.
2. Браилов И.Г., Андросов С.П. К вопросу моделирования зубофрезерования // Наука и производство – 2009: материалы Международ. науч. – практ. конф. в 2 ч. Брянск: БГТУ, 2009. Ч. 2. С. 16-18.
3. Болотовский И.А., Гурьев Б.И., Смирнов В.Э., Шендерей Б.И. Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи внешнего зацепления. М.:Машиностроение, 1974. 160 с.

**Андросов Сергей Павлович** –  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Соппротивление материалов» Омского  
государственного технического университета

**Androsov Sergey Pavlovich** –  
Candidate of Technical Sciences, Assistant  
Professor of the Department “Resistance of  
Materials”, Omsk State Technical University

**Браилов Иван Григорьевич** –  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Прикладная механика» Сибирской  
государственной автомобильно-дорожной  
академии, г. Омск

**Brailov Ivan Grigoryevich** –  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department “Applied Mechanics”, Siberian  
Automobile – Road Academy, Omsk

*Статья поступила в редакцию 11.01.2011, принята к опубликованию 27.07.2011*

УДК 531:629

**Ю.Н. Нагар, В.Ю. Ольшанский, А.В. Серебряков****АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ОДНОЙ МОДЕЛИ ПЬЕЗОГИРОСКОПА**

*В работе рассматривается предложенная ранее авторами модель пьезогироскопа, где в пластинах, связанных присоединенной массой, возбуждаются плоские деформационные волны, и используются прямой и обратный пьезоэффекты в пластинах на выходе и входе устройства. Оценивается время выхода на режим установившихся колебаний при учете рассеивания энергии в пьезопластинах.*

Пьезогироскоп, деформационные волны, преобразование Лапласа

**Yu.N. Nagar, V.Yu. Olshanskiy, A.V. Serebryakov****ANALYSIS OF THE TRANSITION PROCESS IN A PIEZOGYROSCOPE MODEL**

*In the work the authors have considered the piezogyroscope model, where plane deformation waves are excited in the plates connected by an associated mass. Direct and inverse piezoeffects are used in the plates at the outlet and inlet of the device. There has been estimated a stabilization rate of the steady-state oscillations with the regards of the energy dissipation in the piezoplates.*

Piezogyroscope, deformation waves, Laplace transform

**1. Краткий обзор моделей и расчетных схем пьезогироскопов**

В настоящее время актуальной является задача создания интеллектуальных приборов массового применения, среди которых важное место занимают инерциальные датчики [1, 2]. К таким датчикам относятся гироскопы, реагирующие на скорости вращения.

На сегодняшний день разработаны различные модели миниатюрных вибрационных гироскопов. Данные устройства характеризуются наличием вибрирующей массы (резонатора). В пьезогироскопах для возбуждения колебаний резонатора и получения сигнала о вращении используются соответственно обратный и прямой пьезоэффекты. В обзорах существующих конструкций [2, 3] отмечается широкое использование балочных, камертонных и биморфных пьезогироскопов.

Балочные гироскопы состоят из резонатора и закрепленных на его гранях пьезоэлементов. Резонатор представляет собой консольную балку либо балку, которая удерживается в корпусе посредством подвески. Пьезоэлементы – это тонкие пластины, выполненные из пьезокерамики. Одни из них служат для возбуждения колебаний в резонаторе, а другие – для восприятия отклика при вращении.

В камертонных гироскопах генерируемые (первичные) колебания масс резонатора происходят в одной плоскости. Вращение камертона вокруг вертикальной оси приводит к возникновению резонансного смещения из плоскости первичных колебаний, которое снимается при помощи закрепленных на резонаторе электродов.

В биморфных вибрационных гироскопах резонатор выполнен в виде двух склеенных пьезоэлектрических пластин, которые поляризованы в противоположных направлениях.

Когда к пластинам прикладывают напряжение, в них возникают колебания вследствие того, что одна из них сжимается, а другая растягивается. При вращении под действием кориолисовых сил возбуждаются вторичные колебания, которые можно детектировать теми же электродами. Разработка биморфных пьезогироскопов доведена до стадии серийного производства компанией Murata (Япония) и другими производителями.

Достаточно полный обзор устройств, основанных на пьезоэффекте, приведен в работе [4]. Пьезокерамические резонаторы в этих моделях имеют различную форму: цилиндрической трубки, скрученной цилиндрической оболочки, кольца, пластины, имеющей поляризацию по толщине. Там же описана защищенная патентом конструкция пьезогироскопа с двумя пьезокерамическими стержнями и присоединенной массой. Пьезокерамические элементы в этом устройстве поляризованы по толщине и испытывают деформации сдвига.

Актуальной проблемой является разработка более простых по конструкции датчиков инерциальной информации, обеспечивающих приемлемую точность измерений [5].

Следует заметить, что все вибрационные гироскопы работают при вынуждающей частоте, которая практически совпадает с частотой собственных колебаний. При этом амплитуда колебаний в реальных устройствах остается конечной. Это обстоятельство делает актуальным учет внутреннего трения в деформируемых элементах датчика.

## 2. Построение математической модели. Связанная задача электроупругости

Рассматривается предложенная ранее в [6] математическая модель измерителя угловой скорости вращения объекта. Действие устройства основано на явлении пьезоэффекта. Чувствительный элемент устройства состоит из двух тонких прямоугольных пьезокерамических пластин  $\Pi_1, \Pi_2$  и груза массы  $M$ , контактирующего с ними. Предполагается, что на пластины от груза передаются только нормальные усилия.

Пластины предварительно поляризованы вдоль толщин  $h_1, h_2$ . К пластинам прикреплены электроды, с помощью которых на  $\Pi_1$  подается электрический ток, а с  $\Pi_2$  – снимается. За счет продольного пьезоэффекта в пьезопластине  $\Pi_1$  возникают упругие деформационные волны, которые приводят груз в движение.

При вращении подвижной системы отсчета относительно инерциальной системы с угловой скоростью  $\Omega$  возникает кориолисова сила инерции  $\mathbf{F}^c = -2M(\Omega \times \mathbf{v}_r)$ , которая действует на груз и влияет на амплитуду и другие характеристики. За счет компонента  $\Omega_3$ , коллинеарного оси  $Ox_3$ , груз оказывает давление на пластину  $\Pi_2$ , в результате чего в ней возбуждается электрический ток. Величина тока в пластине  $\Pi_2$  позволяет определить  $\Omega_3$ .

Ранее авторами был изучен случай, когда рассеивание энергии внутри пластин пренебрежимо мало, и найдены собственные частоты устройства [6]. В настоящей работе, как и в [7, 8, 9], используется математическая модель, учитывающая вязкое трение. Исследован процесс выхода на режим установившихся колебаний.

Ниже рассмотрена краевая задача, описывающая распространение деформационных волн в пьезопластинах  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . С использованием преобразования Лапласа получено решение в изображениях. Найдена зависимость амплитуды выходного тока в пьезопластине  $\Pi_2$  от времени и определяется время выхода на режим установившихся вынужденных колебаний.

Обозначим перемещения в пластине  $\Pi_i$  вдоль оси  $Ox_i$  через  $u_i(x_i, t)$ ,  $i = 1, 2$ . Рассмотрим связанную задачу электроупругости [10]. Функции  $u_i(x_i, t)$  удовлетворяют уравнениям движения:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$



Уравнения (1) представлены в безразмерной форме. Здесь  $x_i = x_i^{\text{разм}}/h$ ,  $u_i = u_i^{\text{разм}}/h$ ,  $t = t^{\text{разм}} \cdot c/h$ ,  $\alpha = \alpha^{\text{разм}} \cdot h/c$ . Обозначено:  $h$  – характерный линейный размер,  $c$  – скорость сопряженных продольных волн в пьезокерамике. Уравнения (1) содержат слагаемые, учитывающие внутреннее трение [7]. Коэффициент  $\alpha^{\text{разм}}$  определяется резонансной частотой пластины и добротностью пьезокерамического материала.

Начальные условия имеют вид:

$$u_i(x_i, 0) = 0, \quad \frac{\partial u_i(x_i, 0)}{\partial t} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Закрепление пластин учитывается в граничных условиях:

$$u_i(0, t) = 0, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

На основаниях пластин с площадью  $A$ , контактирующих с присоединенным грузом массой  $M$ , действуют внешние усилия. Эти усилия обусловлены силами инерции, включая силы Кориолиса. Тогда:

$$\sigma_x A = -M \frac{\partial^2 u_i(h_i, t)}{\partial t^2} + F_i^c, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

где

$$F_1^c = 2M\Omega_3 \frac{\partial u_2(h_2, t)}{\partial t}, \quad F_2^c = -2M\Omega_3 \frac{\partial u_1(h_1, t)}{\partial t}. \quad (5)$$

Механические напряжения  $\sigma_x$  определяются линейными уравнениями пьезоэффекта [11]:

$$\sigma_x = \frac{1}{s_{33}} \left( \frac{\partial u}{\partial x} - d_{33} E \right). \quad (6)$$

Здесь  $s_{33}$  – упругая податливость материала,  $d_{33}$  – пьезоэлектрическая постоянная,  $E$  – напряженность электрического поля.

В общем случае для напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  и электрической индукции  $\mathbf{D}$  в пьезокерамике имеют место уравнения вынужденной электростатики

$$\text{rot} \mathbf{E} = \mathbf{0}, \quad \text{div} \mathbf{D} = 0. \quad (7)$$

Первое из уравнений (7) позволяет представить напряженность через электрический потенциал  $\psi$  как  $\mathbf{E} = -\text{grad} \psi$ .

В одномерном случае последнее выражение упрощается до вида  $E = -\partial \psi / \partial x$ . Далее подстановка выражений (5), (6) в граничные условия (4) и переход к безразмерной форме приводят к условиям [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1(\delta_1, t)}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi_1(\delta_1, t)}{\partial x_1} &= m \left( -\frac{\partial^2 u_1(\delta_1, t)}{\partial t^2} + 2\omega \cdot \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial t} \right), \\ \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial x_2} + \frac{\partial \psi_2(\delta_2, t)}{\partial x_2} &= m \left( -\frac{\partial^2 u_2(\delta_2, t)}{\partial t^2} - 2\omega \cdot \frac{\partial u_1(\delta_1, t)}{\partial t} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

В формулах (8)  $\delta_i = h_i/h$ , коэффициенты определяются выражениями  $m = M \cdot s_{33} c^2 / Ah$ ,  $\omega = \Omega_3 h/c$ . Заметим, что для реальных значений  $\Omega_3$  параметр  $\omega \ll 1$ .

Второе уравнение вынужденной электростатики (7) приводит в одномерном случае к уравнениям

$$\partial D_i / \partial x_i = 0, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

для пластин  $\Pi_1, \Pi_2$ . С учетом пьезоэффекта электрическая индукция  $D$  определяется равенством

$$D = \varepsilon_{33}^T E + d_{33} \sigma_x. \quad (10)$$

Здесь  $\varepsilon_{33}^T$  – диэлектрическая проницаемость при постоянных механических напряжениях. Используя выражения (6), (10) при  $E = -\partial\psi/\partial x$ , после перехода к безразмерным величинам преобразуем уравнения (9) к виду:

$$\frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x_i^2} = \frac{k_{33}^2}{1 - k_{33}^2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2}, \quad i = 1, 2. \quad (11)$$

Здесь  $k_{33}^2 = d_{33}^2 / s_{33} \varepsilon_{33}^T$  – продольный статический коэффициент электромеханической связи. Уравнения (11) рассматриваются при граничных условиях

$$\psi_1(0, t) = -U(t)/2, \quad \psi_1(\delta_1, t) = U(t)/2, \quad \psi_2(0, t) = 0, \quad \psi_2(\delta_2, t) = 0. \quad (12)$$

Граничные условия для потенциала  $\psi_1(x_1, t)$  содержат заданное напряжение  $U(t)$ . Граничные условия для потенциала  $\psi_2(x_2, t)$  записаны для случая большой проводимости внешней цепи [10]. Решение задачи (11), (12) приводит к следующим выражениям для потенциалов  $\psi_i(x_i, t)$ :

$$\psi_i(x_i, t) = \frac{k_{33}^2}{1 - k_{33}^2} \left( u_i(x_i, t) - u_i(0, t) \left( 1 - \frac{x_i}{\delta_i} \right) - u_i(\delta_i, t) \frac{x_i}{\delta_i} \right) + V_i(t) \left( \frac{x_i}{\delta_i} - \frac{1}{2} \right), \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

Здесь  $V_1(t) = U(t)$ ,  $V_2(t) = 0$ . Граничные условия (8) с учетом равенств (13) принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1(\delta_1, t)}{\partial x_1} + \frac{k_{33}^2}{1 - k_{33}^2} \left( \frac{\partial u_1(\delta_1, t)}{\partial x_1} - \frac{u_1(\delta_1, t)}{\delta_1} \right) &= m \left( -\frac{\partial^2 u_1(\delta_1, t)}{\partial t^2} + 2\omega \cdot \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial t} \right) - \frac{U(t)}{\delta_1}, \\ \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial x_2} + \frac{k_{33}^2}{1 - k_{33}^2} \left( \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial x_2} - \frac{u_2(\delta_2, t)}{\delta_2} \right) &= m \left( -\frac{\partial^2 u_2(\delta_2, t)}{\partial t^2} - 2\omega \cdot \frac{\partial u_1(\delta_1, t)}{\partial t} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Приходим к краевой задаче (1), (2), (3), (14) относительно перемещений.

### 3. Переход к изображениям при описании неустановившихся колебаний

Воспользуемся преобразованием Лапласа по переменной  $t$ :

$$\tilde{u}_i(x_i, p) = L\{u_i(x_i, t)\} = \int_0^{\infty} u_i(x_i, t) e^{-pt} dt. \quad (15)$$

Переходя в уравнениях (1) к изображениям, получим:

$$\frac{d^2 \tilde{u}_i}{dx_i^2} - \gamma^2 \tilde{u}_i = 0, \quad i = 1, 2, \quad (16)$$

где  $\gamma^2 = p^2 + \alpha p$ . Граничные условия (3) и (14) в изображениях принимают соответственно вид:

$$\tilde{u}_i(0, p) = 0 \quad (17)$$

и

$$\begin{aligned}\frac{d\tilde{u}_1(\delta_1, p)}{dx_1} &= \left( \frac{k_{33}^2}{\delta_1} - m(1 - k_{33}^2)p^2 \right) \tilde{u}_1(\delta_1, p) + 2m\omega(1 - k_{33}^2)p\tilde{u}_2(\delta_2, p) - \frac{(1 - k_{33}^2)}{\delta_1} \tilde{U}(p), \\ \frac{d\tilde{u}_2(\delta_2, p)}{dx_2} &= \left( \frac{k_{33}^2}{\delta_2} - m(1 - k_{33}^2)p^2 \right) \tilde{u}_2(\delta_2, p) - 2m\omega(1 - k_{33}^2)\tilde{u}_1(\delta_1, p).\end{aligned}\quad (18)$$

Решениями уравнений вида (16) при граничных условиях (17) являются функции

$$\tilde{u}_i(x_i, p) = B_i \operatorname{sh} \gamma x_i, \quad i = 1, 2 \quad (19)$$

Здесь комплексные константы  $B_i$  определяются из граничных условий (18).

#### 4. Расчет силы тока, генерируемого в пьезопластине

На основании полученного решения для перемещений может быть рассчитана сила тока  $I(t)$ , который генерируется в пластине  $\Pi_2$ . Представим силу тока  $I(t)$  через составляющую вектора индукции  $\mathbf{D}$ , нормальную к поверхности электрода  $S$ . Это выражение принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_S (\mathbf{nD}) ds = -I(t). \quad (20)$$

В случае одномерного электрического поля для пластин, у которых все основание покрыто электродом, представление (20) с учетом равенства (13) упрощается до вида:

$$I(t) = \left( A \frac{c}{h} \right) \frac{\partial}{\partial t} \left( e_{33} \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial x_2} - \frac{k_{33}^2}{1 - k_{33}^2} \frac{\varepsilon_{33}^S}{d_{33}} \left( \frac{\partial u_2(\delta_2, t)}{\partial x_2} - \frac{u_2(\delta_2, t)}{\delta_2} \right) \right). \quad (21)$$

Выражение (21) для силы тока содержит пьезомодуль  $e_{33}$  и диэлектрическую проницаемость при постоянных деформациях  $\varepsilon_{33}^S = \varepsilon_{33}^T - d_{33}^2 / s_{33}$ .

Применив к равенству (21) преобразование Лапласа, получим:

$$\tilde{I}(p) = Gp \frac{\partial \tilde{u}_2(\delta_2, p)}{\partial x_2} + H p \tilde{u}_2(\delta_2, p). \quad (22)$$

Здесь  $G, H$  – определенные коэффициенты.

Рассмотрим случай пластин одинаковой толщины, когда  $h_1 = h_2 = h$ , то есть  $\delta_1 = \delta_2 = 1$ . Равенство (22) допускает преобразование к виду:

$$\tilde{I}(p) = 2m\omega \cdot \Phi(p) \cdot \tilde{U}(p). \quad (23)$$

В формуле (23) обозначено:

$$\Phi(p) = \frac{G\gamma \operatorname{cth} \gamma + H}{\left( \frac{\gamma \operatorname{cth} \gamma - k_{33}^2}{(1 - k_{33}^2)p} + mp \right)^2 + 4m^2\omega^2}, \quad \gamma^2 = p^2 + \alpha p. \quad (24)$$

Восстановим оригинал функции (23), используя теорему умножения [12]:

$$I(t) = 2m\omega \int_0^t \varphi(\tau) \cdot U(t - \tau) d\tau. \quad (25)$$

Здесь  $\varphi(t)$  – оригинал для изображения  $\Phi(p)$ .

Применяя теорему обращения, имеем:

$$\varphi(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \Phi(p) e^{pt} dp. \quad (26)$$

Так как произведение  $\gamma \text{cth} \gamma$  раскладывается только по четным степеням  $\gamma$ , и  $\gamma^2 = p^2 + \alpha p$ , то разложение  $\Phi(p)$  содержит только целые степени  $p$ . Подынтегральная функция из (26) имеет простые полюсы  $p_n$ , удовлетворяющие уравнениям:

$$\gamma \text{cth} \gamma = k_{33}^2 + (1 - k_{33}^2) \cdot (2r_1 m \omega p i - mp^2), \quad \text{где } r_1 = \pm 1. \quad (27)$$

Корни уравнения (27) образуют два семейства  $p_n^+$  и  $p_n^-$ , соответствующие значениям  $r_1 = +1$  и  $r_1 = -1$ . Корни этих семейств являются комплексно-сопряженными друг к другу.

Для корней уравнения (27) была получена асимптотическая оценка. Независимо от этого при малых значениях  $n$  корни находились также методом продолжения по параметрам  $\alpha$  и  $\omega$ . В качестве начальных приближений были выбраны  $p^{(0)} = i\lambda$ , где  $\lambda$  – действительные корни уравнения  $\lambda \text{ctg} \lambda = k_{33}^2 + m(1 - k_{33}^2)\lambda^2$ . Наблюдается очень хорошая точность асимптотических значений корней даже при малых значениях  $n$  (начиная с единицы).

Применяя далее к правой части равенства (26) теорему о вычетах, получаем:

$$\varphi(t) = 2 \text{Re} \sum_{p_n: \text{Im } p_n > 0} \frac{F_1(p_n)}{F_2'(p_n)} e^{p_n t}, \quad (28)$$

$$\text{где } F_1(p) = G\gamma \text{cth} \gamma + H, \quad F_2(p) = \left( \frac{\gamma \text{cth} \gamma - k_{33}^2}{(1 - k_{33}^2)p} + mp \right)^2 + 4m^2 \omega^2.$$

Был рассмотрен случай, когда напряжение, приложенное к пластине  $\Pi_1$ , изменяется по гармоническому закону  $U(t) = U_0 \sin \beta t$ . Подставив выражение (28) в равенство (25), находим после интегрирования:

$$\begin{aligned} I(t) &= I_1(t) + I_2(t), \\ I_1(t) &= 4m\omega U_0 \text{Re} \sum_{p_n: \text{Im } p_n > 0} \frac{F_1(p_n)}{F_2'(p_n)} \frac{\beta e^{p_n t}}{p_n^2 + \beta^2}, \\ I_2(t) &= -4m\omega U_0 \text{Re} \sum_{p_n: \text{Im } p_n > 0} \frac{F_1(p_n)}{F_2'(p_n)} \frac{\beta \cos \beta t + p_n \sin \beta t}{p_n^2 + \beta^2} = N \cos(\beta t + \theta_0). \end{aligned} \quad (29)$$

В формуле (29) слагаемое  $I_1(t)$  обусловлено начальными возмущениями и представляет собой суперпозицию высокочастотных колебаний с быстро убывающими со временем амплитудами. Для оценки скорости затухания начальных возмущений по усеченному ряду для функции  $I_1(t)$  строилась огибающая  $I_1^a(t)$ . На рис. 1 приведена зависимость  $I_1^a$  от времени. Результат получен при безразмерном значении частоты  $\beta = 0,50772$ . График на рис. 1 показывает время завершения переходного процесса. По прошествии этого времени устанавливаются вынужденные колебания, которые представлены в формуле (29) слагаемым  $I_2(t)$ . Амплитуда установившихся колебаний составила  $N = 25,3$  мА.

Расчет характеристик тока был проведен при различных значениях  $\beta$ , близких к резонансному. Амплитуды колебаний, установившихся по окончании переходного процесса, сравнивались со значениями, которые были получены ранее в [7] непосредственно для

установившихся колебаний. При этом относительная разность значений, полученных по двум расчетным методикам, не превышала  $2,5 \cdot 10^{-8}$ .

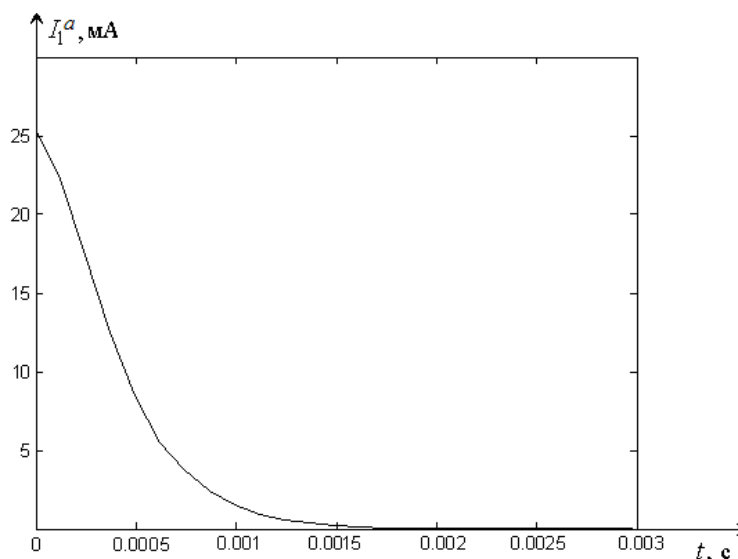


Рис.1. Амплитуда затухающих собственных колебаний

## 5. Выводы

В работе развита математическая модель и предложена вычислительная процедура для учета вязкого трения при колебаниях пьезопластин в системе с присоединенной массой. Определена продолжительность переходного процесса. Также подтверждены результаты, полученные непосредственно для стадии установившихся колебаний. Расчет требует минимальных вычислительных ресурсов и реализуется средствами пакета MatLAB.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Тула: Гриф и К, 2004. 476 с.
2. Джашинов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В. Общая и прикладная теория гироскопов с применением компьютерных технологий. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. 158 с.
3. Шахнович И. МЭМС-гироскопы – единство выбора. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. №1. С. 76–85.
4. Yang J.S. Analysis of piezoelectric devices. Singapore: World Scientific Publishing, 2006. 520 p.
5. Джашинов В.Э., Панкратов В.М., Барулина М.А. Теоретические основы разработки и создания суперминиатюрного микромеханического многофункционального датчика инерциальной информации // Нано- и микросистемная техника. 2010. №5 (118). С. 46-54.
6. Нагар Ю.Н., Ольшанский В.Ю., Панкратов В.М., Серебряков А.В. Об одной модели пьезогироскопа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010, №2. С. 71-74.
7. Панкратов В.М., Ольшанский В.Ю., Нагар Ю.Н., Серебряков А.В. Влияние диссипации на характеристики измерителя угловой скорости на основе взаимного пьезоэффекта // Авиакосмическое приборостроение. 2010, №8. С. 3-8.
8. Домашенкина Т.В., Наседкин А.В., Рыбьянец А.Н. Конечно-элементный анализ фокусирующего ультразвукового пьезоизлучателя в режиме установившихся колебаний // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. Т.107. №6. С. 174-179.
9. Афонин С.М. Обобщенная структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого преобразователя для систем управления нано- и микроперемещениями // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2006, №2, С. 158-166.

10. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Электроупругость. Киев: Наук. думка, 1989. 280 с.

11. Партон В.З., Кудрявцев Б.А. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1988. 472 с.

12. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1987. 688 с.

**Нагар Юлия Николаевна** –  
ассистент, Энгельсский технологический  
институт (филиал) Саратовского  
государственного технического университета

**Nagar Julia Nikolaevna** –  
Assistant, Engels Technological Institute  
(Branch) of Saratov State Technical  
University

**Ольшанский Владимир Юрьевич** –  
доктор физико-математических наук,  
профессор, главный научный сотрудник  
Института проблем точной механики и  
управления РАН

**Olshanskiy Vladimir Yurievich** –  
Ph.D., Professor, Main Scientific Employee,  
Institute of Precision Mechanics and Control,  
Russian Academy of Sciences

**Серебряков Андрей Владимирович** –  
кандидат физико-математических наук,  
доцент, Энгельсский технологический  
институт (филиал) Саратовского  
государственного технического университета

**Serebryakov Andrey Vladimirovich** –  
Candidate of Sciences in Physics and  
Mathematics, Assistant Professor, Engels  
Technological Institute (Branch) of Saratov  
State Technical University

*Статья поступила в редакцию 12.02.2011, принята к опубликованию 08.07.2011*

**М.С. Гаврилова, А.А. Бутов, В.И. Рузов, В.А. Разин**

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ  
СИСТОЛИЧЕСКОГО АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ  
В МОМЕНТЫ СТРЕССОВЫХ СИТУАЦИЙ**

*В настоящей работе построены математическая и имитационная модели циркадианного ритма систолического артериального давления. Построены стохастическая и имитационная модели регуляции систолического артериального давления в моменты стрессовых ситуаций.*

Систолическое артериальное давление, артериальная гипертензия, стресс, циркадианный ритм, промежуток стабилизации, процесс с множественными разладками

**M.S. Gavrilova, A.A. Butov, V.I. Ruzov, V.A. Razin**

**STOCHASTIC MODEL OF STABILIZING SYSTEM  
OF SYSTOLIC BLOOD PRESSURE AT THE TIME OF STRESS**

*In this paper mathematical and simulation models of circadian rhythm of systolic blood pressure have been developed. Stochastic and simulation models of systolic blood pressure control at the time of stress have been developed.*

Systolic blood pressure, arterial hypertension, stress, circadian rhythm, period of stabilization, process with multiple discords

**Введение**

В настоящее время артериальная гипертензия (АГ) является одной из самых актуальных проблем кардиологии. В России около 40 млн. мужчин и женщин страдают этим заболеванием. Одной из основных причин смертности трудоспособного населения страны являются осложнения АГ (ишемические и геморрагические инсульты, инфаркт миокарда и т.д.). АГ представляет собой хроническое повышение артериального давления (АД) от 140/90 мм рт. ст. и выше. В связи с этим актуальным является построение математических и компьютерных имитационных моделей регуляции АД у пациентов, страдающих АГ.

Математическое моделирование медико-биологических объектов представляет собой аналитическое описание идеализированных процессов и систем, адекватных реальным [1].

Система кровообращения впервые была описана в 17 в. английским врачом и ученым Уильямом Гарвеем. Одними из первых работ в области математического моделирования системы кровообращения были работы Отто Франка [2]. В них автор сопоставил моделируемой системе ее аналог, используя электрические цепи. Данный метод явился предпосылкой к построению больших имитационных моделей кровеносной системы (о которых упоминается позже) и нашел свое применение при решении различных задач кардиологии [3–6].

В настоящее время известны различные классификации математических моделей системы кровообращения в целом и отдельных механизмов регуляции уровня АД [7, 8]. Например, согласно [7] рассмотрим следующие виды моделей гемодинамики:

1. Большие имитационные модели [3, 9, 10] системы кровообращения, в которых учитывается максимально возможное число механизмов, регулирующих работу системы. Наиболее известной является модель Артура Гайтона [9], в которой 8 основных механизмов регуляции АД образуют пропорциональную и интегральную системы или системы быстрого

и длительного действия. Абакумов М.В. и соавторы [10], в отличие от Гайтона, учитывают в своей модели влияние различных органов на давление в кровеносной системе и многие другие факторы, характеризующие работу системы кровообращения. В подобных моделях исследуется кровообращение в целом, вследствие чего они слишком громоздки для применения в диагностике заболеваний сердечно-сосудистой системы. Так, например, в модели Абакумова содержится более тысячи параметров, модель является чувствительной к заданию начальных условий и требует высоких затрат вычислительных ресурсов при построении.

2. Элементарные модели [7, 8, 11–14], в которых учитываются лишь наиболее важные механизмы регуляции АД. Такие модели, как правило, задаются дифференциальными или алгебраическими уравнениями (или их системами) с небольшим количеством переменных. Они просты и удобны для использования в расчетах, однако их достоинства (простота и наблюдаемость) иногда оказываются и недостатками, поскольку возникают трудности в описании работы регуляторных механизмов [7]. Построение таких моделей связано с необходимостью практического применения, например, для диагностики нарушений в деятельности механизмов саморегуляции АД.

3. Модели, учитывающие структуру изучаемой системы [15, 16]. В работе [16] предлагается математическая модель сердечно-сосудистой системы в виде 14-камерной цепи, которая отображает структуру сосудистого русла человека. Модель реализована в среде LabView и является основой разработанных автоматизированных информационных систем для диагностики и терапии сердечно-сосудистых патологий [15]. С помощью этой модели врач определяет основные гемодинамические показатели (АД, легочное АД и другие). В силу сложного математического описания таких моделей их компьютерная реализация и внедрение в клиническую практику требуют продолжительного времени.

4. «Гидродинамические» модели [17–20], в которых течение крови по сосудам задается с помощью уравнений Навье-Стокса. Основной проблемой при построении таких моделей является нахождение решения уравнений Навье-Стокса в областях с криволинейными границами [18]. Подобные модели требуют высоких вычислительных затрат и обычно используются для исследования течения крови в определенных участках кровеносной системы.

В большинстве работ математическое описание медико-биологических процессов дано в терминах обыкновенных дифференциальных уравнений [2–10, 12, 15–20]. В этом случае рассматривается поведение объекта без учета случайных воздействий внутренней и внешней среды. Организм человека — это сложная система с элементами хаотичной структуры, в которой не представляется возможным со стопроцентной вероятностью предсказать её состояние в каждый момент времени. Мы не можем учесть все параметры такой системы, поэтому детерминированные математические модели не могут адекватно описать ее поведение. При изучении динамики АД особый интерес представляет имитационное моделирование на основе стохастических дифференциальных уравнений [11, 13, 14, 21, 22].

Целью настоящей работы является построение стохастической и компьютерной имитационной моделей регуляции САД в моменты стрессовых ситуаций.

### **Объекты и методы исследования**

В исследование включены 71 женщина и 102 мужчины. По результатам суточного мониторинга АД (СМАД) пациенты были разделены на 6 групп учета возраста: лица без АГ (25 женщин и 31 мужчина), лица с АГ без терапии (32 женщины и 56 мужчин) и лица с АГ на терапии (14 женщин и 15 мужчин, малые группы).

СМАД проводилось с использованием носимого монитора «BPLab МнСДП-3» (ООО «Петр Телегин», Нижний Новгород). Пациенты находились под наблюдением в лаборатории артериальной гипертензии Ульяновского клинического госпиталя ветеранов войн в период с 2008–2010 гг.



Для анализа суточного профиля САД использовался пакет прикладных программ VPLab v. 3.0 (ООО «Петр Телегин», Нижний Новгород). Для реализации компьютерной модели был выбран язык программирования Borland Delphi 7.0 (Borland Software Corp., USA).

### Математическая модель циркадианного ритма САД

На основе имеющихся данных СМАД была сформулирована гипотеза о представлении суточного профиля САД в виде суммы медленных, устойчивых, периодических колебаний (циркадианный ритм) и резких, случайных изменений САД, которые невозможно предсказать со стопроцентной вероятностью (вариабельность).

Циркадианный (околосуточный) ритм играет важнейшую роль для организма человека. Это понятие предложил американский ученый Франц Халберг в 1959 г. Циркадианный ритм САД представляет собой двухфазные колебания «день-ночь» с периодом  $24 \pm 4$  часа.

В идеале у лиц без АГ и лиц с АГ на терапии гомеостатические механизмы должны поддерживать значения АД в определенных границах в течение некоторого периода времени (как днем, так и ночью), который мы назовем промежутком стабилизации. У таких пациентов предполагается наличие дневного и ночного промежутков стабилизации САД, что свидетельствует об эффективной работе гомеостатических механизмов, регулирующих уровень АД. У лиц с АГ без терапии работа системы саморегуляции АД нарушена, поэтому давление совершает значительные колебания, которые приводят к структурным изменениям его суточного профиля и отсутствию промежутков стабилизации или уменьшению их длины.

Данную гипотезу о структуре суточного профиля САД у пациентов из разных групп подтвердил анализ данных СМАД, который показал, что чаще всего промежутки стабилизации наблюдались у лиц без сердечно-сосудистых заболеваний и лиц с АГ, проходящих курс антигипертензивной терапии.

Наличие промежутков стабилизации на графике суточного профиля САД является главной особенностью наших математических моделей. Предложенные модели пригодны для описания процесса регуляции САД у конкретного пациента из любой группы.

Пусть случайный процесс  $Y = (Y_t)_{t \geq 0}$  описывает динамику САД в мм рт. ст., время  $t$  измеряется в часах. Выделим у процесса  $Y$  детерминированную и стохастическую составляющие. Циркадианный ритм САД опишем детерминированным процессом  $C(t)$ , мм рт. ст. Тогда случайные изменения САД представим в виде стохастического процесса.

На практике для анализа суточного профиля САД широко используется математический метод, который заключается в аппроксимации циркадианного ритма САД синусоидой [11] или косинусоидой. Данная математическая модель проста и удобна при решении прикладных задач. Однако при обработке экспериментальных данных легко заметить, что график циркадианного ритма САД значительно отличается от графика синусоиды. В настоящей работе предложен новый метод математического моделирования циркадиантных ритмов.

В качестве приближения циркадианного ритма САД возьмем непрерывную функцию

$$C(t) = \lambda g(t) + \rho \quad (1)$$

с периодом  $T$ , где  $T$  — количество часов, в течение которых проводилось СМАД,  $\lambda \geq 0$  — амплитуда колебаний САД,  $\rho > 0$  — выборочное среднее значений САД по данным суточного мониторинга на  $[0, T]$ , мм рт. ст.

Пусть в последовательности  $\{t_i, y_i\}_{i=0}^{n-1}$  число  $y_i$  — экспериментальное значение САД в мм рт. ст., полученное в момент времени  $t_i \in [0, T]$  для всех  $i = \overline{0, n-1}$ . Тогда параметры  $\rho$  и  $\lambda$  находим по формулам:

$$\rho = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i, \quad (2)$$

$$\lambda = \max_{0 \leq i \leq n-1} |y_i - \rho|. \quad (3)$$

Непрерывная функция  $g(t)$ , мм рт. ст., имеет вид:

$$g(t) = \begin{cases} a_1 \sin(\varphi(t)), 0 \leq t \leq t^0 \\ a_2 \sin(\varphi(t)), t^0 < t \leq T \end{cases}, \quad (4)$$

где значение  $t^0 \in (0, T)$  выбирается среди точек пересечения экспериментальным графиком оси времени. Параметры  $a_i$ ,  $i = 1, 2$ , определяются с помощью метода наименьших квадратов (МНК) по алгоритму, подробно рассмотренному в пункте «Компьютерные имитационные модели».

Для типов ночного снижения САД «non-dipper», «dipper» и «over-dipper»  $a_i > 0$ ,  $i = 1, 2$ ; для типа «night-reaker»  $a_1 > 0$ ,  $a_2 < 0$ . Непрерывная функция  $\varphi(t)$  — фаза САД,  $\varphi(t) \in [0, 2\pi]$  при  $t \in [0, T]$ .

Определим фазу САД  $\varphi(t)$  следующим образом. Если по данным мониторингования на графике суточного профиля САД:

1) Нет промежутка стабилизации при  $t \in [0, t^0]$ , то

$$\varphi(t) = k_1 t, \text{ где параметр } k_1 = \frac{\pi}{t^0}. \quad (5)$$

2) Есть промежуток стабилизации при  $t \in [0, t^0]$ , то

$$\varphi(t) = \begin{cases} \frac{\varphi_1 t}{t^1}, 0 \leq t < t^1 \\ \arcsin\left(\frac{c_1 t + d_1}{a_1}\right), t^1 \leq t \leq t^2 \\ \frac{(\pi - \varphi_2)t}{t^0 - t^2} + \frac{\varphi_2 t^0 - \pi^2}{t^0 - t^2}, t^2 < t \leq t^0 \end{cases}. \quad (6)$$

Здесь  $[t^1, t^2]$  — дневной промежуток стабилизации САД, параметры  $c_1$ ,  $d_1$  найдены с помощью МНК,

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{c_1 t^1 + d_1}{a_1}\right), \varphi_2 = \arcsin\left(\frac{c_1 t^2 + d_1}{a_1}\right). \quad (7)$$

В случае если  $\frac{c_1 \tilde{t} + d_1}{a_1} > 1$  при  $\tilde{t} \in [t^1, t^2]$ , примем  $a_1 = 1$ . (8)

3) Нет промежутка стабилизации при  $t \in (t^0, T]$ , тогда:

$$\varphi(t) = k_2 t + b_2, \text{ где параметры } k_2 = \frac{\pi}{T - t^0}, b_2 = \frac{\pi(T - 2t^0)}{T - t^0}. \quad (9)$$

4) Есть промежуток стабилизации при  $t \in (t^0, T]$ , тогда:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \frac{(\varphi_3 - \pi)t}{t^3 - t^0} + \frac{\pi^3 - \varphi_3 t^0}{t^3 - t^0}, t^0 < t < t^3 \\ \pi - \arcsin\left(\frac{c_2 t + d_2}{a_2}\right), t^3 \leq t \leq t^4 \\ \frac{(2\pi - \varphi_4)t}{T - t^4} + \frac{\varphi_4 T - 2\pi^4}{T - t^4}, t^4 < t \leq T \end{cases} \quad (10)$$

Здесь  $[t^3, t^4]$  — ночной промежуток стабилизации САД, параметры  $c_2, d_2$  найдены с помощью МНК,

$$\varphi_3 = \pi - \arcsin\left(\frac{c_2 t^3 + d_2}{a_2}\right), \varphi_4 = \pi - \arcsin\left(\frac{c_2 t^4 + d_2}{a_2}\right). \quad (11)$$

В случае если  $\frac{c_2 \bar{t} + d_2}{a_2} < -1$  при  $\bar{t} \in [t^3, t^4]$ ,

$$(12)$$

примем  $a_2 = 1$  для типов ночного снижения САД «non-dipper», «dipper» и «over-dipper» или  $a_2 = -1$  для типа «night-peaker».

Таким образом, функция  $\varphi(t) \in [0, \pi]$  при  $t \in [0, t^0]$ ,  $\varphi(t) \in (\pi, 2\pi]$  при  $t \in (t^0, T]$  является непрерывной на  $[0, T]$ .

При построении циркадианного ритма САД  $C(t)$  на любом промежутке времени  $[0, R]$

$$g_R(t) = \begin{cases} a_1 \sin(\varphi_R(t)), jT \leq t \leq t^0 + jT \\ a_2 \sin(\varphi_R(t)), t^0 + jT < t \leq (j+1)T \end{cases}, \quad (13)$$

$$\varphi_R(t) = \varphi(t) + 2\pi j \quad (14)$$

при  $t \in [jT, (j+1)T]$ , где  $j = \overline{0, m}$ ,  $m = \left\lfloor \frac{R}{T} \right\rfloor$ .

### Стохастическая модель регуляции сад в моменты стрессовых ситуаций

В современных условиях социальной среды человек испытывает состояние практически постоянного стресса, а именно психоэмоциональный стресс. Учитывая тот факт, что АД является параметром, зависящим от нашего психоэмоционального состояния, стресс является частой причиной повышения АД. Чем сильнее стрессовое воздействие на организм, тем большие колебания совершает АД. Чрезмерное влияние стресса на сердечно-сосудистую систему может стать пусковым механизмом для развития АГ [23].

Стресс приводит к активации симпатoadреналовой системы, результатом которой является выброс в кровь катехоламинов (адреналин, норадреналин) из мозгового слоя надпочечников, вследствие чего происходит повышение АД. Тогда организм запускает гомеостатические механизмы регуляции АД, которые понижают уровень катехоламинов в крови и оказывают сосудорасширяющее действие, тем самым снижая давление.

Пусть случайный процесс  $X = (X_t)_{t \geq 0}$  — концентрация адреналина в крови в момент времени  $t$ , нмоль/л. Процесс выброса надпочечниками адреналина в момент стресса имеет вид  $\eta dN_t$ , где  $N = (N_t)_{t \geq 0}$  — стандартный пуассоновский процесс с интенсивностью  $\mu > 0$ ,  $\eta > 0$  — коэффициент роста, нмоль/л. Тогда  $(-\alpha)X_t$  — гомеостатические механизмы, снижающие уровень адреналина в крови после стрессовой ситуации, нмоль/л,  $\alpha > 0$  — коэффициент отрицательной обратной связи (коэффициент затухания).

Процесс повышения САД под действием адреналина имеет вид  $\beta X_t$ , где  $\beta > 0$  — коэффициент роста, (мм рт. ст.)·л/нмоль. Чтобы нормализовать давление, организм запускает

процесс саморегуляции  $(-\gamma)Y_t$ , мм рт. ст., который частично компенсирует стрессовое воздействие,  $\gamma > 0$  — коэффициент отрицательной обратной связи (коэффициент затухания). Другие факторы внутренней и внешней среды, влияющие на уровень САД (гормоны и биологически активные вещества, физические нагрузки, качество питания, метеоусловия и т.д.), обозначим как  $\sigma Y_t dW_t$ , мм рт. ст., где  $\sigma \neq 0$  — пропорциональный коэффициент, а  $W = (W_t)_{t \geq 0}$  — стандартный винеровский процесс. Процессы  $N$  и  $W$  независимы.

Математическая модель регуляции САД в моменты стрессовых ситуаций представляет собой систему стохастических дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dX_t}{dt} = \eta \frac{dN_t}{dt} - \alpha X_t \\ \frac{dY_t}{dt} = \beta X_t - \gamma Y_t + \sigma Y_t \frac{dW_t}{dt} + C(t) \end{cases} \quad (15)$$

с начальными условиями  $X_0 \geq 0, Y_0 > 0$ .

Предполагается, что в системе (15) процесс  $X$  ненаблюдаемый, а наблюдать можно только процесс  $Y$ , который содержит неполную информацию о процессе  $X$ . Такая система называется частично-наблюдаемой.

В модели (15) случайный процесс  $X$  совершает скачки в моменты времени, совпадающие с моментами скачков пуассоновского процесса  $N$ . Процесс  $Y$  непрерывен, имеет множественные разладки. Разладка случайного процесса — это изменение его характеристик (как правило, математического ожидания и дисперсии), при этом процесс должен быть наблюдаемым. В настоящей работе разладкой является воздействие стресса на организм. Тогда моменты возникновения разладок — это моменты стрессовых ситуаций. У процесса  $Y$  они совпадают с моментами скачков пуассоновского процесса  $N$ .

### Компьютерные имитационные модели

Рассмотрим алгоритм построения компьютерной модели циркадианного ритма САД:

1. Найдем выборочное среднее значений САД  $\{y_i\}_{i=0}^{n-1}$ , равное  $\rho$  (2), и вычтем его из каждого  $y_i$ ,  $z_i = y_i - \rho$ . Выборочное среднее значений  $\{z_i\}_{i=0}^{n-1}$  становится равным 0.

2. Найдем в последовательности  $\{z_i\}_{i=0}^{n-1}$  максимальное по модулю значение, его модуль равен  $\lambda$  (3), и поделим на  $\lambda$  все  $z_i$ ,  $s_i = \frac{z_i}{\lambda}$ ,  $s_i \in [-1; 1]$  для любого  $i$ . Полученные значения  $s_i$  более удобны для расчетов, чем исходные значения  $y_i$ .

3. Для точек  $\{t_i, s_i\}_{i=0}^{n-1}$  ( $s_i$  рассматривается в момент времени  $t_i$ ) строим приближение с помощью функции  $g(t)$  (4). Для того чтобы найти ее параметры  $a_i$ ,  $i = 1, 2$ , в качестве фазы САД  $\varphi(t)$  на  $[0, t^0]$  и  $(t^0, T]$  выбираем функции (5) и (9) соответственно, независимо от наличия промежутков стабилизации, и строим аппроксимацию по МНК.

4. Значения остальных параметров функции  $g(t)$  находим по формулам (5)–(14) в зависимости от данных СМАД конкретного пациента.

5. Из (1) получим искомую функцию  $C(t)$ , циркадианный ритм САД.

Дальнейший переход от непрерывных моделей к дискретным разбивается на два этапа. На первом этапе происходит замена непрерывной области  $0 \leq t \leq T$  на дискретную — совокупность конечного числа точек

$$\left\{ \bar{t}_j : \bar{t}_j = \frac{j}{L}, j = 0, 1, \dots, [L \cdot T] \right\}, \quad (16)$$

где  $[L \cdot T]$  — целая часть числа  $L \cdot T$ ,  $L$  — натуральное число. Множество (16) представляет собой равномерную разностную сетку с шагом дискретизации  $\Delta = \frac{1}{L}$ . На втором этапе строим дискретные аналоги непрерывных моделей.

Для любого  $j$  значения функции  $C(t)$  аппроксимируются значениями  $\bar{C}_j$ :

$$\bar{C}_j = \lambda \bar{g}_j + \rho, \text{ где } \bar{C}_j = C(\bar{t}_j), \bar{g}_j = g(\bar{t}_j). \quad (17)$$

На рис. 1 представлен график функции  $C(t)$ . В данном примере показатели СМАД взяты у пациента из группы женщин с АГ на терапии, тип ночного снижения САД «dipper». Имеются два промежутка стабилизации САД. Параметры модели:  $R = T = 19,43$ , дискретность времени  $\Delta = 0,01$ ,  $t^0 = 9,81$ ,  $t^1 = 0,34$ ,  $t^2 = 8,38$ ,  $t^3 = 11,88$ ,  $t^4 = 17,88$ ;  $k_1 = 0,32$ ,  $c_1 = -0,013$ ,  $d_1 = 0,42$ ,  $a_1 = 0,49$ ;  $k_2 = 0,327$ ,  $b_2 = -0,062$ ,  $c_2 = -0,01$ ,  $d_2 = -0,43$ ,  $a_2 = 0,65$ ;  $\lambda = 37,16$ ,  $\rho = 156,16$ . Как видно из рис. 1, значения  $C(t)$  на  $[t^1, t^2]$  и  $[t^3, t^4]$  задаются с помощью линейных функций, которые интерпретируются как промежутки стабилизации САД. Наличием этих промежутков наша модель существенно отличается от классического подхода к моделированию циркадианных ритмов САД. Биологические параметры системы регуляции АД изменяются при переходе от дневного к ночному периоду суток, поэтому в нашей модели циркадианный ритм САД описывается двумя разными синусоидами, а не одной, как, например, у Санникова И.А. и соавторов в работе [11]. Данный подход позволяет более адекватно оценить кривую циркадианного ритма САД.

Для построения компьютерной имитационной модели регуляции САД в моменты стрессовых ситуаций перепишем систему (15) в виде:

$$\begin{cases} dX_t = \eta dN_t - \alpha X_t dt \\ dY_t = \beta X_t dt - \gamma Y_t dt + \sigma Y_t dW_t + C(t) dt \end{cases} \quad (18)$$

При переходе от системы (18) к ее дискретным аналогам воспользуемся элементами теории разностных схем. Тогда для любого  $j$  уравнения системы (18) аппроксимируются следующими разностными уравнениями:

$$\bar{X}_{j+1} = \bar{X}_j + \eta \xi_j - \alpha \bar{X}_j \Delta \quad (19)$$

$$\bar{Y}_{j+1} = \bar{Y}_j + \beta \bar{X}_j \Delta - \gamma \bar{Y}_j \Delta + \sigma \bar{Y}_j \varepsilon_j + \bar{C}_j \Delta \quad (20)$$

где  $\bar{X}_j, \bar{Y}_j$  — значения случайных процессов  $X, Y$  в точке  $\bar{t}_j$ .

Начальные значения  $\bar{X}_0$  и  $\bar{Y}_0$  устанавливаются, исходя из экспериментальных данных. В (19)  $\xi_j$  — последовательность независимых случайных величин, таких, что  $\xi_j = 1$  при  $\zeta_j \leq \mu \Delta$  и  $\xi_j = 0$  при  $\zeta_j > \mu \Delta$ , где  $\zeta_j$  — последовательность независимых случайных величин, равномерно распределенных на  $[0,1]$ . В (20)  $\varepsilon_j$  — последовательность независимых гауссовских случайных величин с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной  $\Delta$ .

На рис. 2 изображен график траектории процесса  $Y$ , построенного по тем же данным СМАД, что и функция  $C(t)$  (с теми же параметрами  $R, T$  и  $\Delta$ ). Параметры процесса  $N$ :  $\mu = 3$ ,  $\eta = 2$ . Параметры процесса  $X$ :  $X_0 = 0$ ,  $\alpha = 10$ . Параметры процесса  $Y$ :  $Y_0 = 157$ ,  $\beta = 10$ ,  $\gamma = 1$ ,  $\sigma = 0,04$ . Коэффициенты  $\mu, \eta, \alpha, \beta, \gamma, \sigma$  были найдены с помощью МНК. Поскольку функция  $C(t)$  входит в уравнение, задающее процесс  $Y$ , на графике траектории  $Y$  есть промежутки стабилизации САД, на тех же отрезках времени, что и у  $C(t)$ . Из рис. 2 видно, что значения САД у пациента с АГ на терапии превышают норму, однако

наблюдается улучшение в работе гомеостатических механизмов поддержания АД на некотором стабильном уровне в течение дня и ночи.

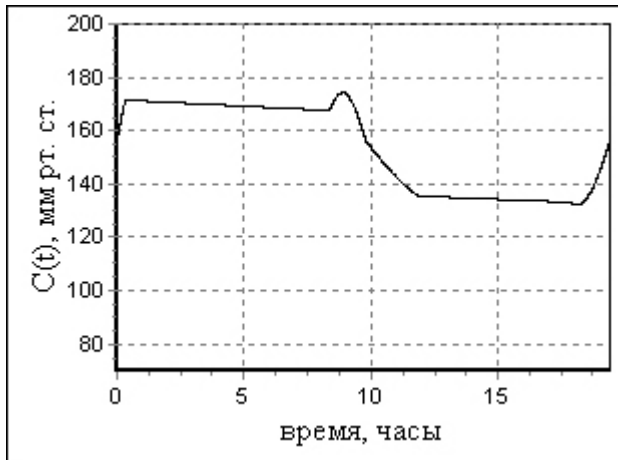


Рис. 1. График функции  $C(t)$

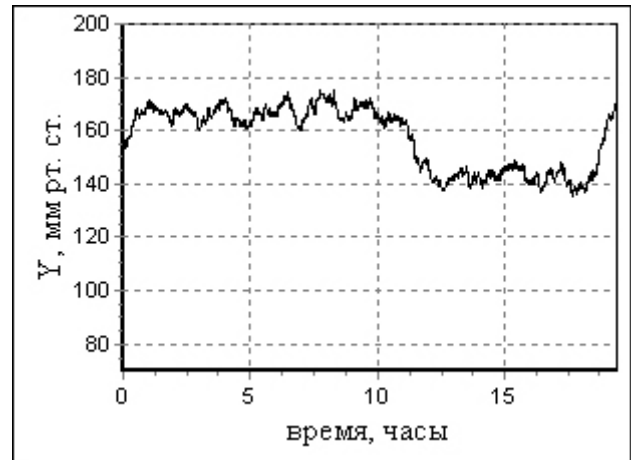


Рис. 2. График траектории процесса  $Y$

### Выводы

Практическая значимость работы состоит в построении математической и компьютерной имитационной моделей регуляции САД в моменты стрессовых ситуаций. Модели могут быть усложнены в зависимости от конкретной решаемой задачи, например, при добавлении в систему новых объектов, формирующих суточный профиль САД, или функциональной зависимости параметров моделей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бегун П.И., Афонин П.Н. Моделирование в биомеханике. М.: Высшая школа, 2004. 391 с.
2. Sagawa K., Lie R.K., Schaefer J. Translation of Otto Frank's paper «Die Grundform des Arteriellen Pulses» // J. Mol. Cell. Cardiol. 1990. Vol. 22. P. 253–277.
3. Гродинз Ф. Теория регулирования и биологические системы. М.: Мир, 1966. 254 с.
4. Dagan J. Pulsatile mechanical and mathematical model of the cardiovascular system // Medical and Biological Engineering and Computing. 1982. Vol. 20. № 5. P. 601–607.
5. Yu Y-C., Simaan M.A., Mushi S., Zorn N.V. A Nonlinear Model for Flow Estimation and Control in a Percutaneous Heart Assist System // Proceedings of the American Control Conference, 2007. P. 2018–2023.
6. Ellwein L.M., Tran H.T., Zapata C., Novak V., Olufsen M.S. Sensitivity analysis and model assessment: mathematical models for arterial blood flow and blood pressure // Cardiovasc. Eng. 2008. Vol. 8. Iss. 2. P. 94–108.
7. Недорезов Л.В., Недорезова Б.Н. Математические модели системы быстрых механизмов регуляции артериального давления // Автометрия. 1993. № 2. С. 5–10.
8. Астраханцева Е.В., Гидаспов В.Ю., Ревизников Д.Л. Математическое моделирование гемодинамики крупных кровеносных сосудов // Математическое моделирование. 2005. Т. 17. №8. С. 61–80.
9. Guyton A.C. Circulatory Physiology III: Arterial Pressure and Hypertension. Philadelphia, PA: Saunders, 1980. 564 p.
10. Абакумов М.В., Ашметков И.В., Есикова Н.Б. и др. Методика математического моделирования сердечно-сосудистой системы // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 2. С. 106–117.

11. Санников И.А., Бутов А.А., Рузов В.И., Гимаев Р.Х. Математическая модель фазовой стабилизации артериального давления у больных артериальной гипертонией // Вестник аритмологии. 2002. № 27. С. 71.

12. McSharry P.E., McGuinness M.J., Fowler A.C. Confronting a cardiovascular system model with heart rate and blood pressure data // Computers in Cardiology. 2005. P. 587–590.

13. Чибисов С.М., Подладчикова Т.В., Рагульская М.В., Стрелков Д.Г. Оценка и прогноз результатов мониторинга среднего артериального давления у различных возрастных групп // Научные труды VIII Международного конгресса «Здоровье и образование в XXI веке. Концепции болезней цивилизации», 14–17 ноября 2007, РУДН, М. 2007. С. 731–742.

14. Подладчикова Т.В., Рагульская М.В., Чибисов С.М., Стрелков Д.Г. Долгосрочное мониторингирование и математическое моделирование хронобиологических изменений среднего артериального давления у различных возрастных групп // Успехи современного естествознания. 2008. № 2. С. 14–20.

15. Лищук В.А. Математическая теория кровообращения. М.: Медицина, 1991. 256 с.

16. Фролов С.В., Макоев С.Н., Газизова Д.Ш., Лищук В.А. Модель сердечно-сосудистой системы, ориентированная на интенсивную терапию // Вестник ТГТУ. 2008. Т. 14. №4. С. 892–902.

17. Johnston P.R., Kilpatrick D. Mathematical modelling of paired arterial stenoses // Computers in Cardiology, Proceedings. 1990. P. 229–232.

18. Винников В.В., Ревизников Д.Л. Применение декартовых сеток для решения уравнений Навье-Стокса в областях с криволинейными границами // Математическое Моделирование. 2005. Т. 17. №8. С. 15–30.

19. Labadin J., Ahmadi A. Mathematical modeling of the arterial blood flow // Proceedings of the 2nd IMT-GT Regional Conference on Mathematics, Statistics and Applications. Penang, June 13–15, 2006. URL: <http://math.usm.my/research/OnlineProc/AM33.pdf>.

20. Quarteroni A. What mathematics can do for the simulation of blood circulation // Proceedings of the International Congress of Mathematicians. 2006. P. 110–144.

21. Rao R.R., Aufderheide B., Bequette B.W. Multiple Model Predictive Control of Hemodynamic Variables: An Experimental Study // Proceedings of American Control Conference. 2–4 June, 1999. Vol. 2. P. 1253–1257.

22. Ahmed S.A., Waheed M. El-S., Nermeen M.E. Multichannel Blind Deconvolution Using the Stochastic Calculus for the Estimation of the Central Arterial Pressure // Math. Probl. Eng. 2010. Article ID 602373. 21 p.

23. Дильман В.М. Четыре модели медицины. Ленинград: Медицина, 1987. 288 с.

**Гаврилова Мария Сергеевна** — аспирант кафедры «Прикладная математика» Ульяновского государственного университета

**Gavrilova Maria Sergeevna** — Post-graduate Student of the Department “Applied Mathematics”, Ulyanovsk State University

**Бутов Александр Александрович** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика» Ульяновского государственного университета

**Butov Alexander Alexandrovich** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chairman of the Department “Applied Mathematics”, Ulyanovsk State University

**Рузов Виктор Иванович** — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой «Факультетская терапия» Ульяновского государственного университета

**Ruzov Victor Ivanovich** — Doctor of Medicine, Professor, Chairman of the Department “Departmental Therapy”, Ulyanovsk State University

**Разин Владимир Александрович** —  
кандидат медицинских наук, доцент кафедры  
«Факультетская терапия» Ульяновского  
государственного университета

**Razin Vladimir Alexandrovich** —  
Candidate of Medicine, Associate Professor of  
the Department “Departmental Therapy”,  
Ulyanovsk State University

*Статья поступила в редакцию 13.03.2011, принята к опубликованию 05.08.2011*



УДК 621.311

**В.С. Хачатрян, Н.П. Бадалян, Е. А. Чашин**

**РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СОЧЕТАНИЕМ МЕТОДОВ  
ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОРЯДКОВ НЬЮТОНА**

*Предлагается новый метод расчета установившегося режима электроэнергетической системы с использованием матриц Гессе и Якоби. Итерационный процесс сходится за 3-4 итерации.*

Модель, система, узел, режим, параметр, нагрузка, мощность, функция

**V. S. Hachatryan, N. P. Badalyan, E. A. Chaschin**

**CALCULATION OF BEING FIXED MODE  
ELECTROPOWER SYSTEM COMBINATION  
OF METHODS OF FIRST AND SECOND OF ORDERS OF NEWTON**

*New method of calculation of being fixed mode is offered with electropower system with use of matrixes of Hesse and Jacobi. Iterative process converges for three – four iteration.*

Model, system, unit, mode, parameter, load, power, function

В настоящее время для решения задачи расчета установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС) широко используется Y-Z форма задания состояния сети. При этом большое практическое значение приобретает случай, когда независимые станционные узлы одновременно могут быть типа P-Q и P-U. Для построения соответствующей математической модели применяется следующая система индексов:

$m(n)=0,1,2,\dots,C_1$ , где  $C_1$ - число станционных узлов типа P-Q, станционный узел с нулевым индексом, который называется зависимым узлом, выбирается в качестве базисного (балансирующего);

$k(l)=C_1 + 1, C_1 + 2,\dots, C_1+C_2$ , где  $C_2$  - число станционных узлов типа P-U;

$i(j) = C + 1, C + 2,\dots, C + N$ , где  $N$  - число нагрузочных узлов типа P-Q, причем  $C = C_1+C_2$ . Общее число независимых узлов -  $M$ .

Представляя Y-Z расчетную матрицу на основании принятых выше индексов в развернутой форме, можно установить следующие уравнения для активных и реактивных мощностей независимых узлов:

$$P_m = P_{Bm} + U_m \sum_{n=1}^{C_1} [g_{m,n} \cos(\Psi_{U_m} - \Psi_{U_n}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{U_m} - \Psi_{U_n})] U_n + ; \quad (1)$$

$$+ U_m \sum_{l=C_1+1}^C [g_{m,l} \cos(\Psi_{U_m} - \Psi_{U_l}) + b_{m,l} \sin(\Psi_{U_m} - \Psi_{U_l})] U_l$$

$$Q_m = Q_{Bm} + U_m \sum_{n=1}^{c_1} [g_{m,n} \sin(\Psi_{U_m} - \Psi_{U_n}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{U_m} - \Psi_{U_n})] U_n +$$

$$+ U_m \sum_{l=c_1+1}^c [g_{m,l} \sin(\Psi_{U_m} - \Psi_{U_l}) - b_{m,l} \cos(\Psi_{U_m} - \Psi_{U_l})] U_l \quad ; \quad (2)$$

$$P_k = P_{Bk} + U_k \sum_{n=1}^{c_1} [g_{k,n} \cos(\Psi_{U_k} - \Psi_{U_n}) + b_{k,n} \sin(\Psi_{U_k} - \Psi_{U_n})] U_n +$$

$$+ U_k \sum_{l=c_1+1}^c [g_{k,l} \cos(\Psi_{U_k} - \Psi_{U_l}) + b_{k,l} \sin(\Psi_{U_k} - \Psi_{U_l})] U_l \quad ; \quad (3)$$

$$Q_k = Q_{Bk} + U_k \sum_{n=1}^{c_1} [g_{k,n} \sin(\Psi_{U_k} - \Psi_{U_n}) - b_{k,n} \cos(\Psi_{U_k} - \Psi_{U_n})] U_n +$$

$$+ U_k \sum_{l=c_1+1}^c [g_{k,l} \sin(\Psi_{U_k} - \Psi_{U_l}) - b_{k,l} \cos(\Psi_{U_k} - \Psi_{U_l})] U_l \quad ; \quad (4)$$

$$P_i = P_{Bi} + \sum_{j=c+1}^M [R_{i,j} (I'_j I'_j + I''_j I''_j) + R_{i,j} (I'_j I'_j - I''_j I''_j)] ; \quad (5)$$

$$Q_i = Q_{Bi} + \sum_{j=c+1}^M [X_{i,j} (I'_j I'_j + I''_j I''_j) - R_{i,j} (I'_j I'_j - I''_j I''_j)] ; \quad (6)$$

В вышеприведенных выражениях (1) – (6):

$$P_{Bm} = - \sum_{l=1}^c [g_{m,l} \cos \Psi_{U_m} + b_{m,l} \sin \Psi_{U_m}] U_m U_0 +$$

$$+ \sum_{j=c+1}^M [(A'_{m,j} I'_j - A''_{m,j} I''_j) \cos \Psi_{U_m} + (A'_{m,j} I''_j + A''_{m,j} I'_j) \sin \Psi_{U_m}] U_m \quad , \quad (7)$$

$$Q_{Bm} = - \sum_{l=1}^c [g_{m,l} \sin \Psi_{U_m} + b_{m,l} \cos \Psi_{U_m}] U_m U_0 +$$

$$+ \sum_{j=c+1}^M [(A'_{m,j} I'_j - A''_{m,j} I''_j) \sin \Psi_{U_m} - (A'_{m,j} I''_j + A''_{m,j} I'_j) \cos \Psi_{U_m}] U_m \quad , \quad (8)$$

$$P_{Bk} = - \sum_{l=1}^c [g_{k,l} \cos \Psi_{U_k} + b_{k,l} \sin \Psi_{U_k}] U_k U_0 +$$

$$+ \sum_{j=c+1}^M [(A'_{k,j} I'_j - A''_{k,j} I''_j) \cos \Psi_{U_k} + (A'_{k,j} I''_j + A''_{k,j} I'_j) \sin \Psi_{U_k}] U_k \quad , \quad (9)$$

$$Q_{Bk} = - \sum_{l=1}^c [g_{k,l} \sin \Psi_{U_k} + b_{k,l} \cos \Psi_{U_k}] U_k U_0 +$$

$$+ \sum_{j=c+1}^M [(A'_{k,j} I'_j - A''_{k,j} I''_j) \sin \Psi_{U_k} + (A'_{k,j} I''_j + A''_{k,j} I'_j) \cos \Psi_{U_k}] U_k \quad , \quad (10)$$

$$P_{Bi} = I'_i U_0 - \sum_{l=1}^c (B'_{i,l} I'_i - B''_{i,l} I''_i) U_0 +$$

$$+ \sum_{l=1}^c [(B'_{i,l} I'_i + B''_{i,l} I''_i) \cos \Psi_{U_l} - (B''_{i,l} I'_i - B'_{i,l} I''_i) \sin \Psi_{U_l}] U_l \quad , \quad (11)$$

$$Q_{Bi} = -I''_i U_0 + \sum_{l=1}^c (B'_{i,l} I'_i - B''_{i,l} I''_i) U_0 +$$

$$+ \sum_{l=1}^c [(B''_{i,l} I'_i - B'_{i,l} I''_i) \cos \Psi_{U_l} + (B'_{i,l} I'_i + B''_{i,l} I''_i) \sin \Psi_{U_l}] U_l \quad , \quad (12)$$

Представим уравнения активных и реактивных мощностей в виде неявновыраженных функций:

$$\begin{cases} \Phi_{pm} = P_m - [P_{Bm} + \varphi_{pm}(U_n, \Psi_{un}, U_l, \Psi_{ul})] = 0; \\ \Phi_{qm} = Q_m - [Q_{Bm} + \varphi_{qm}(U_n, \Psi_{un}, U_l, \Psi_{ul})] = 0; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \Phi_{pk} = P_k - [P_{Bk} + \varphi_{pk}(U_n, \Psi_{un}, U_l, \Psi_{ul})] = 0; \\ \Phi_{qk} = Q_k - [Q_{Bk} + \varphi_{qk}(U_n, \Psi_{un}, U_l, \Psi_{ul})] = 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Phi_{pi} = P_i - [P_{Bi} + \varphi_{pi}(I'_j I''_j)] = 0; \\ \Phi_{qi} = Q_i - [Q_{Bi} + \varphi_{qi}(I'_j I''_j)] = 0; \end{cases} \quad (15)$$

Поскольку при известности аргументов комплексных напряжений станционных узлов типа P-U можно установить численные значения реактивных мощностей, то из системы уравнений (14) можно исключить вторую систему и тогда окончательно вышеприведенные неявновыраженные расчетные функции принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \Phi_{pm}(U_n, \Psi_{um}, U_l, \Psi_{ul}) = 0; \\ \Phi_{qm}(U_n, \Psi_{um}, U_l, \Psi_{ul}) = 0; \\ \Phi_{pk}(U_n, \Psi_{um}, U_l, \Psi_{ul}) = 0; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Phi_{pi}(I'_j I''_j) = 0; \\ \Phi_{qi}(I'_j I''_j) = 0; \end{cases} \quad (17)$$

Порядок систем нелинейных функций (16) характеризуется числом независимых станционных узлов, а порядок (17) - числом нагрузочных узлов.

С другой стороны, решения систем нелинейных функций (16) характеризуется медленной сходимостью, тогда как системы (17) - быстрой сходимостью.

В силу этого системы нелинейных функций (16) предлагается решить быстродействующим методом второго порядка, а (17) - методом первого порядка.

Сначала рассмотрим решение систем (16) методом второго порядка или минимизации.

Согласно теории решения систем нелинейных функций методом минимизации, необходимо построить соответствующую квадратичную функцию, которая в данном случае представляется в виде:

$$F(U_m, \Psi_{um}, \Psi_{uk}) = \sum_C (\Phi_{pm}^2 + \Phi_{qm}^2 + \Phi_{pk}^2). \quad (18)$$

Введем следующее обозначение:

$$\omega = (U_m, \Psi_{um}, \Psi_{uk}), \quad (19)$$

Тогда выражение (18) принимает вид:

$$F(\omega) = \sum_C (\Phi_{pm}^2 + \Phi_{qm}^2 + \Phi_{pk}^2). \quad (20)$$

Разлагая в ряд Тейлора функцию (20), получим:

$$F(\omega) = F(\omega^0) + \left. \frac{\partial F(\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega^0} \Delta \omega + \frac{1}{2} \Delta \omega^T \left. \frac{\partial^2 F(\omega)}{\partial \omega^2} \right|_{\omega^0} \Delta \omega + F(\omega)_b, \quad (21)$$

где  $F(\omega)_b$  - члены ряда Тейлора, имеющие производные выше второго порядка;  
T – знак транспонирования.

Пренебрегая  $F(\omega)_b$ , выражение (21) можно представить так:

$$F(\omega) = F(\omega^0) + \left. \frac{\partial F(\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega^0} \Delta \omega + \frac{1}{2} \Delta \omega^T \left. \frac{\partial^2 F(\omega)}{\partial \omega^2} \right|_{\omega^0} \Delta \omega. \quad (22)$$

Теперь необходимо найти такое приращение  $\Delta \omega$  вектора  $\omega$ , который минимизирует функцию (22).

Для этого необходимо от функции (22) взять производную по  $\Delta \omega$ , т.е.:

$$\frac{\partial F(\omega)}{\partial \Delta \omega} = 0, \quad (23)$$

или

$$\frac{\partial F(\omega)}{\partial \Delta \omega} \left[ F(\omega^0) + \frac{\partial F(\omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega^0} \Delta \omega + \frac{1}{2} \Delta \omega^T \frac{\partial^2 F(\omega)}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega^0} \Delta \omega \right] = 0. \quad (24)$$

Поскольку

$$\frac{\partial F(\omega^0)}{\partial \Delta \omega} = 0, \quad (25)$$

то выражение (24) принимает более упрощенный вид:

$$\frac{\partial}{\partial \Delta \omega} \left[ \frac{\partial F(\omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega^0} \Delta \omega + \frac{1}{2} \Delta \omega^T \frac{\partial^2 F(\omega)}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega^0} \Delta \omega \right] = 0. \quad (26)$$

Рассматривая производные по отдельным элементам, получаем:

$$\frac{\partial F(\omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega^0} + \frac{\partial^2 F(\omega)}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega^0} \Delta \omega = 0, \quad (27)$$

или

$$\frac{\partial^2 F(\omega)}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega^0} \Delta \omega = - \frac{\partial F(\omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega^0}. \quad (28)$$

Введем также следующие обозначения:

$$\left[ \frac{\partial^2 F(\omega)}{\partial \omega^2} \right] = [H(\omega)], \quad (29)$$

которое называется матрицей Гессе с элементами, состоящими из частных производных второго порядка от заданной функции. Матрица Гессе является квадратной и особенной, в силу чего имеет обратную ей матрицу.

С другой стороны:

$$\left[ \frac{\partial F(\omega)}{\partial \omega} \right] = [G(\omega)] \quad (30)$$

и является столбцевой матрицей градиента от заданной нелинейной функции.

В результате выражение (28) принимает следующий вид:

$$\Delta \omega = -[H(\omega)]_{\omega^0}^{-1} \times [G(\omega)]_{\omega^0} \quad (31)$$

Выражение (31) изображает приращение вектора  $\omega$  и является его корректирующим элементом.

Новый вектор можно определить на основании следующего выражения:

$$[\omega]^1 = [\omega]^0 + [\Delta \omega]. \quad (32)$$

Для производного N-ого шага или итерации выражение (32) представляется как рекуррентное выражение в следующем виде:

$$[\omega]^{N+1} = [\omega]^N + [\Delta \omega]^N \quad (33)$$

или в регулярной форме:

$$[\omega]^{N+1} = [\omega]^N - [H(\omega)]^{-1} \times [G(\omega)], \quad (34)$$

где N - номер итерации или шага.

Поскольку вектор  $\omega$  состоит из трех компонентов  $U_m$ ,  $\Psi_{um}$  и  $\Psi_{uk}$ , то рекуррентное выражение (34) в развернутой форме представляется так:

$$\begin{bmatrix} U_m \\ \dots \\ \Psi_{um} \\ \dots \\ \Psi_{uk} \end{bmatrix}^{N+1} = \begin{bmatrix} U_m \\ \dots \\ \Psi_{um} \\ \dots \\ \Psi_{uk} \end{bmatrix}^N - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial U_m \partial U_n} : \frac{\partial^2 F}{\partial U_m \partial \Psi_{un}} : \frac{\partial^2 F}{\partial U_m \partial \Psi_{ul}} \\ \dots : \dots : \dots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{um} \partial U_n} : \frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{um} \partial \Psi_{un}} : \frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{um} \partial \Psi_{ul}} \\ \dots : \dots : \dots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{uk} \partial U_n} : \frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{uk} \partial \Psi_{un}} : \frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{uk} \partial \Psi_{ul}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial U_{um}} \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial \Psi_{um}} \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial \Psi_{uk}} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Теперь рассмотрим решение системы векторных уравнений (17). Введем следующие обозначения:

$$\Phi(I) = [\Phi_{pi}(I'_j, I''_j), \Phi_{qi}(I'_j, I''_j)] \quad (36)$$

где  $I = (I'_j, I''_j)$  (37)

Разлагая (36) в ряд Тейлора, можем написать:

$$\Phi(I) = \Phi(I^0) + \left. \frac{\partial \Phi(I)}{\partial I} \right|_{I_0} \Delta I + F(I)_B, \quad (38)$$

где  $F(I)_B$  - члены ряда Тейлора, имеющие производные выше первого порядка.

Пренебрегая  $F(I)_B$ , выражение(38) принимает следующий вид:

$$\Phi(I) = \Phi(I^0) + \left. \frac{\partial \Phi(I)}{\partial I} \right|_{I_0} \Delta I. \quad (39)$$

Отсюда можем написать:

$$\left. \frac{\partial \Phi(I)}{\partial I} \right|_{I_0} \Delta I = \Phi(I) - \Phi(I^0)$$

или

$$\left[ \left. \frac{\partial \Phi(I)}{\partial I} \right|_{I_0} \right] \Delta I = -[\Phi(I)] - [\Phi(I^0)] \quad (40)$$

Здесь первый множитель слева является неособенной квадратной матрицей Якоби, которая имеет обратную ей матрицу. Поскольку в точке решения  $\Phi(I)$  равняется нулю, то после обращения матрицы Якоби выражение (40) будет принимать следующий вид:

$$[\Delta I] = - \left[ \left. \frac{\partial \Phi}{\partial I} \right|_{I_0} \right]^{-1} \times [\Phi(I^0)] \quad (41)$$

Новый вектор тока  $[I]^1$  можно определить с учетом поправки (41):

$$[I]^1 = [I^0]^0 + [\Delta I]. \quad (42)$$

Для произвольного N-го шага или итерации выражение (42) также представляется как рекуррентное выражение ниже приведенного вида:

$$[I]^{n+1} = [I]^n - \left[ \left. \frac{\partial \Phi}{\partial I} \right|_{I^n} \right]^{-1} \times [\Phi(I)] \quad (43)$$

Здесь также вектор  $I$  состоит из двух компонентов  $I'$  и  $I''$ , в результате чего рекуррентное выражение (43) в развернутой форме можно представить как:

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ \dots \\ I''_i \end{bmatrix}^{H+1} = \begin{bmatrix} I'_i \\ \dots \\ I''_i \end{bmatrix}^H - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}(I)}{\partial I'_i} : \frac{\partial \Phi_{pi}(I)}{\partial I''_i} \\ \dots \\ \frac{\partial \Phi_{qi}(I)}{\partial I'_i} : \frac{\partial \Phi_{qi}(I)}{\partial I''_i} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Phi_{pi} \\ \dots \\ \Phi_{qi} \end{bmatrix}. \quad (44)$$

Теперь необходимо установить выражения частных производных, входящих как в рекуррентное выражение (35), так и в рекуррентное выражение (44).

Частные производные первого порядка, входящие в рекуррентное выражение (35), определяются следующим образом:

$$\frac{\partial F}{\partial U_m} = 2 \sum_C \left( \Phi_{pn} \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial U_m} + \Phi_{qn} \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial U_m} + \Phi_{pk} \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_m} \right); \quad (45)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \Psi_{Um}} = 2 \sum_C \left( \Phi_{pn} \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um}} + \Phi_{qn} \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um}} + \Phi_{pk} \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um}} \right); \quad (46)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \Psi_{Uk}} = 2 \sum_C \left( \Phi_{pn} \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Uk}} + \Phi_{qn} \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Uk}} + \Phi_{pk} \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Uk}} \right); \quad (47)$$

Частные производные второго порядка определяются на основании (45)-(46) и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial U_m^2} = 2 \sum_C & \left[ \left( \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial U_m} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial U_m} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_m} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial U_m^2} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial U_m^2} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial U_m^2} \right]; \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{Um}^2} = 2 \sum_C & \left[ \left( \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um}} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um}^2} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um}^2} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um}^2} \right]; \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{Uk}^2} = 2 \sum_C & \left[ \left( \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Uk}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Uk}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Uk}} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Uk}^2} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Uk}^2} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Uk}^2} \right]; \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial U_m \partial U_n} = 2 \sum_C & \left[ \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial U_n} \cdot \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial U_m} + \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial U_n} \cdot \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial U_m} + \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} \cdot \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_m} + \right. \\ & \left. + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial U_m \partial U_n} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial U_m \partial U_n} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial U_m \partial U_n} \right] \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial U_m \partial \Psi_{Un}} = 2 \sum_C & \left[ \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Un}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial U_m} + \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Un}} \cdot \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial U_m} + \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Un}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_m} + \right. \\ & \left. + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial U_m \partial \Psi_{Un}} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial U_m \partial \Psi_{Un}} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial U_m \partial \Psi_{Un}} \right] \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial U_m \partial \Psi_{Ul}} = 2 \sum_C & \left[ \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Ul}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial U_m} + \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Ul}} \cdot \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial U_m} + \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Ul}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_m} + \right. \\ & \left. + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial U_m \partial \Psi_{Ul}} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial U_m \partial \Psi_{Ul}} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial U_m \partial \Psi_{Ul}} \right] \end{aligned} \quad (53)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{Um} \partial U_n} = 2 \sum_C \left[ \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial U_n} \cdot \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um}} + \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial U_n} \cdot \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um}} + \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} \cdot \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um}} + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um} \partial U_n} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um} \partial U_n} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um} \partial U_n} \right] \quad (54)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{Um} \partial \Psi_{Un}} = 2 \sum_C \left[ \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Un}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um}} + \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Un}} \cdot \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um}} + \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Un}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um}} + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um} \partial \Psi_{Un}} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um} \partial \Psi_{Un}} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um} \partial \Psi_{Un}} \right] \quad (55)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{Um} \partial \Psi_{Ul}} = 2 \sum_C \left[ \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Ul}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um}} + \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Ul}} \cdot \frac{\partial \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um}} + \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Ul}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um}} + \Phi_{pn} \frac{\partial^2 \Phi_{pn}}{\partial \Psi_{Um} \partial \Psi_{Ul}} + \Phi_{qn} \frac{\partial^2 \Phi_{qn}}{\partial \Psi_{Um} \partial \Psi_{Ul}} + \Phi_{pk} \frac{\partial^2 \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Um} \partial \Psi_{Ul}} \right] \quad (56)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{Uk} \partial U_n} = 2 \sum_C \left[ \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} + \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} + \frac{\partial \Phi_{pl}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pl}}{\partial U_n} + \Phi_{pm} \frac{\partial^2 \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Uk} \partial U_n} + \Phi_{qm} \frac{\partial^2 \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Uk} \partial U_n} + \Phi_{pl} \frac{\partial^2 \Phi_{pl}}{\partial \Psi_{Uk} \partial U_n} \right] \quad (57)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{Uk} \partial \Psi_{Un}} = 2 \sum_C \left[ \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Un}} + \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} + \frac{\partial \Phi_{pl}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pl}}{\partial \Psi_{Un}} + \Phi_{pm} \frac{\partial^2 \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Uk} \partial \Psi_{Un}} + \Phi_{qm} \frac{\partial^2 \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Uk} \partial \Psi_{Un}} + \Phi_{pl} \frac{\partial^2 \Phi_{pl}}{\partial \Psi_{Uk} \partial \Psi_{Un}} \right] \quad (58)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial \Psi_{Uk} \partial \Psi_{Ul}} = 2 \sum_C \left[ \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Ul}} + \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Ul}} + \frac{\partial \Phi_{pl}}{\partial \Psi_{Uk}} \cdot \frac{\partial \Phi_{pl}}{\partial \Psi_{Ul}} + \Phi_{pm} \frac{\partial^2 \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Uk} \partial \Psi_{Ul}} + \Phi_{qm} \frac{\partial^2 \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Uk} \partial \Psi_{Ul}} + \Phi_{pl} \frac{\partial^2 \Phi_{pl}}{\partial \Psi_{Uk} \partial \Psi_{Ul}} \right] \quad (59)$$

Частные производные, входящие в правые части выражений (45)÷(59) определяются на основании (16), которые целесообразно представить в следующем виде:

$$\Phi_{pm} = P_m - \left\{ P_{Bm} + g_{m,n} U_m^2 + U_m \sum_{n=1}^{C_1} [g_{m,n} \cos(\Psi_{um} - \Psi_{un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{um} - \Psi_{un})] U_n + U_m \sum_{l=C_1+1}^C [g_{m,l} \cos(\Psi_{um} - \Psi_{ul}) + b_{m,l} \sin(\Psi_{um} - \Psi_{ul})] U_l \right\} \quad (60)$$

$$\Phi_{qm} = Q_m - \left\{ Q_{Bm} + b_{m,m} U_m^2 + U_m \sum_{n=1}^{C_1} [g_{m,n} \sin(\Psi_{um} - \Psi_{un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{um} - \Psi_{un})] U_n + U_m \sum_{l=C_1+1}^C [g_{m,l} \sin(\Psi_{um} - \Psi_{ul}) - b_{m,l} \cos(\Psi_{um} - \Psi_{ul})] U_l \right\} \quad (61)$$

$$\Phi_{pk} = P_k - \left\{ P_{Bk} + g_{k,k} U_k^2 + U_k \sum_{n=1}^{C_1} [g_{k,n} \cos(\Psi_{uk} - \Psi_{un}) + b_{k,n} \sin(\Psi_{uk} - \Psi_{un})] U_n + U_k \sum_{l=C_1+1}^C [g_{k,l} \cos(\Psi_{uk} - \Psi_{ul}) - b_{k,l} \sin(\Psi_{uk} - \Psi_{ul})] U_l \right\} \quad (62)$$

$$\Phi_{qk} = Q_k - \left\{ Q_{Bk} + b_{k,k} U_k^2 + U_k \sum_{n=1}^{C_1} [g_{k,n} \sin(\Psi_{uk} - \Psi_{un}) - b_{k,n} \cos(\Psi_{uk} - \Psi_{un})] U_n + U_k \sum_{l=C_1+1}^C [g_{k,l} \sin(\Psi_{uk} - \Psi_{ul}) - b_{k,l} \cos(\Psi_{uk} - \Psi_{ul})] U_l \right\} \quad (63)$$

На основании (60)÷(63) можно установить аналитические выражения необходимых частных производных, входящих в (45)÷(59), при этом учитывая равнозначность индексов “m” и “n”, “k” и “l”.

В силу этого выражения (60), (61) можно переписать также в следующем виде:

$$\Phi_{pn} = P_n - \left\{ P_{Bn} + g_{n,n} U_n^2 + U_n \sum_{m=1, m \neq n}^{C_1} [g_{n,m} \cos(\Psi_{un} - \Psi_{um}) + b_{n,m} \sin(\Psi_{un} - \Psi_{um})] U_m + \right. \\ \left. + U_n \sum_{l=C_1+1}^C [g_{n,l} \cos(\Psi_{un} - \Psi_{ul}) + b_{n,l} \sin(\Psi_{un} - \Psi_{ul})] U_l \right\} \quad (64)$$

$$\Phi_{qn} = Q_n - \left\{ Q_{Bn} + b_{n,n} U_n^2 + U_n \sum_{m=1}^{C_1} [g_{n,m} \sin(\Psi_{un} - \Psi_{um}) - b_{n,m} \cos(\Psi_{un} - \Psi_{um})] U_m + \right. \\ \left. + U_n \sum_{l=C_1+1}^C [g_{n,l} \sin(\Psi_{un} - \Psi_{ul}) - b_{n,l} \cos(\Psi_{un} - \Psi_{ul})] U_l \right\} \quad (65)$$

С другой стороны, выражения (62), (63) так же можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{pl} = P_l - \left\{ P_{Bl} + g_{l,l} U_l^2 + U_l \sum_{n=1}^{C_1} [g_{l,n} \cos(\Psi_{ul} - \Psi_{un}) + b_{l,n} \sin(\Psi_{ul} - \Psi_{un})] U_n + \right. \\ \left. + U_l \sum_{k=C_1+1}^C [g_{l,k} \cos(\Psi_{ul} - \Psi_{uk}) + b_{l,k} \sin(\Psi_{ul} - \Psi_{uk})] U_k \right\} \quad (66)$$

$$\Phi_{ql} = Q_l - \left\{ Q_{Bl} + b_{l,l} U_l^2 + U_l \sum_{n=1}^{C_1} [g_{l,n} \sin(\Psi_{ul} - \Psi_{un}) - b_{l,n} \cos(\Psi_{ul} - \Psi_{un})] U_n + \right. \\ \left. + U_l \sum_{k=C_1+1}^C [g_{l,k} \sin(\Psi_{ul} - \Psi_{uk}) - b_{l,k} \cos(\Psi_{ul} - \Psi_{uk})] U_k \right\} \quad (67)$$

На основании (64)÷(67) можно установить аналитические выражения частных производных, входящих в выражения (45)÷(59).

Частные производные, входящие в рекуррентное выражение (44), определяются нижеприведенными выражениями.

При одинаковых индексах, когда j=i:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_i} = - \left[ \frac{\partial P_{Bi}}{\partial I'_i} + 2R_{i,i} I'_i + \sum_{\substack{j=C+1 \\ j \neq i}}^M (R_{i,j} I'_j - X_{i,j} I''_j) \right]; \\ \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I''_i} = - \left[ \frac{\partial P_{Bi}}{\partial I''_i} + 2R_{i,i} I''_i + \sum_{\substack{j=C+1 \\ j \neq i}}^M (R_{i,j} I''_j + X_{i,j} I'_j) \right]; \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_i} = - \left[ \frac{\partial Q_{Bi}}{\partial I'_i} - 2X_{i,i} I'_i + \sum_{\substack{j=C+1 \\ j \neq i}}^M (R_{i,j} I'_j + X_{i,j} I'_j) \right]; \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_i} = - \left[ \frac{\partial Q_{Bi}}{\partial I''_i} - 2X_{i,i} I''_i - \sum_{\substack{j=C+1 \\ j \neq i}}^M (R_{i,j} I'_j - X_{i,j} I''_j) \right], \quad (68)$$

где

$$\frac{\partial P_{Bi}}{\partial I'_i} = U_0 - \sum_{t=1}^C B'_{i,t} U_0 + \sum_{t=1}^C (B'_{i,t} \cos \Psi_{ut} - B''_{i,t} \sin \Psi_{ut}) U_i; \\ \frac{\partial P_{Bi}}{\partial I''_i} = - \sum_{t=1}^C B''_{i,t} U_0 + \sum_{t=1}^C (B'_{i,t} \sin \Psi_{ut} + B''_{i,t} \cos \Psi_{ut}) U_i; \\ \frac{\partial Q_{Bi}}{\partial I'_i} = - \sum_{t=1}^C B''_{i,t} U_0 + \sum_{t=1}^C (B'_{i,t} \sin \Psi_{ut} + B''_{i,t} \cos \Psi_{ut}) U_i;$$



$$\frac{\partial Q_{bi}}{\partial I_i''} = -U_0 + \sum_{i=1}^c B'_{i,i} U_0 - \sum_{i=1}^c (B'_{i,i} \cos \Psi_{ui} - B''_{i,i} \sin \Psi_{ui}) U_i.$$

При разных индексах соответствующие частные производные определяются:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I_j'} &= -(R_{i,j} I_i' + X_{i,j} I_i''), \\ \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I_j''} &= -(R_{i,j} I_i'' - X_{i,j} I_i'), \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I_j'} &= -(-R_{i,j} I_i'' + X_{i,j} I_i'), \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I_j''} &= -(R_{i,j} I_i' + X_{i,j} I_i''). \end{aligned} \quad (69)$$

Как не трудно заметить, в (69) функционируют следующие соотношения:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I_j'} = \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I_j''}; \quad \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I_j''} = -\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I_j'}. \quad (70)$$

В работе предложен новый метод расчета установившегося режима электроэнергетической системы, в котором одновременно независимые станционные узлы могут быть как типа «P-Q», так и типа «P-U». Метод отличается высокой сходимостью и уменьшением числа итерации до 3-4.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В.С., Хачатрян С. Ц., Сафарян В. С. Расчет установившихся режимов электрических систем с применением матрицы Гессе при Z-форме задания состояния сети // Известия ВУЗов. Энергетика. 1983. №1. С. 20-23.
2. Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Бадалян Н.П. Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции // Электричество. 1999. № 4. С. 7-12.
3. Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Хачатрян К.В., Маркарян К.К. Метод коррекции Y-Z расчетной матрицы электроэнергетической системы // Известия НАН и ГИУА Армении. Сер. ТН. 2001. №1. С. 41-46.
4. Бадалян Н.П. Построение «Y-Z, P-Q» математической модели установившегося режима ЭЭС и ее реализация методом минимизации // Известия НАН и ГИУА Армении. Сер. ТН. 2001. №3. С. 372-378.
5. Хачатрян В.С., Бадалян Н.П. Диакоптическая «Y-Z, P-U» математическая модель установившегося режима ЭЭС и ее реализация методом минимизации // Известия НАН и ГИУА Армении. Сер. ТН. 2002. №3. С. 392-399.
6. Хачатрян В.С., Бадалян Н.П. Расчет установившегося режима большой электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество. 2003. №6. С. 13-17.

**Хачатрян Варос Саргисович** –  
доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики ГИУА (Государственный Инженерный Университет Армении)

**Hachatryan Varos Sargisovich** –  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Electroenergy”, Armenia State Engineering University

**Бадалян Норайр Петикович** –  
доктор технических наук, профессор кафедры электротехники Ковровской государственной технологической академии им. В. А. Дегтярева

**Badalyan Norayr Petikovich** –  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Electrotechnology”, Kovrov State Technological Academy in the Name of V.A. Degtyaryov

**Чащин Евгений Анатольевич** –  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электротехники  
Ковровской государственной технологической  
академии им. В. А. Дегтярева

**Chaschin Evgeny Anatolyevich** –  
Candidate of Technical Sciences, Assistant  
Professor, Head of the Department  
“Electrotechnology”, Kovrov State  
Technological Academy in the name of V.A.  
Degtyaryov.

*Статья поступила в редакцию 25.01.2011, принята к опубликованию 01.08.2011*

**Г.И. Шаронов, Р.С. Шаманов**

**АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ПАССИВНОГО КОМПЛЕКСНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА  
МНОГОПОЛЮСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ТИПА ЗВЕЗДА**

*Предложены амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый способы измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника, расположенного в многополюсной электрической цепи типа звезда, без нарушения целостности исследуемой многополюсной электрической цепи, на основе алгоритмического метода измерения, путем изменения конфигурации измерительной цепи. Рассмотрен вариант схемной реализации алгоритмического метода измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника, исключающего методическую погрешность измерения.*

Пассивный комплексный двухполюсник, методическая погрешность, амплитудный способ, фазовый способ, амплитудно-фазовый способ

**G.I. Sharonov, R.S. Shamanov**

**THE ALGORITHMIC METHOD OF MEASUREMENT OF PARAMETERS  
OF THE PASSIVE COMPLEX DIPOLE  
OF MULTI-POLE ELECTRICAL CIRCUIT TYPE-STAR**

*There are the amplitude, phase, amplitude-phase methods of improving of the accuracy of measurement of parameters of the passive complex dipole, located in a multi-pole electrical circuit type-star, without violating the integrity of the investigated multi-pole electrical circuit, based on the algorithmic method of measurement, by changing the configuration of the measuring circuit. The variant of the schematic realization of the algorithmic method of measurement of parameters of the passive complex dipole, forming one of the branches of the multi-pole electrical circuit, was reviewed.*

Passive complex dipole, methodic error, amplitude method, phase method, amplitude-phase method

Все сложные многополюсные электрические цепи (МЭЦ) можно привести к трехполюсным цепям двух типов: треугольник и звезда. Представление МЭЦ в виде разомкнутой структуры с недоступной средней точкой типа звезда, содержащей пассивные комплексные двухполюсники (ПКД), применяется в радиоэлектронике, электросвязи, электрохимии, медицине биологии и при получении информации от параметрических датчиков. МЭЦ, по сравнению с двухполюсной, более точно отражает модель объекта исследования, т.к. учитывает большее число факторов, влияющих на результат измерения.

Параметры МЭЦ типа звезда определяются одним из следующих способов:

а) на основе прямых измерений - путем сравнения значений параметров двухполюсников измеряемой МЭЦ с соответствующими значениями параметров образцовых двухполюсников образцовой МЭЦ, в момент равновесия;

б) на основе совокупных измерений - путем измерения входных сопротивлений МЭЦ между двумя полюсами при различных режимах остальных полюсов и последующего решения уравнений;

в) на основе косвенных измерений - путем измерения токов и напряжений на зажимах МЭЦ и последующих расчетов.

Для определения параметров (модуля, активной и реактивной составляющих сопротивления) отдельно взятого ПКД, расположенного в МЭЦ типа звезда, традиционно применяют метод расчленения данной МЭЦ, без ее физического разрыва, путем создания определенного электрического режима в исследуемой ветви МЭЦ, при котором разность потенциалов на ее полюсах или ток в ней определяются только параметрами этой ветви [1, 2]. Далее согласно математической модели измерительной цепи (ИЦ) записывается система уравнений, каждое из которых содержит одно неизвестное. Решая ее методом исключений, получают значение параметров исследуемой ветви.

При измерении параметров ПКД, образующего одну из ветвей рассматриваемой многополюсной цепи, основная проблема заключается в устранении влияния на результат измерения ПКД расположенных в других ветвях МЭЦ, ненулевого значения входного комплексного сопротивления преобразователя тока и конечного значения внутреннего комплексного сопротивления источника напряжения.

Рассмотрим возможность измерения параметров ПКД, расположенного в МЭЦ типа звезда, на базе косвенных и совокупных измерений. В качестве примера рассмотрим измерение модуля и составляющих исследуемого комплексного сопротивления двухэлементного двухполюсника однородного и неоднородного по характеру сопротивления образцовому двухполюснику (рис. 1).

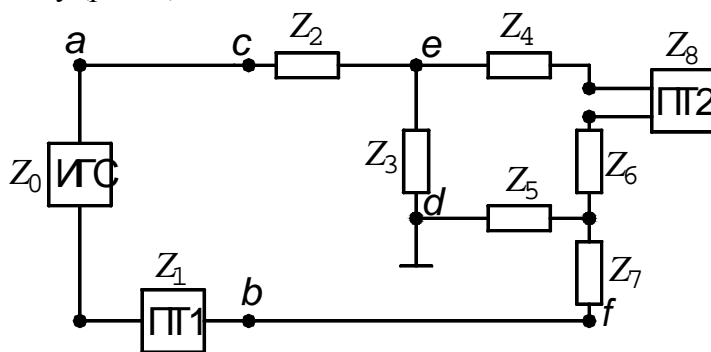


Рис. 1. Цепь измерения составляющих исследуемого комплексного сопротивления двухэлементного двухполюсника  $Z_3$ , однородного и неоднородного по характеру сопротивления образцовому двухполюснику  $Z_5$ , расположенного в многополюсной электрической цепи типа звезда  $Z_2, Z_3, Z_4$

На рис. 1 обозначены: источник гармонического сигнала (ИГС) с внутренним комплексным сопротивлением  $Z_0$ , преобразователи тока ПТ1 с входным комплексным сопротивлением  $Z_1$  и ПТ2 с входным комплексным сопротивлением  $Z_8$ , пассивный комплексный двухполюсник ПКД  $Z_2$ , эквивалентный комплексному сопротивлению первого плеча исследуемой МЭЦ, исследуемый ПКД  $Z_3 = \beta - j\gamma$  ( $\beta, \gamma$  - величины составляющих исследуемого ПКД, соответственно однородная и неоднородная по характеру сопротивления образцовому двухполюснику) МЭЦ; ПКД  $Z_4$ , эквивалентный комплексному сопротивлению третьего плеча исследуемой МЭЦ; образцовый двухполюсник  $Z_5 = \alpha$ ; ПКД  $Z_6$ , эквивалентный комплексному сопротивлению подводящих проводов МЭЦ, ПКД  $Z_7$ , эквивалентный комплексному сопротивлению подводящих проводов МЭЦ.

Проведем исследование измерительной цепи на базе матричного метода, который основан на применении алгебры матриц и некоторых положений топологической теории графов [3].

Составим ненаправленный граф для ИЦ, изображенных на рис. 1, и алгебраическое дополнение пути передачи через ПТ1 (рис. 2), которые имеют вид:

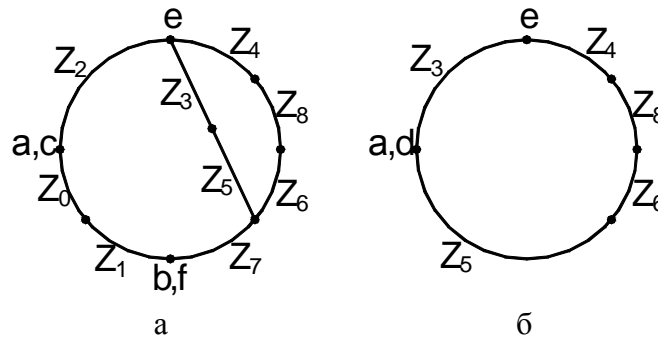


Рис. 2. а) Ненаправленный граф измерительной цепи, б) алгебраическое дополнение пути передачи через ПТ1

Известно, что система контурных уравнений в матричной форме записывается в виде:

$$[Z][\dot{I}] = [\dot{E}]. \quad (1)$$

Матрица сопротивлений (согласно рис. 2а):

$$[Z]_{\text{л}} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 & -Z_3 - Z_5 \\ -Z_3 - Z_5 & Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Многомерные векторы контурных токов и напряжений соответственно:

$$[\dot{I}]_{\text{л}} = [I_{11} \quad I_{21}], \quad [\dot{E}]_{\text{л}} = [E_0 \quad 0], \quad (3)$$

где  $I_{11}$  и  $I_{21}$  – токи соответственно через первый и второй измерительный прибор;  
 $E_0$  – ЭДС источника напряжения.

Найдем вектор контурных токов  $[\dot{I}]_{\text{л}}$ , решив матричное уравнение  $[\dot{I}] = [Z]^{-1} [\dot{E}]$ , где обратная матрица сопротивлений имеет вид:

$$[Z]_{\text{л}}^{-1} = \frac{1}{\Delta_1} \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta_1} \begin{bmatrix} Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8 & Z_3 + Z_5 \\ Z_3 + Z_5 & Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Элементами обратной матрицы  $[Z]_{\text{л}}^{-1}$  являются алгебраические дополнения  $\Delta_{ij}$ , делённые на определитель  $\Delta_1 = \det[Z]_{\text{л}}$ .

С учётом  $[Z]_{\text{л}}^{-1}$ , составляющие вектора контурных токов:

$$\dot{I}_{11} = \dot{E}_0 n_1 \frac{Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8}{\Delta_1}, \quad \dot{I}_{21} = \dot{E}_0 n_2 \frac{Z_3 + Z_5}{\Delta_1}, \quad (5)$$

где  $I_{11}$  и  $I_{21}$  – численные значения токов на выходах ПТ1 и ПТ2;  
 $n_1$  и  $n_2$  – значения коэффициентов передачи ПТ1 и ПТ2.

Результат измерения запишем в виде:

$$\frac{I_{11}}{I_{21}} = \frac{n_1(Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8)}{n_2(Z_3 + Z_5)}, \quad (6)$$

Очевидно, рассмотренному варианту измерения присуща методическая погрешность:

$$\delta = 1 - \frac{I_{21}n_1(Z_4 + Z_6 + Z_8) + Z_5(I_{21}n_1 - I_{11}n_2)}{Z_3(I_{11}n_2 - I_{21}n_1)}, \quad (7)$$

обусловленная ненулевым значением входного комплексного сопротивления  $Z_8$  ПТ2, сопротивлением третьего плеча  $Z_4$  исследуемой МЭЦ, неравенством коэффициентов  $n_1$  и  $n_2$  передачи ПТ1 и ПТ2, и ненулевым сопротивлением  $Z_6$ , эквивалентным сопротивлению подводящих проводов.

При восстановлении измерительной цепи из ненаправленного графа алгебраического дополнения пути передачи через ПТ1 (рис. 2б) возможны два дополнительных варианта измерительных цепей, ненаправленные графы которых изображены на рис. 3а, б.

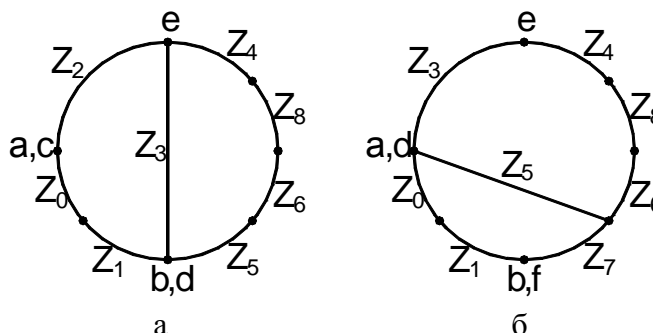


Рис. 3. Ненаправленные графы измерительных цепей, восстановленных из ненаправленного графа алгебраического дополнения пути передачи через ПТ1

Определители полученных измерительных цепей не совпадают между собой и не совпадают с определителем исходной измерительной цепи, а алгебраическое дополнение пути передачи через ПТ1 одно и то же.

Матрица сопротивлений вновь синтезированной измерительной цепи, согласно ненаправленному графу (рис. 3а), имеет вид:

$$[Z]_2 = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 & -Z_3 \\ -Z_3 & Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Обратная матрица сопротивлений, имеет вид:

$$[Z]_2^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8 & Z_3 \\ Z_3 & Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

С учётом  $[Z]_2^{-1}$ , составляющие вектора контурных токов

$$\dot{I}_{12} = \dot{E}_0 n_1 \frac{Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8}{\Delta_2}, \quad \dot{I}_{22} = \dot{E}_0 n_2 \frac{Z_3}{\Delta_2}. \quad (10)$$

где  $I_{12}$  и  $I_{22}$  – численные значения токов на выходах ПТ1 и ПТ2.

Результат измерения запишем в виде:

$$\frac{I_{12}}{I_{22}} = \frac{n_1(Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8)}{n_2 Z_3}. \quad (11)$$

Очевидно, рассмотренному варианту измерения присуща методическая погрешность

$$\delta = 1 - \frac{I_{22}n_1(Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8)}{Z_3(n_2I_{12} - n_1I_{22})}, \quad (12)$$

обусловленная ненулевым значением входного комплексного сопротивления  $Z_8$  ПТ2, сопротивлением третьего плеча  $Z_4$  исследуемой МЭЦ, неравенством коэффициентов  $n_1$  и  $n_2$  передачи ПТ1 и ПТ2 и ненулевым сопротивлением  $Z_6$ , эквивалентным сопротивлению подводящих проводов.

Матрица сопротивлений второй из вновь синтезированных измерительных цепей, согласно ненаправленному графу (рис. 3б), имеет вид:

$$[Z]_3 = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 + Z_1 + Z_5 + Z_7 & -Z_5 \\ -Z_5 & Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Обратная матрица сопротивлений имеет вид:

$$[Z]_3^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8 & Z_5 \\ Z_5 & Z_0 + Z_1 + Z_5 + Z_7 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

С учётом  $[Z]_3^{-1}$  составляющие вектора контурных токов:

$$\dot{I}_{13} = \dot{E}_0 n_1 \frac{Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8}{\Delta_3}, \quad \dot{I}_{23} = \dot{E}_0 n_2 \frac{Z_5}{\Delta_3}, \quad (15)$$

где  $I_{13}$  и  $I_{23}$  – численные значения токов на выходах ПТ1 и ПТ2;

Результат измерения запишем в виде:

$$\frac{I_{13}}{I_{23}} = \frac{n_1(Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8)}{n_2Z_5}, \quad (16)$$

Очевидно, рассмотренному варианту измерения присуща методическая погрешность

$$\delta = 1 - \frac{n_2Z_5I_{13} - I_{23}n_1(Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8)}{I_{23}n_1Z_3}, \quad (17)$$

обусловленная ненулевым значением входного комплексного сопротивления  $Z_8$  ПТ2, сопротивлением третьего плеча  $Z_4$  исследуемой МЭЦ, неравенством коэффициентов  $n_1$  и  $n_2$  передачи ПТ1 и ПТ2 и ненулевым сопротивлением  $Z_6$ , эквивалентным сопротивлению подводящих проводов.

Рассмотрим возможность алгоритмического метода исключения методической погрешности измерения параметров ПКД, расположенного в МЭЦ типа звезда.

Амплитудный способ измерения параметров пассивного комплексного нерезонансного двухэлементного двухполюсника, расположенного в трехполюсной электрической цепи типа звезда, реализуется алгоритмическим методом на основе трех тактов изменения конфигурации ИЦ [4].

Используя значения модулей токов  $\dot{I}_{ij}$  в выражениях (6), (11), (16) получим:

$$\frac{\dot{I}_{13}\dot{I}_{22}}{\dot{I}_{12}\dot{I}_{23}} = \frac{Z_3}{Z_5} = \frac{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}}{\alpha} \quad (18)$$

$$\frac{\dot{I}_{11}\dot{I}_{22}}{\dot{I}_{12}\dot{I}_{21}} = \frac{Z_3 + Z_5}{Z_5} = \frac{\sqrt{(\beta + \alpha)^2 + \gamma^2}}{\alpha} \quad (19)$$

Возведем в квадрат левые и правые части уравнений (18) и (19):

$$\frac{I_{13}^2 \cdot I_{22}^2}{I_{12}^2 \cdot I_{23}^2} = \frac{\beta^2 + \gamma^2}{\alpha^2}; \quad (20)$$

$$\frac{I_{11}^2 \cdot I_{22}^2}{I_{12}^2 \cdot I_{21}^2} = \frac{\beta^2 + 2\alpha\beta + \alpha^2 + \gamma^2}{\alpha^2}. \quad (21)$$

Вычтем из уравнения (21) уравнение (20). Получим отсчет по составляющей исследуемого ПКД  $Z_3$  однородной по характеру проводимости образцовому ПКД  $Z_5$ :

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{I_{13}^2 I_{12}^2 I_{21}^2 - I_{12}^2 I_{11}^2 I_{23}^2 - I_{13}^2 I_{11}^2 I_{22}^2}{2I_{12}^2 I_{11}^2 I_{23}^2}. \quad (22)$$

На основании уравнений (20) и (22) получим отсчет по составляющей исследуемого ПКД  $Z_3$ , неоднородной по характеру проводимости образцовому ПКД  $Z_5$ :

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \sqrt{\frac{I_{13}^2 I_{22}^2}{I_{12}^2 I_{23}^2} - \left( \frac{I_{13}^2 I_{12}^2 I_{21}^2 - I_{12}^2 I_{11}^2 I_{23}^2 - I_{13}^2 I_{11}^2 I_{22}^2}{2I_{12}^2 I_{11}^2 I_{23}^2} \right)^2}. \quad (23)$$

Фазовый способ измерения параметров комплексного нерезонансного двухэлементного двухполюсника, расположенного в трехполюсной электрической цепи типа звезда, реализуется алгоритмическим методом так же на основе трех тактов изменения конфигурации ИЦ [4].

Фазовый сдвиг напряжения  $\dot{I}_{21}$  относительно напряжения  $\dot{I}_{11}$  равен  $\Psi_1$ , фазовый сдвиг напряжения  $\dot{I}_{22}$  относительно напряжения  $\dot{I}_{12}$  равен  $\Psi_2$ , фазовый сдвиг напряжения  $\dot{I}_{23}$  относительно напряжения  $\dot{I}_{13}$  равен  $\Psi_3$ . Выразим эти фазовые сдвиги через параметры исследуемого двухполюсника расположенного в МЭЦ:

$$\Psi_2 - \Psi_3 = \arctg \frac{-\gamma}{\beta}; \quad (24)$$

$$\Psi_1 - \Psi_3 = \arctg \frac{-\gamma}{\beta + \alpha}; \quad (25)$$

$$\Psi_2 - \Psi_1 = \arctg \frac{-\gamma\alpha}{\beta(\beta + \alpha) + \gamma^2} \quad (26)$$

На основании (24), (25) и (26) получим:

$$\cos(\Psi_2 - \Psi_3) = \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}}; \quad (27)$$

$$\sin(\Psi_2 - \Psi_3) = \frac{-\gamma}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}}. \quad (28)$$

$$\sin(\Psi_1 - \Psi_3) = \frac{-\gamma}{\sqrt{(\beta + \alpha)^2 + \gamma^2}}; \quad (29)$$

$$\sin(\Psi_2 - \Psi_1) = \frac{-\gamma\alpha}{\sqrt{(\beta^2 + \alpha^2) \left[ (\beta + \alpha)^2 + \gamma^2 \right]}} \quad (30)$$

Уравнения фазового способа преобразования составляющих исследуемого ПКД на основании (27)-(30):



$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\sin(\Psi_1 - \Psi_3)}{\sin(\Psi_2 - \Psi_1)} \cos(\Psi_2 - \Psi_3) \quad (31)$$

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{\sin(\Psi_1 - \Psi_3)}{\sin(\Psi_2 - \Psi_1)} \sin(\Psi_2 - \Psi_3) \quad (32)$$

Амплитудно – фазовый способ измерения параметров комплексного нерезонансного двухэлементного двухполюсника, расположенного в трехполюсной электрической цепи типа звезда, реализуется алгоритмическим методом на основе двух тактов изменения конфигурации ИЦ.

Используя выражение (24), получим:

$$\cos(\Psi_3 - \Psi_2) = \cos \operatorname{arctg} \frac{\gamma}{\beta} = -\frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}} \quad (33)$$

$$\sin(\Psi_3 - \Psi_2) = \sin \operatorname{arctg} \frac{\gamma}{\beta} = \frac{\gamma}{\sqrt{\beta^2 + \gamma^2}} \quad (34)$$

Уравнения преобразования для составляющих исследуемой комплексной проводимости двухполюсника на основании уравнений (18), (33) и (34) имеют вид:

$$\beta = \alpha \frac{I_{13} \cdot I_{22}}{I_{12} \cdot I_{23}} \cos(\Psi_2 - \Psi_3) \quad (28)$$

$$\gamma = -\alpha \frac{I_{13} \cdot I_{22}}{I_{12} \cdot I_{23}} \sin(\Psi_2 - \Psi_3) \quad (29)$$

При определении составляющих исследуемого комплексного сопротивления двухполюсника амплитудно-фазовым способом достаточно использовать две из приведенных выше измерительных цепей.

Таким образом, устраняется влияние на результат измерения исследуемого ПКД, ПКД расположенных в других ветвях исследуемой МЭЦ, ненулевого значения входного комплексного сопротивления преобразователей тока и конечного значения внутреннего комплексного сопротивления источника напряжения.

Анализ обратных матриц исследуемой и вновь синтезируемых измерительных цепей позволяет сделать вывод, что алгебраическое дополнение  $\Delta_{11}$  должно быть одинаково для исходной и вновь синтезируемых ИЦ, т.е. оно должно содержать любую сумму одних и тех же двухполюсников.

Алгебраические дополнения  $\Delta_{12}$  и  $\Delta_{21}$  должны содержать исследуемый двухполюсник  $Z_3$ , или образцовый двухполюсник  $Z_5$ , или их сумму  $Z_3 + Z_5$ .

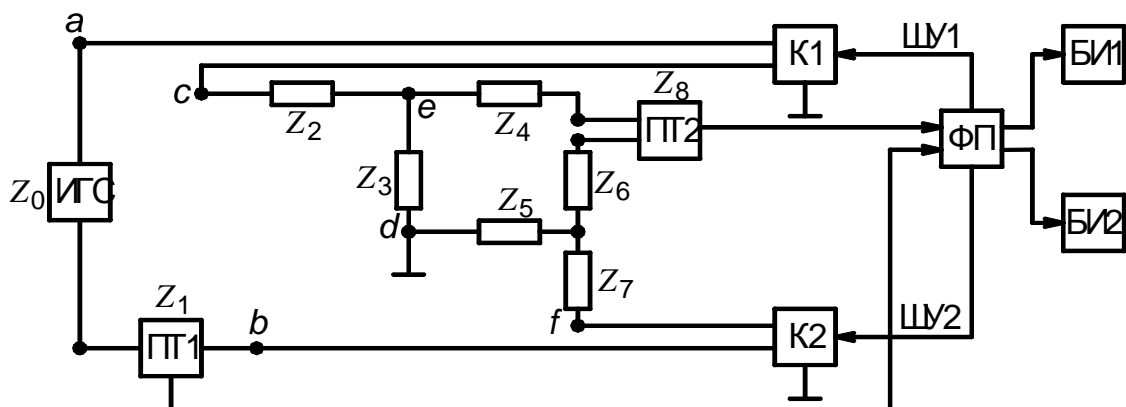


Рис. 4. Автоматическое микропроцессорное устройство измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника, расположенного в многополюсной электрической цепи типа звезда

Рассмотренные выше способы измерения параметров ПКД МЭЦ реализуются устройством, представленным на рис. 4, где дополнительно введены: ключи К1, К2 для изменения конфигурации измерительной цепи, шины управления ШУ1, ШУ2 ключами К1 и К2 соответственно, функциональный преобразователь ФП, блоки индикации БИ1 и БИ2 [5].

Амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый способы реализуются на основе алгоритмов изменения конфигурации ИЦ, что позволяет исключить влияние на результат измерения ПКД, расположенных в других ветвях МЭЦ, ненулевого значения входного комплексного сопротивления преобразователей тока и конечного значения внутреннего комплексного сопротивления источника напряжения. А следовательно, позволяет избавиться от методической погрешности измерения параметров ПКД, расположенного в МЭЦ типа звезда, без ее разрыва.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мартяшин А.И. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 216 с.
2. Мартяшин А.И. Преобразователи параметров многополюсных электрических цепей. М.: Энергоиздат, 1981. 72 с.
3. Фрэнк Харари. Теория графов. Едиториал УРСС. 2003. 296 с.
4. Шаманов Р.С., Шаронов Г.И. Амплитудный и фазовый способы измерения параметров комплексного двухполюсника, расположенного в электрической цепи типа звезда // Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2006. Ч.1. С. 157-161.
5. АС №1211667 СССР: МПК G 01 R 27/02 / Шаронов Г.И Заявка № 3502861/24-21; заявл. 14.10.82; опубл. 15.02.86, Бюл. №6.

**Шаронов Геннадий Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация и безопасность движения» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства

**Sharonov Gennady Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Organization and Traffic Safety”, Penza State University of Architecture and Construction

**Шаманов Роман Сергеевич** – ассистент кафедры «Организация и безопасность движения» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства

**Shamanov Roman Sergeevich** – Assistant of the Department “Organization and traffic safety”, Penza State University of Architecture and Construction

*Статья поступила в редакцию 17.01.2011, принята к печати 13.08.2011.*

УДК. 629.113.004.67

**А.С. Денисов, А.Р. Асоян, Н.В. Орлов**

### **АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ И ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ КОРПУСА ТУРБОКОМПРЕССОРА ДВИГАТЕЛЕЙ КАМАЗ-ЕВРО**

*Проведен анализ деформаций корпуса турбокомпрессора вследствие его теплонапряженного состояния и их влияние на эксплуатационную надежность турбокомпрессора. Для анализа деформаций и теплонапряженности корпуса турбокомпрессора использовалось программное обеспечение APM WinMachine 9.6.*

Турбокомпрессор, теплонапряженность, эксплуатационная надежность, деформация, моделирование

**A.S. Denisov, A.R. Asoyan, N.V. Orlov**

### **ANALYSIS OF DEFORMATION AND THERMAL STRESS SHELL OF TURBOCHARGER OF ENGINES KAMAZ-EURO**

*The analysis of the deformation due to its turbocharger housing heat-states and their influence on the operational reliability of the turbocharger was carried out. For analyze the deformation and thermal stress shell turbocharger used software APM WinMachine 9.6.*

Turbocharge, calorific, serviceability, deformation, simulation

Высокая неравномерность распределения температур в элементах корпуса турбокомпрессора (ТКР) приводит к значительному росту тепловых напряжений и деформаций деталей, наибольшие значения которых наблюдаются в нестационарных условиях работы подсистем ТКР. Это обуславливает повышенное внимание для обеспечения надежности ТКР приемлемого температурного режима его элементов и определяет актуальность исследования причин отказов в рабочих процессах турбокомпрессора. Анализ температуры основных элементов корпуса ТКР, их деформаций в процессе эксплуатации выявил высокие значения температур масла в подшипниковом узле и неравномерность распределения температур элементов его корпуса, вызывающих рост термических напряжений и соответствующих им деформаций.

При работе двигателя выхлопные газы, омывая чугунный корпус турбины, разогревают его. Часть тепла передается через контакт и излучением в корпус подшипника. С учетом температуры и коэффициента линейного расширения материалов расчетами установлено, что максимальный зазор, обеспечивающий работоспособность сопряжения «корпус турбины - корпус подшипников», должен быть не менее 0,206 мм [1]. Деформация корпуса подшипника ограничивается с одной стороны чугунным корпусом турбинного колеса. Таким образом, корпус подшипника непрерывно находится в сжатом положении при высокой температуре. При постоянном напряжении в условиях высоких температур наблюдается ползучесть материала. Предел ползучести материала зависит от температуры и существенно ниже предела текучести [3], поэтому в нагретой зоне предел ползучести снижается, и напряжения сжатия сравниваются или превышают предел ползучести.

Вследствие этого в наиболее нагретой части корпуса подшипника происходят пластические деформации. При этом напряжения сжатия в более холодных участках не достигают предела ползучести. Поэтому происходит их деформация в направлении разогретой, более пластичной зоны. Все это происходит внутри корпуса подшипника, охваченного чугуном корпусом турбины.

Для моделирования деформирования корпуса турбокомпрессора проведено исследование его теплонапряженности с помощью программы APM Win Machine 9.7. Основными исходными данными для расчета деформаций корпуса являются температурные поля, полученные в ходе экспериментальных исследований [1].

Для решения поставленной задачи используем твердотельное моделирование с автоматическим построением конечно-элементной сетки (рис. 1). Модель состоит из 151690 квадратичных тетраэдральных элементов и содержит 29768 узлов.

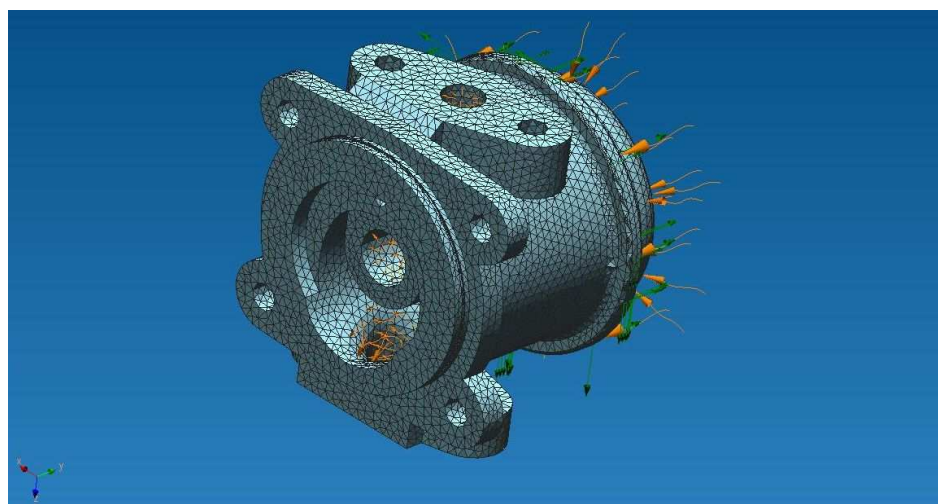


Рис. 1. Трехмерная конечно-элементная модель корпуса турбокомпрессора ТКР7С-6

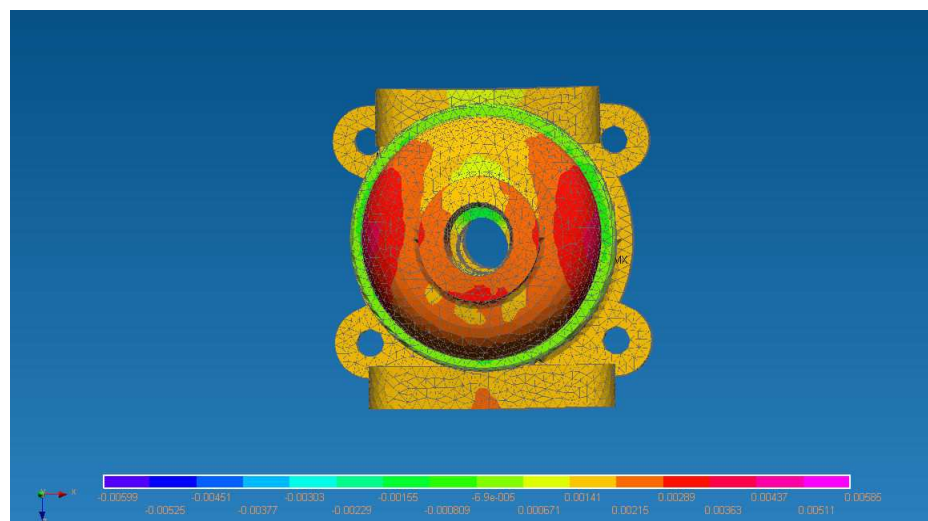


Рис. 2. Распределение деформаций в корпусе подшипников турбокомпрессора

Анализ теплонапряженного состояния корпуса турбокомпрессора подтверждает результаты исследований деформации деталей агрегата, рассеивание размеров и форм отверстий под посадочные поверхности подшипников вследствие действия высоких температур в процессе эксплуатации [2].

Поля тепловых напряжений в корпусе турбокомпрессора отличаются значительной неравномерностью распределения, вследствие этого наибольшие деформации (рис. 2)

находятся в месте соприкосновения корпуса турбокомпрессора с турбинной улиткой, омываемой выхлопными газами.

Описанный процесс деформирования носит вероятностный характер. Для его аналитического описания следует принять некоторые допущения.

Первое допущение - о прямой пропорциональности остаточной деформации  $\delta$  вероятности превышения предела ползучести  $P(\sigma_{п})$  в виде:

$$\delta = \delta_{0+} + b \cdot P(\sigma_{п}), \quad (1)$$

где  $b$  - коэффициент пропорциональности;

$\delta_{0+}$  - остаточная деформация от других факторов при  $P(\sigma_{п})=0$ .

Второе допущение - о прямой пропорциональности предела ползучести  $\sigma_{п}$  и температуры  $T$  в виде:

$$\sigma_{п} = \sigma_{п0} - b' T, \quad (2)$$

где  $\sigma_{п0}$  - предел ползучести при  $T=0$ ;

$b'$  - коэффициент пропорциональности.

Эти допущения обусловлены незначительными интервалами изменения  $T$  и  $\sigma_{п}$ . С учетом этих допущений проанализируем влияние  $T$  на  $P(\sigma_{п})$ , что поясняется рис. 3.

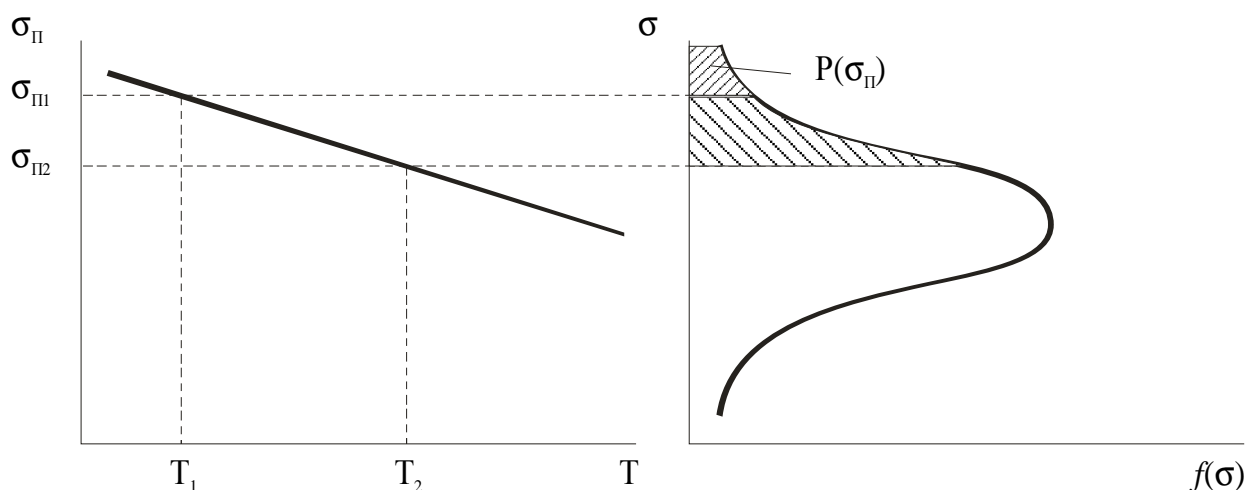


Рис. 3. Влияние температуры  $T$  на вероятность превышения предела ползучести  $P(\sigma_{п})$

Третье допущение – о нормальном законе распределения напряжений сжатия в модели. Определим вероятность  $P(\sigma_{п})$  при температуре  $T_1$

$$P_1(\sigma_{п}) = \int_{\sigma_{п0}}^{\sigma_{п1}} f(\sigma) d\sigma = \int_{\sigma_{п0}}^{\sigma_{п1}} \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\sigma-\bar{\sigma})^2}{2S^2}} d\sigma = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{\sigma_{п0}}^{\sigma_{п1}} e^{-\frac{(\sigma-\bar{\sigma})^2}{2S^2}} d\sigma, \quad (3)$$

где  $S$  - среднеквадратическое отклонение напряжений сжатия;

$\sigma_{п1}$  - предел ползучести при температуре  $T_1$ .

При температуре  $T_2$  вероятность  $P_1(\sigma_{п})$  составит:

$$P_2(\sigma_{п2}) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_{\sigma_{п0}}^{\sigma_{п2}} e^{-\frac{(\sigma-\bar{\sigma})^2}{2S^2}} d\sigma, \quad (4)$$

где  $\sigma_{п2}$ -предел ползучести при температуре  $T_2$  (заштрихованная площадь на рис. 3 увеличивается).

В этих условиях влияние температуры  $T$  на остаточную деформацию  $\sigma$  носит характер кумулятивной кривой (S-образной). Однако вследствие незначительных интервалов изменения температуры допустима линейная зависимость в виде:

$$\delta = \delta_0 + b''T, \quad (5)$$

где  $b''$ - коэффициент пропорциональности.

Эта деформация повышает вероятность изменения соосности подшипников вала ротора турбокомпрессора, касания крыльчаток о корпус улиток, появления дисбаланса вала ротора, подтекания масла и заклинивания ротора.

Для снижения теплонапряженности и деформаций в элементах корпуса ТКР, а также температуры его подшипникового узла при остановке дизеля, на кафедре «Автомобили и автомобильное хозяйство» Саратовского государственного технического университета предложено два способа функционального тюнинга системы смазки ТКР [4, 5].

Один способ заключается в использовании гидроаккумулятора в системе смазки, позволяющего снизить температуру в районе подшипникового узла до 15-ти градусов в зависимости от режима, на котором работал двигатель перед остановкой.

Другой способ предусматривает установку автономной системы смазки, позволяющей смазывать трущиеся поверхности ТКР перед запуском двигателя, во время работы и при остановке силового агрегата. Кроме того, данный метод позволяет использовать синтетические масла, которые не склонны к коксованию и работают в более высоком диапазоне температур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов А.С., Сычев А.М., Малаховецкий А.Ф. Исследование теплового состояния турбокомпрессора ТКР7Н-1 двигателя внутреннего сгорания // Проблемы теории, конструкции, проектирования и эксплуатации ракет, ракетных двигателей и наземно-механического оборудования к ним. Труды постоянно действующего науч. техн. семинара. Вып.35.Саратов, Военно-артиллерийский ун-т (филиал в г. Саратове). 2003. С. 102-104.
2. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин. 2-е изд. переб. и доп. М.: изд. МЭИ, 2000. 480 с.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1968. 241 с.
4. Патент на полезную модель № 69159 Российская Федерация, МПК F01M 1/08. Система смазки турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания / Денисов А. С., Коркин А. А.; заявитель и патентообладатель Денисов А. С. № 2007130636/22. 2007. 4 с.
5. Патент на полезную модель № 93462 Российская Федерация, МПК F01M 1/08. Система смазки турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания / Денисов А.С., Асоян А.Р., Синягин А.С.; заявитель Денисов А.С., патентообладатель СГТУ. № 2009146742. 2009. 4 с.

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Автомобили и  
автомобильное хозяйство» Саратовского  
государственного технического университета

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head  
of the Department “Automobiles and automobile  
industry”, Saratov State Technical University

**Асоян Артур Рафикович** –  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Автомобили и автомобильное хозяйство»  
Саратовского государственного технического  
университета

**Asoyan Artur Rafikovich** –  
Candidate of Technical Sciences, Senior  
Lecturer of the Department “Automobiles and  
automobile industry”, Saratov State Technical  
University

**Орлов Никита Васильевич** –  
аспирант кафедры «Автомобили и  
автомобильное хозяйство» Саратовского  
государственного технического университета

**Orlov Nikita Vasilievich** –  
Post-graduate Student of the Department  
“Automobiles and automobile industry”, Saratov  
State Technical University

*Статья поступила в редакцию 10.02.2011, принята к опубликованию 01.07.2011*

УДК 519.2

**А.И. Безруков, М.А. Жилина, А.М. Кац**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ СТАНДАРТИЗАЦИИ**

В статье рассматриваются особенности построения классификации объектов стандартизации и статистические методы оценки её качества. Для выбора адекватных методов оценки качества проведен обзор существующих методов классифицирования и дан сравнительный анализ их применимости для решения поставленной задачи.

Критерии качества классификации, объекты стандартизации, экспертиза

**A.I. Bezrukov, M.A. Zhilina, A.M. Katz**

## **USE OF MATHEMATICAL METHODS FOR A QUALITY RATING OF STANDARDIZATION'S OBJECTS CLASSIFICATION**

*The article devoted the problems of quality's measure of classification the standardization's objects. The set of statistical classification's methods was considered. For each method made the comparative analysis applicability for the decision of given task.*

Criteria of quality of classification, Objects of standardization, Examination

Любая экспертная система базируется на классификации объектов предметной области. Качество системы и эффективность её использования во многом зависит от качества применяемой классификации. Разработкой и ведением классификации занимаются высококвалифицированные специалисты. Например, для сертификации однородной группы продукции необходима иерархическая классификация объектов стандартизации [1], удовлетворяющая следующим требованиям: единство понимания, универсальность и возможность логического вывода [2]. Кроме того, такая классификация должна содержать все объекты, упомянутые во всех нормативных документах на данную группу продукции. В процессе разработки классификации экспертам зачастую приходится решать нетривиальные информационные задачи, поэтому хорошим подспорьем в их работе будут являться специальные математические методы, позволяющие построить варианты классификации и оценить их качество.

Чтобы формализовать требования к этим инструментариям, рассмотрим существующие математические методы построения классификации и критерии качества, используемые в каждом из этих методов.

С математической точки зрения классификация - это отображение множества объектов  $\Omega$  в пространство меток классов  $Y(1)$ :

$$F : \Omega \rightarrow Y \quad (1)$$

Объекты множества  $\Omega$  могут быть описаны набором количественных или качественных характеристик, а также иметь смешанную природу. Пространство меток может иметь дискретную одноуровневую (в частном случае дихотомию), иерархическую (строгую



иерархию или лесной порядок<sup>1)</sup> структуру или быть непрерывной. Отображение может быть однозначным, когда каждому подмножеству соответствует одна и только одна метка, или неоднозначным.

Особенностями классификации объектов стандартизации являются:

1. однозначность отображения;
2. иерархическая структура множества меток;
3. наследование требований;
4. смешанный характер описания объектов.

Кроме того, при создании классификации объектов стандартизации необходимо учитывать требования, определяющие предсказательную способность и удобство использования классификации:

а) объекты внутри одной групп должны быть более схожи, чем объекты из разных групп;

б) при прочих равных условиях распределение объектов по группам должно быть равномерным;

в) при классификации конкретных видов продукции количество шагов, необходимое для однозначной классификации, должно быть небольшим.

В случае одноуровневой классификации для оценки её прогностической способности предлагается разделить исходное множество объектов на обучающую и тестовую выборки [3]. На основании обучающей выборки строится формальная классификация, качество которой определяется на тестовой выборке. В роли характеристик качества классификации для каждой группы используются нормированные уровни ошибок первого (ложный пропуск) и второго рода (ложное обнаружение) (2):

$$\begin{aligned} nFN &= \frac{FN}{N_p} * 100\%; & nFP &= \frac{FP}{N_n} * 100\%, \\ nTN &= \frac{TN}{N_n} * 100\%; & nTP &= \frac{TP}{N_p} * 100\%, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N$  – количество объектов в тестовом наборе,

$N_p$  – количество «положительных» объектов, которые должны быть отнесены к первому классу,

$N_n$  – количество «отрицательных» объектов, которые не должны быть отнесены к этому классу,

$FN$  – количество ложных пропусков («положительные» объекты, не отнесенные к первому классу),

$FP$  – количество ложных обнаружений («отрицательные» объекты, отнесенные к первому классу).

$TP=N_p-FN$  и  $TN=N_n-FP$  – количество верных пропусков и верных обнаружений.

Качество всей классификации можно оценить как обобщенную оценку рисков первого и второго рода.

Формулы (2) не зависят в явном виде от количества объектов в тестовом наборе, поэтому они могут быть удобными оценками качества классификации для одноуровневых задач. Если правила классифицирования  $F$  зависят от некоторого параметра  $x$ , можно построить характеристическую кривую (ROC), позволяющую оценить наилучшее значение параметра [3].

Долю объектов, которую следует использовать в обучающей выборке, можно оценить из следующих соображений. Если имеется  $N$  объектов, то вероятность выбора одного из них

<sup>1</sup> В отличие от строгой иерархии лесной порядок допускает несколько основных вершин.

$P_{\text{выб}}=1/N$ , а  $P_{\text{невыб}}=1-1/N$ . Вероятность, что объект не будет выбран  $N$  раз, вычисляется по формуле (3).

$$P_{\text{не выбран } N \text{ раз}} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^N,$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{N}\right)^N = e^{-1} \approx 0.368. \quad (3)$$

Таким образом, при росте  $N$  вероятность использования каждого из векторов данных (хотя бы в одной из итераций) стремится к 63.2%.

Рассматриваемые ниже методы дисперсионного и кластерного анализа используются в большинстве случаев в описательной стадии исследования, когда исследователь еще не имеет каких-либо априорных гипотез относительно классов [4].

В случае создания линейного классификатора<sup>2</sup> с дискретным пространством меток классов  $Y$ , для сокращения размерности пространства и снижения влияния корреляции между признаками перед последующей классификацией часто используется линейный дискриминантный анализ (ЛДА), а так же связанный с ним линейный дискриминант Фишера [5].

Если же пространство меток классов непрерывно – применяется дисперсионный и регрессионный анализ.

Дискриминантный анализ позволяет осуществить переход из  $n$ -мерного пространства дискриминантных переменных в  $q$ -мерное пространство канонических дискриминантных функций, обеспечивающих максимальное отличие классов в этом пространстве [6, 7, 8]. Качество классификации определяется степенью различий между объектами, степенью разброса внутри классов и мерой различия между классами. Например, критерием качества классификации может быть доля остаточной дисперсии [9].

В [10] предлагается оценивать качество классификации по следующим характеристикам: однородности классифицируемых объектов внутри групп и устойчивости классификации. Опираясь на аппарат, разработанный в [11], авторы предлагают строить показатель качества для многомерных классификаций как суммарную частоту встречаемости однородных кластеров по каждому из информативных показателей.

Кластерный анализ предполагает наличие меры близости между классифицируемыми объектами. Если такая мера определена на множестве объектов, описываемых качественными характеристиками или смешанным набором характеристик, кластерный анализ применим и к ней.

Применение кластерного анализа позволяет выделить группы в заданной (обучающей) совокупности элементов путем итерационного слияния наиболее близких кластеров, то есть группировать данные вокруг нескольких центров в пространстве признаков [6, 7, 8]. При этом применяются следующие группы методов:

- алгоритмы таксономии – кластер определяется, как совокупность элементов, лежащих на расстоянии не больше  $r$  от центра (внутри гиперсферы радиуса  $r$  или гиперкуба со сторонами  $2r$ ). При этом в качестве центра выбирается один из элементов и формируется кластер из элементов, удаленных от него не далее чем на  $r$ . К проблемам таксономических разбиений относится неустойчивость классификации элементов, находящихся на периферии гиперкубов (в случае разбиения на гиперкубы) или неполного покрытия множества объектов в случае разбиения на гиперсферы.
- методы, основывающиеся на последовательной агломеративной процедуре.

<sup>2</sup> Для линейного классификатора  $F$  является линейной функцией параметров объекта.

Все эти методы дают оптимальное решение в классе меньшем, чем класс всех возможных разбиений (кластеров), однако достоинством этих методов является простота вычислительной процедуры и алгоритмов.

Для случая одноуровневой классификации используется метод  $K$  средних. Он позволяет строить ровно  $K$  различных кластеров, расположенных на возможно больших расстояниях друг от друга. С вычислительной точки зрения этот метод рассматривается как дисперсионный анализ «наоборот», в том смысле, что критерий значимости в дисперсионном анализе сравнивает межгрупповую изменчивость с внутригрупповой при проверке гипотезы о том, что средние в группах отличаются друг от друга [4]. В кластеризации методом  $K$  средних можно перемещать объекты из одних групп (кластеров) в другие для того, чтобы получить наиболее значимый результат при проведении дисперсионного анализа.

В [12-15] развита теория алгоритмов иерархической или древовидной кластеризации (иногда называемая «метод объединения»). На основании меры сходства между объектами последовательно применяется цикл из трех операций:

- 1) находятся пары наиболее близких объектов  $A$  и  $B$ ;
- 2) объекты  $A$  и  $B$  объединяются в один кластер с присвоением ему нового имени  $C$  и определением для  $C$  набора свойств, позволяющих вычислить меру близости с другими объектами;
- 3) вычисляются расстояния от нового кластера до каждого другого объекта или кластера.

Ключевой проблемой для данного алгоритма является определение набора свойства нового кластера. В случае количественных признаков классическим приемом является вычисление нового свойства как линейной комбинации аналогичных свойств объектов, вошедших в кластер. При этом весовые коэффициенты определяются из характера задач.

Определение расстояния между кластерами обычно происходит по следующим правилам объединения или связи [4]:

- Одиночная связь или метод ближайшего соседа - определяется расстоянием между двумя наиболее близкими объектами (ближайшими соседями) в различных кластерах. Результирующие кластеры представлены в виде длинных «цепочек».
- Полная связь или метод наиболее удаленных соседей - определяется наибольшее расстояние между любыми двумя объектами в различных кластерах. Метод непригоден, если кластеры имеют в некотором роде удлиненную форму или их естественный тип является «цепочечным».
- Невзвешенное попарное среднее - вычисляется среднее расстояние между всеми парами объектов в кластерах. Метод эффективен независимо от «формы» формирующихся кластеров.
- Взвешенное попарное среднее - используется, когда предполагаются неравные размеры кластеров. При вычислениях размер соответствующих кластеров (т.е. число объектов, содержащихся в них) используется в качестве весового коэффициента.
- Невзвешенный центроидный метод - определяется расстояние между центрами тяжести кластеров.
- Взвешенный центроидный метод или медиана - предпочтителен, если имеются (или подозреваются) значительные отличия в размерах кластеров. При вычислениях используются веса для учёта разницы между размерами кластеров (т.е. числами объектов в них).
- Метод Варда - используются методы дисперсионного анализа: минимизируется сумма квадратов для любых двух (гипотетических) кластеров, которые могут быть сформированы на каждом шаге. К недостаткам метода можно отнести стремление создавать кластеры малого размера.

В случае, когда ожидается, что и наблюдения, и переменные одновременно вносят вклад в обнаружение осмысленных кластеров, используется (относительно редко) «двухходовое объединение» [16].

Еще одним преимуществом иерархической кластеризации является возможность построения многоуровневой классификации. Таким образом, построение классификации снизу вверх дает возможность осмыслить получившийся результат и построить иерархическую классификацию, позволяющую предсказать свойства младших классов по свойствам старших.

Для оценки устойчивости авторы [10] предлагают последовательно использовать иерархическую кластеризацию и метод  $K$  средних. С помощью первого метода устанавливается число кластеров и отнесение статистических объектов к кластерам, т.е. получают кластерное решение, которое затем подлежит верификации с помощью итеративного кластерного анализа по методу  $K$  средних, где число кластеров  $K$  принимается по результатам иерархического кластерного анализа. Таким образом, показателем устойчивости кластерного решения, а следовательно, и качества классификации, будет доля (частота) совпадений отнесения статистических объектов к кластерам по обоим методам.

Одним из старейших в теории классификации является статистический байесовский подход, который лежит в основе многих методов классификации с обучением [17]. При условии, что плотности распределения каждого из классов известны, удаётся в явном виде выписать алгоритм классификации с минимальной вероятностью ошибок отнесения к классам. На практике плотности классов приходится оценивать (восстанавливать) по обучающей выборке, при этом байесовский алгоритм перестаёт быть оптимальным.

В случае оптимизации иерархической структуры классификации эффективным методом является дерево принятия решений. Это дерево, исходной вершине которого соответствует исследуемая ситуация, а листьям – принятые решения. Остальные вершины содержат вопросы, ответы на которые определяют направление спуска по дереву. Каждое ребро, выходящее из этой вершины, помечается выбранным ответом. Задача классификации в данном случае сводится к формированию оптимального дерева принятия решений. В роли критерия качества в [18] используется энтропия:

$$H(A, S) = - \sum_{i=1}^s \frac{m_i}{n} \log \frac{m_i}{n} \quad (4)$$

где  $n$  – число элементов в множестве  $A$ ;

$m_i$  – число элементов, на которых признак  $S$  принимает значение  $s_i$ .

Чем быстрее уменьшается исходная энтропия при спуске по дереву, тем оно лучше. Этот критерий позволяет выбрать оптимальную последовательность вершин (вопросов).

При построении иерархической классификации объектов стандартизации у эксперта, как правило, возникает несколько вариантов её организации. От выбора варианта зависит удобство применения классификации. В соответствии с описанным методом, для каждого класса (объекта стандартизации  $A$ , описываемого набором признаков  $S$ ) формулируются вопросы и списки возможных ответов, по которым происходит отнесение продукции к данным объектам стандартизации.

Выводы: рассмотренные методы классификации систематизированы в табл. 1. Курсивом выделены основания классификации, обычным шрифтом – примеры методов классификации.

Интуитивно качество классификации объектов стандартизации определяется наименьшим количеством вопросов, которые требуется задать, и наибольшей значимостью каждого из них.

Классификация методов классификаций

Структура пространства меток		Тип характеристик		
		Количественные	Качественные	Смешанные
Одноуровневые	непрерывные	Многомерная регрессия	-	-
	дискретные	Факторный анализ		-
Многоуровневые	иерархические	Дерево принятия решений		
	«лес»			

На наш взгляд, наиболее удобным для оценки качества классификации объектов стандартизации является метод дерева принятия решений. Метод применим к описаниям объектов стандартизации любого вида (количественным, качественным или смешанным), базируется на иерархической структуре, обеспечивает наследование требований и однозначность классифицирования. Заложенный в него принцип максимального изменения энтропии при спуске по дереву позволяет обеспечить наибольшую информативность вопросов, задаваемых при переходе на следующий уровень в процессе классификации конкретных видов продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жилина М.А., Безруков А.И. Информационная модель системы требований к безопасности и качеству косметической продукции // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: сб. тр. XXI Междунар. науч. конф. СГТУ. Саратов, 2008. Т. 2. С. 297-299.
2. Жилина М.А. Разработка информационной модели системы требований к продукции на базе действующей документации и нового технического регламента // Компьютерные науки и информационные технологии: материалы Междунар. науч. конф. Саратов, 1-4 июля 2009 г. СГУ. Саратов, 2009. С. 97-99.
3. Вежнев В. Оценка качества работы классификаторов. Режим доступа: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/106> . Печатный аналог: Компьютерная графика и мультимедиа. 2006. №4(1).
4. Дисперсионный и кластерный анализ. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stcluan.html>
5. Fisher R.A. The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems // Annals of Eugenics. 1936. Т. 7. С. 179-188.
6. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. / Д.О. Ким и др. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
7. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. С. 128.
8. Елисеева И.И., Рукавишников В.О. Группировка, корреляция, распознавание образов. М.: Статистика, 1977. 144 с.
9. Безруков А.И., Жилина М.А. Математическая модель оценки качества классификации объектов стандартизации // Компьютерные науки и информационные технологии: материалы Междунар. науч. конф. Саратов, 1-4 июля 2009г. СГУ. Саратов, 2009. С. 37-40.
10. Титов В.А., Марков С.А.. Совершенствование методов классификации регионов по показателям структуры инвестиций в основной капитал (на примере центральной России) // Транспортное дело России. 2008. №2. С. 28-33.
11. Титов В.А., Марков С.А. Методы многомерного анализа в исследовании региональных инвестиционных процессов // Наука и образование: межвуз. сб. науч. тр. ИИЦ МГУДТ. Москва, 2006. Вып. №4 «Общество и экономика». С. 73-76.

12. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В.. Классификация многомерных наблюдений. М.: Статистика, 1974. 240 с.
13. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия. Пер. с франц. Б.Г.Миркина. М.: Финансы и статистика, 1988. 342 с.
14. Классификация и кластер / под ред. Дж. Вэн Райзина; пер. с англ. П.П.Кольцова; под ред. Ю.И.Журавлева. М.: Мир, 1980. 388 с.
15. Репин С.В., Шеин С.А. Математические методы обработки статистической информации с помощью ЭВМ: пособие для исследователей гуманитар. спец. Минск: Университетское, 1990. 128 с.
16. Multiple-factor Analysis (Chicago: University Press). Хартиган (Hartigan J.A.) 1975.
17. Воронцов К.В. Комбинаторный подход к проблеме переобучения // Докл. всеросс. конф. Математические методы распознавания образов-14. М.: МАКС Пресс, 2009. С. 18-21.
18. Murthy, S. Automatic construction of decision trees from data: A Multi-disciplinary survey. 1997.

**Безруков Алексей Иосифович –**

кандидат экономических наук, доцент кафедры «Техническая физика и информационные технологии», Энгельсский технологический институт, филиал Саратовского государственного технического университета

**Bezrukov Alexei Iosifovich –**

Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer of the Department “Technical Physics and Information Technologies”, Engels Technological Institute (Branch) of Saratov State Technical University

**Жилина Маргарита Анатольевна –**

ассистент кафедры «Техническая физика и информационные технологии», Энгельсский технологический институт, филиал Саратовского государственного, технического университета

**Zhilina Margaret Anatol’evna –**

Assistant of the Department “Technical Physics and Information Technologies”, Engels Technological Institute (Branch) of Saratov State Technical University

**Кац Альберт Маркович –**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая физика и информационные технологии», Энгельсский технологический институт, филиал Саратовского государственного технического университета

**Katz Albert Markovich –**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department “Technical Physics and Information Technologies”, Engels Technological Institute (Branch) of Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 01.03.2011, принята к опубликованию 08.08.2011*

**А.И. Сайкин, А.А. Чурикова**

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАЗОМКНУТОЙ  
НЕЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ СЕТИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

*Предлагается метод расчета характеристик неэкспоненциальной сети систем массового обслуживания, который не требует громоздких вычислений и легко распространяется на сетевые модели.*

Характеристики узла сети, моделирование корректирующего потока в источнике, характеристики сети систем массового обслуживания

**A.I. Saikin, A.A. Churikova**

**APPROXIMATE METHOD OF CALCULATING OF CHARACTERISTICS  
OF OPEN NONEXPONENTIAL NETWORK OF QUEUING SYSTEMS**

*We introduce the method of calculating of characteristics of nonexponential network of queuing systems that do not require lengthy calculations, and can easily be extended to the network models.*

Characteristics of network node, modeling of correcting current in source, characteristics of network of queuing systems

Во многих приложениях широко используются в качестве математической модели сети систем массового обслуживания (СМО) с очередью и ожиданием. Если время обслуживания во всех узлах сети распределено по экспоненциальному закону, а входной поток простейший, то для сети справедлива теорема Джексона [1], которая позволяет в этом случае «развалить» такую сеть на отдельные СМО, и тогда характеристики сетевой модели легко рассчитываются известными методами. Если время обслуживания распределено по произвольному закону или входной поток не является простейшим, то теорема Джексона не применима и точных методов расчета характеристик таких сетей СМО пока не найдено. Для общих случаев с произвольно распределенным временем следования заявок во входном потоке (потоки Пальма) и произвольно распределенным временем обслуживания могут

применяться только приближенные методы расчета характеристик: метод псевдосостояний [2], диффузионная аппроксимация [3]. Но использование полумарковских моделей требует аппроксимации неизвестных распределений распределениями Пуассоновского типа. Хотя сама аппроксимация достаточно простая, но число псевдосостояний при такой аппроксимации возрастает настолько, что вычисления становятся очень громоздкими. По этой причине на практике такой подход используется очень редко. В связи с этим на практике для неэкспоненциальной сети все-таки применяют теорему Джексона, предполагая, что во всей сети действуют простейшие потоки заявок, что позволяет применять формулу Поллачека-Хинчина для нахождения характеристик отдельных узлов сети.

В данной работе рассматривается приближенный метод расчета характеристик сети, который отличается от прочих своей простотой и меньшей погрешностью результатов. Идея метода состоит в том, что в однородный поток заявок, поступающих в сеть из источника, вводится дополнительный поток заявок, который делает входной поток неоднородным, т.е. в этом потоке присутствуют заявки первого, заданного, типа и второго, дополнительно введенного, типа. Интенсивность дополнительного потока заявок и время обслуживания заявок второго типа в узлах сети выбирается таким образом, что входной поток заявок обобщенного типа становится простейшим, а время обслуживания заявок обобщенного типа в каждом узле сети становится экспоненциальным с плотностью  $f(t)$

$$f(t) = \mu * \exp(-\mu t), \quad (1)$$

где:  $\mu$  - интенсивность обслуживания в СМО:  $\mu = 1/\bar{t}$   $\bar{t}$  - среднее время обслуживания в СМО.

В этом случае модель становится экспоненциальной, и можно легко найти характеристики такой неоднородной сетевой модели по заявкам обобщенного типа, которые в последствии пересчитываются в характеристики сети по заявкам заданного типа, т.е. заявкам типа 1.

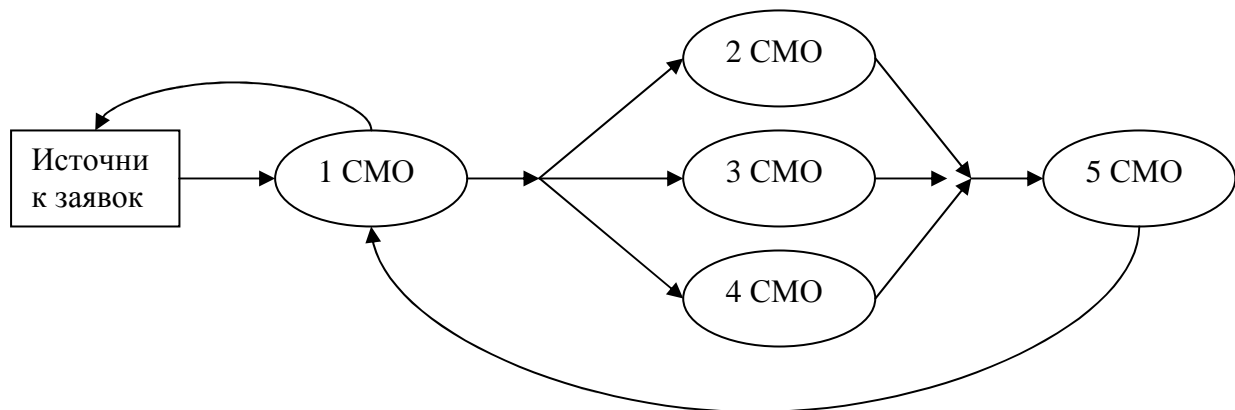


Рис.1. Модель некоторой разомкнутой сети СМО.

### 1. Расчет характеристик отдельной неэкспоненциальной СМО сети

Рассмотрим некоторую СМО с простейшим входным потоком и с неэкспоненциальным распределением времени обслуживания заявок, причем интенсивность поступления заявок  $\lambda_1$ . При этом полагаем, что распределение времени обслуживания заявок в достаточной мере описано двумя моментами: математическим ожиданием  $\bar{t}_1$  и дисперсией  $D_1$ . В расчетных формулах будем использовать коэффициент вариации, который является безразмерной величиной:

$$V_1 = \sqrt{D_1} / \bar{t}_1 = \sqrt{f_1^{[2]} - \bar{t}_1^2} / \bar{t}_1, \quad (3)$$



где  $f_1^{[2]}$  - второй начальный момент распределения времени обслуживания заявок исходного типа, причем  $V_1$  может изменяться в пределах от 0 до 5.

Введем дополнительный тип 2 заявок, которые будут обслуживаться в этой СМО наряду с заданным типом 1. Пусть на вход СМО поступают заявки первого и второго типов с интенсивностями  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно. Вторым начальным моментом  $f_0^{[2]}$  распределения времени обслуживания заявок обобщенного типа определяется в этом случае:

$$f_0^{[2]} = p_1 f_1^{[2]} + p_2 f_2^{[2]}, \quad (4)$$

где  $f_2^{[2]}$  - второй начальный момент распределения времени обслуживания заявок типа 2,  $p_1, p_2$  - вероятности того, что на обслуживание поступила заявка типа 1 или типа 2 соответственно:

$$p_1 = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2), \quad (5)$$

$$p_2 = \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2). \quad (6)$$

Выразим второй момент через коэффициент вариации:

$$f_1^{[2]} = \bar{t}_1^2 (V_1^2 + 1). \quad (7)$$

Потребуем, чтобы коэффициент вариации обобщенного распределения  $V_0$  был равен 1:

$$V_0 = \sqrt{f_0^{[2]} - \bar{t}_0^2} / \bar{t}_0 = 1, \quad (8)$$

где  $\bar{t}_0$  - среднее время обслуживания заявок обобщенного типа:

$$\bar{t}_0 = p_1 \bar{t}_1 + p_2 \bar{t}_2, \quad (9)$$

$\bar{t}_2$  - среднее время обслуживания заявок типа 2.

При этом необходимо выполнение условия

$$\rho_0 = \rho_1 + \rho_2 < 1, \quad (10)$$

где  $\rho_0, \rho_1, \rho_2$  - коэффициенты загрузки СМО заявками обобщенного типа, типа 1, типа 2 соответственно, причем, очевидно, должно выполняться

$$\rho_1 = \lambda_1 \bar{t}_1 < 1, \quad (11)$$

$$\rho_2 = \lambda_2 \bar{t}_2 < 1. \quad (12)$$

Из уравнения (8) с учетом (4) и (7) получаем соотношение:

$$2\bar{t}_0^2 = p_1 \bar{t}_1^2 (1 + V_1^2) + p_2 \bar{t}_2^2 (1 + V_2^2), \quad (13)$$

где  $V_2$  - коэффициент вариации времени обслуживания заявок типа 2,

$$V_2 = \sqrt{f_2^{[2]} - \bar{t}_2^2} / \bar{t}_2. \quad (14)$$

Но с другой стороны, при предположении, что входной поток простейший, для определения средней длины очереди справедлива формула Поллачека-Хинчина:

$$\bar{L} = \rho^2 (1 + V^2) / (2(1 - \rho)), \quad (15)$$

где  $\rho$  - коэффициент загрузки СМО,  
 $V$  - коэффициент вариации времени обслуживания заявок.

Т.к.  $V_2$  из (14) является свободной переменной, то потребуем, чтобы при выборе  $V_2$  выполнялось равенство:

$$\rho_1^2(1+V_1^2)/(2(1-\rho_1)) = p_1(\rho_1 + \rho_2)^2/(1-\rho_1 - \rho_2). \quad (16)$$

С левой стороны равенства (16) стоит длина очереди, получаемая по формуле Поллачека-Хинчина для простейшего входного потока и неэкспоненциального распределения времени обслуживания заявок, а с правой стороны - длина очереди заявок типа 1, полученная при переходе от длины очереди для экспоненциального распределения с обобщенными заявками к длине очереди заявок заданного типа.

Таким образом, для определения параметров корректирующего потока нужно решить систему (10), (13), (16). Но при разных параметрах данная система не всегда имеет допустимые решения. Если  $V_2 < 0$ , то в этом случае полагаем, что  $V_2 = 0$ . Исходя из очевидных посылок, потребуем, чтобы  $\lambda_2$  и  $\bar{t}_2$  были минимальными, поскольку минимум  $\lambda_2$  и  $\bar{t}_2$  обеспечивает минимум погрешности метода, а значения  $V_2$  не выходили бы из интервала 0-5. Поиск минимальных значений  $\lambda_2$  и  $\bar{t}_2$  произведем с помощью ЭВМ с достаточно малым шагом: для  $\lambda_2$  величина шага выбиралась  $0.01 * \lambda_1$  и для  $\bar{t}_2$  с шагом  $0.00001 * \bar{t}_1$ , при этом каждый раз проверялось условие (10).

Однако и в этом случае система (10), (13), (16) может не иметь допустимого решения. В этом случае ищем те значения  $\lambda_2$  и  $\bar{t}_2$ , при которых разница между левой и правой частью уравнения (16) будет минимальной.

Данный метод приводит к лучшим результатам по сравнению с экспоненциальной моделью, в которой предполагается, что входной поток простейший и время обслуживания заявок распределено по экспоненциальному закону. Теперь нам осталось рассмотреть формирование дополнительного потока в источнике заявок.

## 2. Формирование дополнительного потока в источнике заявок.

Рассмотрим СМО с непростейшим входным потоком и произвольно распределенным временем обслуживания заявок. В этом случае необходимо подобрать таким образом корректирующий поток заявок из источника интенсивности  $\lambda_2^*$ , чтобы поток заявок обобщенного типа, поступающий из источника, стал простейшим. При этом снова из очевидных предпосылок потребуем, чтобы  $\lambda_2^*$  было минимальным, а коэффициент вариации распределения времени поступления заявок  $V_{e2}$  выбирается не превосходящим 5. Поскольку достаточно точных методов для нахождения коэффициента вариации результирующего потока нет, мы воспользовались программой имитационного моделирования, складывающей два потока. В проведенном нами машинном эксперименте объем выборки полагаем равным 35000. При этом коэффициент вариации обобщенного потока максимально приближался к 1, и из множества решений выбиралось то, при котором интенсивность  $\lambda_2^*$  была минимальной. В результате, например, при интенсивности источника, равной 1, и коэффициенте вариации исходного потока, поступающего из источника, равного 0.9, интенсивность корректирующего потока по данным моделирования равнялась 0.01, а коэффициент вариации корректирующего потока равен 0.7, при этом коэффициент вариации обобщенного потока, поступающего из источника, равнялся 0.997.

Таким образом, если интенсивность корректирующего потока  $\lambda_2$  не меньше найденного значения  $\lambda_2^*$ , то в этом случае поток обобщенных заявок из источника можно положить простейшим. И в этом случае мы можем вернуться к уже рассмотренному пункту 1.

Полученные результаты сравнивались с результатами статистического имитационного моделирования СМО, которые полагались истинными, причем при моделировании СМО число экспериментов выбиралось 1000000.

Результаты для коэффициента вариации входного потока 1.5 наглядно изображены на рис. 2, из которого видно, что результаты модели Поллачека-Хинчина и предложенного метода почти совпадают и сильно отличаются от результатов экспоненциальной модели, относительная погрешность (под относительной погрешностью понимаем отношение абсолютной погрешности к точному значению, домноженное на 100) которой возрастает при увеличении коэффициента вариации времени обслуживания заявок.

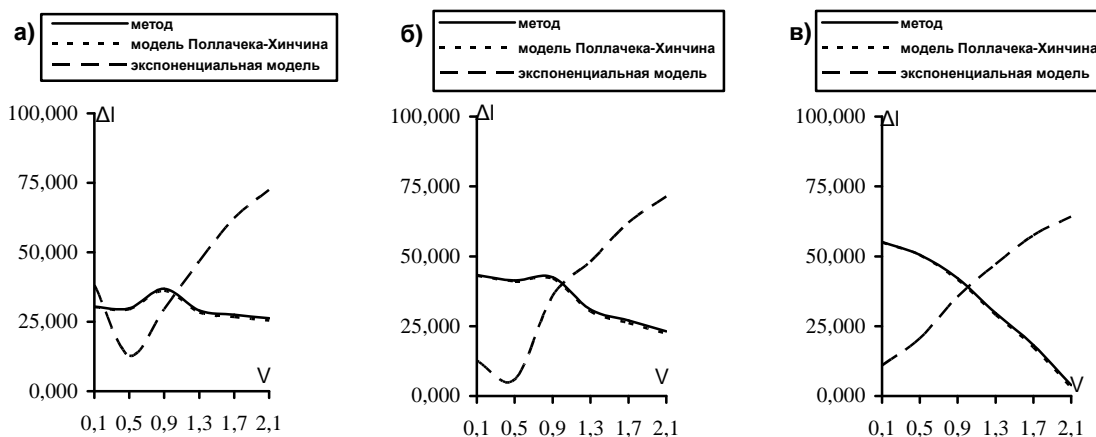


Рис. 2. Относительная погрешность длины очереди при применении различных моделей, причем ось  $\Delta l$  – относительная погрешность длины очереди,  $V$  – коэффициент вариации времени обслуживания заявок; а)- для коэффициента загрузки 0.1, б) – для коэффициента загрузки 0.5, в) – для коэффициента загрузки 0.9

Анализ результатов показывает, что использование предлагаемого метода оправдано, т.к. его погрешность существенно меньше погрешности экспоненциальной модели, которая не учитывает дисперсию времени обслуживания и в большей части случаев меньше погрешности модели Поллачека-Хинчина, применяемой к неэкспоненциальной СМО. Рассмотренный метод легко распространяется на неэкспоненциальные сети, как разомкнутые, так и замкнутые.

### 3. Расчет характеристик разомкнутой неэкспоненциальной сети СМО

Распространение метода на сеть СМО основывается на принятой нами гипотезе, согласно которой, если можно найти параметры дополнительного потока интенсивности  $\lambda_2$ , которая превращает неэкспоненциальную однородную сеть в экспоненциальную неоднородную сеть, то всегда можно найти параметры дополнительного потока с большей интенсивностью.

Разомкнутая неэкспоненциальная сеть может иметь произвольную конфигурацию, задаваемую матрицей передач  $P$ , размером  $(N + 1)(N + 1)$  – по количеству СМО плюс источник заявок. Для каждой СМО сети должны быть указаны интенсивность обслуживания  $\mu_j$  и коэффициент вариации времени обслуживания  $V_j$ . Для источника указывается интенсивность источника  $\lambda_u$  и коэффициент вариации  $V_u$  для исходящего из источника потока заявок. Расчет характеристик включает в себя несколько этапов.

Сначала проверяется существование в разомкнутой сети СМО стационарного режима. Для этого решалась система относительно интенсивностей потоков заявок  $\lambda_{1j}$ , действующих в сети:

$$\lambda_{1j} = \sum_{i=1}^N p_{ij} \lambda_{1i}, \quad (j = 1, \dots, N), \quad (18)$$

где  $p_{ij}$  - вероятность перехода из  $i$ -й СМО в  $j$ -ю СМО, при этом интенсивности потоков заявок предполагались связанными с интенсивностью источника через коэффициенты передач  $\alpha_j$ :

$$\lambda_{1j} = \alpha_j \lambda_{1u}, \quad (19)$$

где:

$$\alpha_j = \lambda_{1j} / \lambda_{1u}.$$

Вычисляются все коэффициенты загрузок СМО сети  $\rho_j$  заявками заданного типа:

$$\rho_j = \lambda_{1j} / \mu_j, \quad (j = 1, \dots, N). \quad (20)$$

Если все  $\rho_j$  оказывались меньше 1, то в сети устанавливается стационарный режим и можно найти ее характеристики. В противном случае стационарный режим не существует. Предполагаем, что стационарный режим существует. Сначала определяются параметры корректирующего потока, генерируемого источником в соответствии с пунктом 2. Далее для каждой СМО сети решается система (10), (13), (16), из которой находятся минимальные значения  $\bar{t}_{2j}$  и  $\lambda_{2j}$  для корректирующего потока, при которых коэффициент вариации времени обслуживания обобщенных заявок становился равным 1. При этом предполагается, что матрица передач для заявок корректирующего типа совпадала с матрицей передач для заявок типа 1. Найденные минимальные значения  $\lambda_{2j}$  корректирующих потоков приводятся к источнику, получаем:

$$\lambda_{u2}^1(j) = \lambda_{2j} / \alpha_j, \quad (j = 1, \dots, N). \quad (21)$$

После этого выбирается максимальное по множеству  $j$  значение  $\lambda_{u2}^{\max}$ , включая и интенсивность корректирующего потока из источника, найденного на первом этапе. Это гарантирует нам, что в каждый узел сети поступал корректирующий поток заявок с интенсивностью, не меньшей минимального необходимого значения, найденного на втором этапе, и что значения коэффициентов вариации для каждой СМО сети и источника по заявкам обобщенного типа равно 1 при соответствующем подборе  $\bar{t}_{2j}$  и  $V_{2j}$  для каждой СМО сети. Это позволило считать разомкнутую неоднородную сеть экспоненциальной по заявкам обобщенного типа.

Выбирая  $\lambda_{u2}^{\max}$ , рассчитывались интенсивности корректирующего потока для каждого узла сети:

$$\lambda_{2j}^1 = \alpha_j \lambda_{u2}^{\max}, \quad (j = 1, \dots, N). \quad (22)$$

Для найденных  $\lambda_{2j}^1$  пересчитывались параметры корректирующих потоков для каждой СМО сети, решая системы (10), (13), (16). Затем по известным комбинаторным методам [3] от параметров каждой СМО сети с обобщенными заявками переходили к параметрам СМО с исходными заявками:

$$\bar{l}_{1j} = \bar{L}_j \lambda_{1j} / (\lambda_{1j} + \lambda_{2j}^1), \quad (j = 1, \dots, N), \quad (23)$$

где  $\bar{l}_{1j}$  - длина очереди к СМО сети из заявок заданного типа 1,

$\bar{L}_j$  - длина очереди к СМО для экспоненциальной модели с обобщенным типом заявок.

По характеристикам каждой СМО сети можно рассчитать характеристики сети в целом.

Например, средняя длина очереди в сети:

$$\bar{L} = \sum_{j=1}^N l_j, \quad (j = 1, \dots, N), \quad (24)$$

где  $l_j$  - длина очереди к СМО;  
 среднее число заявок:

$$\bar{M} = \sum_{j=1}^N m_j, (j = 1, \dots, N), \quad (25)$$

где  $m_j$  - среднее число заявок в СМО.

Полученные результаты для каждой СМО наглядно изображены на рис. 3.

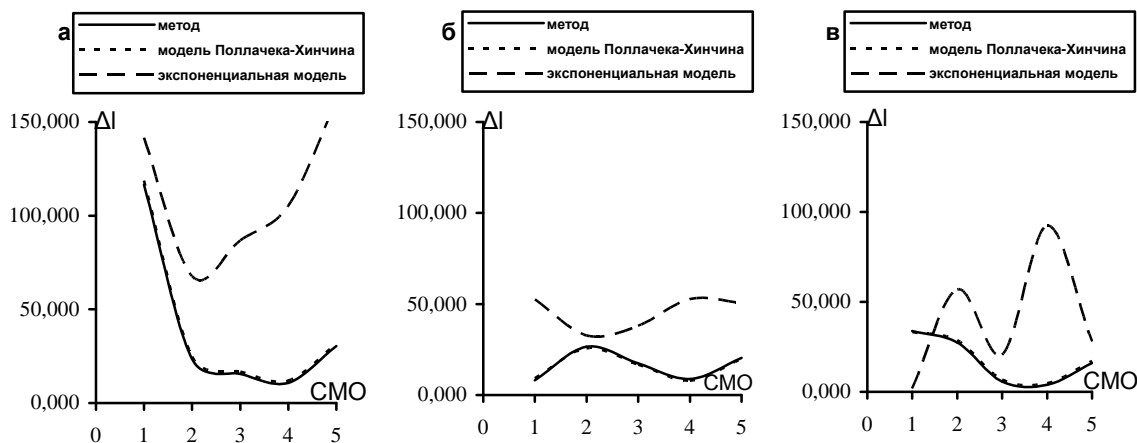


Рис.3. Относительная погрешность длины очереди к каждой СМО сети при различных параметрах узлов сети, причем  $\Delta l$  - относительная погрешность, а СМО - номер конкретной СМО.

Таким образом, видим, что применение экспоненциальной модели не оправдано в тех случаях, когда имеется возможность учесть коэффициент вариации времени обслуживания. Рассмотренный метод для разомкнутых неэкспоненциальных сетей имеет практически ту же погрешность, что и метод Поллачека-Хинчина. Но рассмотренный метод, в отличие от метода Поллачека-Хинчина, можно распространить на замкнутые модели, а метод Поллачека-Хинчина на замкнутые модели, имеющие большое прикладное значение, распространить невозможно. При этом приведенный метод несколько точнее метода Поллачека-Хинчина, что так же видно на рис. 3.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения. М.: Мир, 1965. с. 302.
2. Венцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. с. 552.
3. Кругликов В.К., Тарасов В.Н. Анализ и расчет сетей массового обслуживания с использованием двумерной диффузионной аппроксимации // Автоматика и телемеханика. №8. М.: АН СССР, 1983. с. 74-83.

**Сайкин Александр Иванович** –  
 кандидат технических наук, доцент кафедры  
 «Программное обеспечение вычислительной  
 техники и автоматизированных систем»  
 Саратовского государственного технического  
 университета

**Saikin Alexander Ivanovich** –  
 Candidate of Technical Sciences, Associate  
 Professor of the Department “Software of  
 Computers and Automated Systems”, Saratov  
 State Technical University

**Чурикова Анна Александровна** – аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета

**Churikova Anna Aleksandrovna** – Post-graduate Student of the Department “Software of Computers and Automated Systems”, Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 25.02.2011, принята к опубликованию 20.07.2011*

УДК 007:159.995

**У.К. Макуха, В.А. Кушников, В.А. Родичев**

### **АНАЛИЗ ВЫПОЛНИМОСТИ ПЛАНОВ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЛИКВИДАЦИИ НАВОДНЕНИЙ**

*В статье рассмотрены постановка задачи, математическая модель и алгоритм проверки на выполнимость плана ликвидации чрезвычайной ситуации, связанной с наводнением.*

Чрезвычайная ситуация, наводнение, план мероприятий

**U.K. Makukha, V.A. Kushnikov, V.A. Rodichev**

### **THE ANALYSIS OF FEASIBILITY OF THE PLANS OF MEASURES ON LIQUIDATION OF FLOODING**

*In article problem statement, mathematical model and algorithm of check on feasibility of the emergency situation liquidation plan connected with flooding are considered.*

Extreme situation, flooding, plan of measures

#### **Введение**

Один из путей уменьшения разрушительного воздействия наводнений и сокращения ущерба от их возникновения связан с использованием возможностей современной вычислительной техники и информационных технологий, позволяющих улучшить подготовку персонала Российской системы предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях (РСЧС) и значительно повысить эффективность оперативного управления объектами и территориями при ликвидации широко распространенных чрезвычайных ситуаций природного характера.

Так, только на территории России за год в среднем происходит около 100-120 крупных событий чрезвычайного характера, связанных с наводнениями и паводками. В частности, в прошлом году на месяц раньше обычного весеннее половодье началось и в нескольких районах Саратовской области. В Аткарском районе вода разрушила мост и газопровод, в самом Аткарске подтопленными оказались более 1000 домов. В течение недели не отапливался поселок Нижняя Красавка и районный дом престарелых, более 100 человек пришлось срочно эвакуировать (рис. 1). В районе была объявлена чрезвычайная ситуация.



Рис. 1. Аткарский район. Район затопления

В настоящее время разработаны, прошли проверку практикой и успешно функционируют в составе РСЧС различные информационные системы, в том числе центр управления в кризисных ситуациях (ЦУКС), системы оперативно-диспетчерского управления в чрезвычайных ситуациях (ОСОДУ), единые дежурно-диспетчерские службы (ЕДДС), системы мониторинга окружающей среды, прогнозирования и ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных промышленных объектах и т.д.

Вместе с тем, на объектовом уровне РСЧС, сформированном на крупных промышленных предприятиях и в организациях, большинство систем оперативного управления позволяют обеспечить рациональный режим работы только отдельных групп оборудования в стереотипных производственных ситуациях и, как правило, не выдают рекомендаций оперативно-диспетчерскому персоналу при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций комплексного характера, затрагивающих весь производственный процесс в целом, например, таких как наводнения. Между тем, как показывает практика, многие чрезвычайные ситуации, связанные с наводнениями и затоплением территорий, развиваются на основе техногенных происшествий именно этого уровня.

Указанное обстоятельство обуславливает необходимость разработки и внедрения в составе математического обеспечения информационных систем РСЧС новых моделей, алгоритмов и комплексов программ, позволяющих улучшить подготовку оперативно-диспетчерского персонала промышленных предприятий, а также значительно повысить эффективность оперативного управления объектами и территориями при ликвидации наводнений.

### Постановка задачи

Допустим, что  $e(n(t), r(t)) \in [E(N(t), R(t))]$  - чрезвычайная ситуация, связанная с затоплением контролируемых объектов или территорий во время наводнений. В результате наступления чрезвычайной ситуации  $e(n(t), r(t)) \in [E(N(t), R(t))]$  контролируемый объект или территория перешла в состояние  $s_0(t) \in \{S(t)\}$  и ей был причинен значительный ущерб, где  $\{S(t)\}$  - множество допустимых состояний контролируемых объектов и территорий,  $[E(N(t), R(t))]$  - множество возможных чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнением;

$t$  - время). Также допустим, что, исходя из опыта ликвидаций чрезвычайных ситуаций на объектовом уровне, переход контролируемых объектов и территорий в состояние  $s_k(t) \in \{S(t)\}$  приведет к ликвидации чрезвычайной ситуации  $e(n(t), r(t))$ . С учетом сделанных допущений формализованная постановка решаемой задачи может быть сформулирована следующим образом.

Для информационных систем объектового и территориального уровня, входящих в состав РСЧС, разработать формальные модели и алгоритмы, позволяющие на временном интервале  $[t_n, t_k]$  при известных параметрах среды  $x(t) \in \left\{ \vec{X}(t) \right\}$  и управляющих воздействиях  $u(t) \in \left\{ \vec{U}(t) \right\}$ , характеризующих чрезвычайную ситуацию  $e(n(t), r(t))$ , в течение отведенного на решение данной задачи времени осуществить переход из начального состояния  $s_0(t) \in \{S(t)\}$  в конечное состояние  $s_k(t) \in \{S(t)\}$ , минимизируя функцию

ущерба, причиненного наводнением  $\int_{t_n}^{t_k} V(n(t), r(t)) dt \rightarrow \min$  при известных ограничениях,

( $t_n$  и  $t_k$  - время начала и окончания чрезвычайной ситуации;  $V_{\max}$  - максимально допустимая величина ущерба;  $\varepsilon, n_i, i = \overline{1,4}$  - известные константы;  $\{S(t)\}$  - множество допустимых состояний контролируемых объектов и территорий,  $[E(N(t), R(t))]$  - множество чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера).

### Математическая модель

В соответствии с поставленной задачей необходимо построить граф, описывающий проводимые мероприятия по ликвидации ЧС. Делается допущение, что план мероприятий  $M$  по ликвидации чрезвычайной ситуации, связанной с наводнением, можно представить в виде графа  $G(U, E)$ , множество вершин  $M$  которого - мероприятия разработанного плана. При этом вершины  $u_i, u_j \in U$  графа  $G(U, E)$  соединяются дугой  $e_{ij} \in E$  в том и только том случае, если для двух мероприятий плана  $m_i, m_j \in M$ , соответствующих этим вершинам.

В процессе формирования модели  $A$  граф  $G(U, E)$  описывается системой продукций следующего вида:

ПЛАН  $M$  БУДЕТ ВЫПОЛНЕН, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ВЕРШИНАМ ГРАФА

M1 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО (M1.1 И M1.2 И (У1 ЗАПРЕТ У2)) И (M1.3 И ((M1.3.3 ИЛИ (M1.3.1 И M1.3.2)) ИЛИ (У.3 ЗАПРЕТ У.4)) И (M1.4 И M1.5 И M1.6 И (У.5 ЗАПРЕТ (У.6 ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (У.7 И У.8)))) И M1.12 И ((M1.7 И M1.8)) ИЛИ (M1.9 И M1.10 И M1.11) И (У.9 ЗАПРЕТ У.10 ЗАПРЕТ У.11)) И ((M1.13 И M1.14) ИЛИ (M1.15 ИЛИ M1.16)) M1.17)

M2 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО ((M2.1. ЗАПРЕТ У.12) И M2.2 И ((M2.3 И M2.4) ИЛИ M2.5) И (M2.6 ЗАПРЕТ У.13))

M3 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО (M3.1 ИЛИ (У.14 ЗАПРЕТ У.15)) ИЛИ (M3.2 И M3.3 И M3.4)



М4 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО ((М.4.1 ЗАПРЕТ У.16) ИЛИ (М.4.2 И М.4.3 М.4.4 И (У.19 ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (У.17 ЗАПРЕТ У.18)))

М5 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО ((М5.1 И М.5.2 И (У.20 ЗАПРЕТ У.21) И (М.5.3 И М.5.4 И М.5.5 И М.5.6 И (У.22 ЗАПРЕТ У.23)) И (М.5.7, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО (М.5.7.1 И М.5.7.2 И М.5.7.3 И М.5.7.4 И М.5.7.5) ) И (У.24 ЗАПРЕТ У.25 ЗАПРЕТ У.25)

М6 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО ((М.6.1 И М.6.2 И (У.28 ЗАПЕРТ У.29)) И (М.6.3 И У.30) И (М.6.4. И У.31) И (М.6.5, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО ((М.6.5.1 И М.6.5.2 И М.6.5.3) И (У.32 ЗАПРЕТ У.33) И (М.6.5.4 ИЛИ М.6.5.5)) И (М.6.6 И М.6.7 И У.34))

М7 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО (М.7.1 И (М.7.2 И М.7.3) И (М.7.4 И М.7.5))

М8 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО (((М.8.1 И М.8.2) И (У.35 ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (У.36 ЗАПРЕТ У.37 ЗАПРЕТ У.38) ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ У.39)) И (М.8.3 И М.8.4 И (У.40 ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (У.41 ЗАПРЕТ У.42)))

М9 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО ((М.9.1 И М.9.2 И (У.43 ЗАПРЕТ У.44) ИЛИ (М.9.3 И (У.45 ЗАПРЕТ У.46 ЗАПРЕТ У.47))))

М10 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО (М.10.1 И М.10.2 И (У.48 ЗАПРЕТ У.49 ЗАПРЕТ У.50))

М11 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО (М11.1 И (М.11.1.1 И М.11.1.2 И М.11.1.3 И М.11.1.4) И М.11.2 И М.11.3 И М.11.4 И (М.11.5 И М.11.6) И М.11.7 И У.51)

М12 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО (М.12.1 И М.12.2. И М.12.3)

М13 БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ ВЫПОЛНЕНО ((М.13.1 И М.13.2 И М.13.3 И (У.52 ЗАПРЕТ У.53 ЗАПРЕТ У.54) И (М.13.4 И М.13.5 И М.13.6 И У.55) И (М.13.7 И М.13.8 И М.13.9 И (У.56 ЗАПРЕТ У.57)) И М.13.10 И М.13.11)) [3]

При разработке данного описания делается допущение, что каждое мероприятие  $m_i \in M$  может быть выполнено только после того, как выполнятся все мероприятия, с которыми оно связано на графе  $G(U, E)$  исходящими дугами (т.е. предшествующие мероприятия, от которых зависит выполнение  $m_i \in M$ ). Рассмотрим подробно фрагмент графа (рис. 2), связанный с возникновением событий, ведущих к затоплению города с вершиной М1 (Деятельность Горжилуправления, Управление благоустройства и транспорта города). Данное положение иллюстрирует фрагмент графа мероприятий по подготовке города к весеннему паводку, приведенный на рис. 2. На данной схеме символами «М» обозначены мероприятия, выполнение которых, по мнению экспертов, необходимо для предотвращения затопления территорий и объектов во время паводка, символами «у» - условия выполнения данных мероприятий, сформированные в виде продукций.

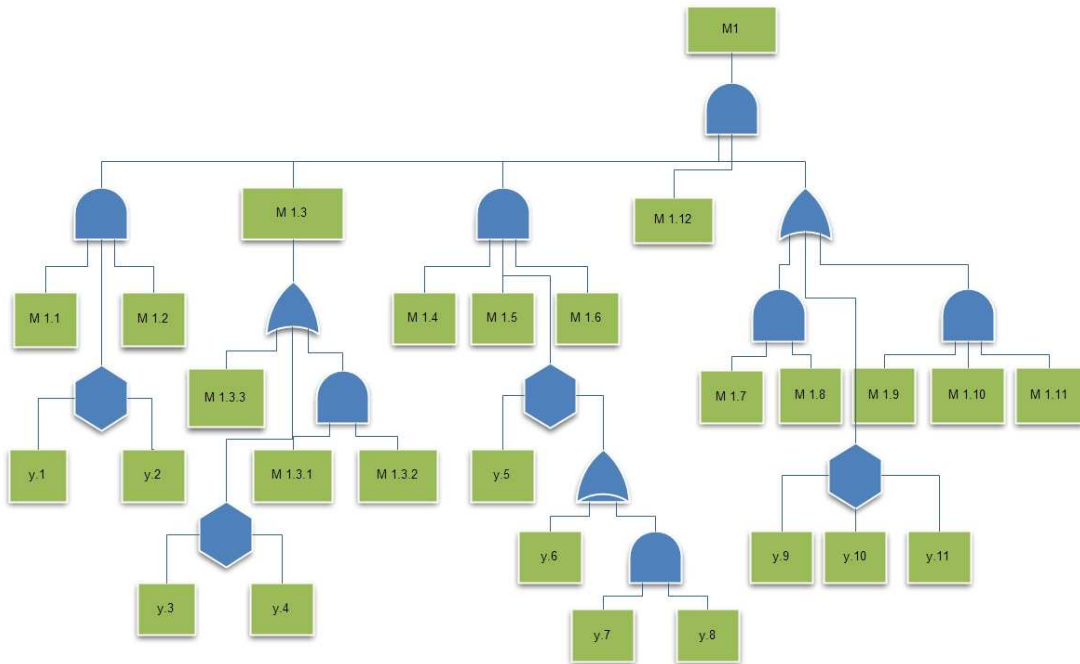


Рис. 2. Фрагмент графа  $G(U, E)$  мероприятий по подготовке города к весеннему паводку

M1.1- осуществлена подготовка мероприятий по защите подведомственных зданий, сооружений и коммуникаций от неблагоприятного воздействия паводковых вод;

M1.2 - обеспечено безаварийное функционирование коммуникаций;

y.1 - планы не согласованы с городской паводковой комиссией; y.2 - составлен план работ;

M1.3 – проведены работы с ливнеприемниками и ливневой канализацией;

M1.3.1 – проверено их состояние; M1.3.2 - произведена очистка ливнеприемники;

M1.3.3 - ливнеприемники приведены в рабочее состояние; y.3 - оформлены разрешения и допуски на проведения работ; y.4 - организовано обеспечение участков необходимыми средствами механизации; y.5 - в требуемые сроки обследованы шандорные устройства и ограждающие дамбы;

M1.5 - определено их техническое состояние; M1.6 - внесены необходимые предложения по устранению недостатков; y.6 - дополнительное укрепление дамбы было проведено 5 лет назад;

y.7 - визуально установлены отдельные повреждения дамбы; y.8 - высота последнего наращивания дамбы не превышает 1 метра; M1.7 – отремонтированы;

M1.8 - очищены шандорные устройства; M1.9 - приведены в рабочее состояние;

M1.10 - произведена очистка от снега; M.1.11 - произведена отсыпка грунта на укрепленных участках дамб; y.9 - составлены планы работ; y.10 - планы работ выполнены в срок;

y.11 – ремонтные бригады снабжены необходимой техникой

По построенному графу  $G(U, E)$  строится план мероприятий  $M$ , где  $m_i \in M$ , который необходимо выполнить для ликвидации чрезвычайной ситуации, связанной с весенним паводком. С помощью системы опишем рассмотренный фрагмент графа  $G(U, E)$ .

МЕРОПРИЯТИЕ M.1 НЕ БУДЕТ ВЫПОЛНЕНО, ЕСЛИ НЕ ВЫПОЛНЕНЫ МЕРОПРИЯТИЯ (M1.1 AND M1.2) AND ((M1.3.1 AND M1.3.2) OR M1.3.3) AND (M1.4 AND M1.5 AND M1.6) AND ((M1.7 AND M1.8) OR (M1.9 AND M.1.10 AND M1.11)). Это описание можно представить в виде булевой функции  $M1=(M1.1 \cup M1.2) \cup ((M1.3.1 \cup M1.3.2) \cap M1.3.3) \cup (M1.4 \cup M1.5 \text{ AND} M1.6) \cup ((M1.7 \cup M1.8) \cap (M1.9 \cup M.1.10 \cup M1.11))$ . Системе продукции ставится в соответствие логическая функция  $f(w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{nk})$ , где

$w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{nk}$  - конечные вершины графа  $G(U, E)$ . При этом каждый аргумент  $w_{ij}$

функции  $f(w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{nk})$  должен принимать значение 1 или 0, что будет означать выполнение или не выполнение мероприятия  $m_{ij} \in M [2]$ , соответствующего вершине  $w_{ij}$  графа  $G(U, E)$ .

Логическая функция принимает следующие значения:

$$f(w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{nk}) = \begin{cases} 1, & \text{если план выполнен} \\ 0, & \text{если план не выполнен} \end{cases}$$

На данную систему также накладываются условия невыполнения отдельных мероприятий плана, задаваемых работником спасательных служб на основе личного опыта, интуиции, хорошего знания функционирования объекта и системы управления. Задавая различные комбинации значений аргументов  $\bar{w}_{1k}, \bar{w}_{2k}, \dots, \bar{w}_{nk}$  и определяя соответствующие этим аргументам значения функции  $f(\bar{w}_{1k}, \bar{w}_{2k}, \dots, \bar{w}_{nk})$ , можно определить невыполненные мероприятия, анализировать степень выполнения плана намеченных мероприятий и получить новые знания об условиях выполнения плана  $M$ .

### Заключение

1. Предложен комплекс математических моделей, позволяющий формализовать описание стереотипных чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнением и затоплением территорий в системах оперативного управления промышленных предприятий и организаций. Его характерной особенностью является объединение в составе единого математического обеспечения логико-лингвистических, динамических графовых и логических моделей объекта управления, допускающих работу с зависимостями качественного типа, наглядных и удобных для ЛПР, а также широко используемых при создании интегрированных систем управления сложными производственными процессами.

2. Разработан граф событий, характеризующий наступление наводнения на контролируемых территориях Саратовской области, позволяющий проверить на выполнимость план мероприятий по предотвращению наводнений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Родичев В.А., Резчиков А.Ф., Кушников В.А. и др. Модели и алгоритмы поиска данных в информационных системах промышленного предприятия // Информационные технологии. 2005. №8. С. 62-66.

2. Аветисян Ю.А., Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Родичев В.А. Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 43-47.

3. Шлычков Е.И., Похазников М.Ю., Кушников В.А., Калашникова О.М. Анализ выполнимости планов мероприятий при оперативном управлении машиностроительным предприятием // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2007. Т.1. №1. С. 88-95.

**Макуха Ульяна Константиновна** – аспирант кафедры «Информационные системы (в гуманитарной области)» Саратовского государственного технического университета

**Makukha Uljana Konstantinovna** – Post-graduate Student of the Department “Information systems (in humanitarian area)”, Saratov State Technical University

**Кушников Вадим Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные

**Kushnikov Vadim Alekseevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Information systems (in

системы (в гуманитарной области)»  
Саратовского государственного технического  
университета

humanitarian area)”, Saratov State Technical  
University

**Родичев Вячеслав Анатольевич**–  
Соискатель кафедры «Информационные  
системы (в гуманитарной области)»  
Саратовского государственного технического  
университета

**Rodichev Vyacheslav Anatolevich-**  
Competitor of the Department “Information  
systems (in humanitarian area)”, Saratov State  
Technical University

*Статья поступила в редакцию 25.01.2011, принята к опубликованию 20.07.2011*

**Д.В. Маршаков, Д.В. Фатхи**

## **МОДЕЛЬ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО НЕЙРОНА НА ОСНОВЕ ЦВЕТНЫХ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

*В работе рассматриваются основные принципы построения цветных временных сетей Петри для моделирования и анализа свойств искусственных нейронных сетей. Представлена модель искусственного нейрона на основе цветных временных сетей Петри и дано формальное описание функционирования модели.*

Искусственные нейронные сети, аппаратная реализация, моделирование, сети Петри, сигмоидальная функция активации

**D.V. Marshakov, D.V. Fatkhi**

## **THE MODEL OF THE HARDWARE IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL NEURON BASED ON COLORED TIMED PETRI NETS**

*The paper deals with the basic principles of colored timed Petri nets as a tool for modeling and analyzing the properties of artificial neural networks. The model of artificial neuron based on colored timed Petri nets and a formal description of a functioning model are given.*

Artificial neural networks, hardware implementation, simulation, Petri nets, sigmoid activation function

### **Введение**

Современные искусственные нейронные сети (ИНС) в силу своих способностей к моделированию нелинейных процессов, обобщению, работе с зашумленными данными и т.д. находят применение во многих прикладных областях. При этом все более возрастает удельных вес аппаратных нейросетевых реализаций. Это связано с требованиями к обеспечению высоких скоростей решения сложных задач с использованием массового параллелизма [1, 2], с которыми пока не справляются традиционные компьютеры.

Одной из перспективных аппаратных реализаций ИНС является построение их на основе ПЛИС – матричных структур, обеспечивающих параллельную обработку информации и обладающих высокой степенью интеграции, масштабируемостью, развитыми средствами проектирования, реализации выполнения алгоритмов обучения [1-4].

Для правильного воплощения ИНС до её реализации необходимо предварительное моделирование структуры и поведения нейронов сети.

Мощным средством для моделирования параллельных и распределенных процессов являются сети Петри [5]. С помощью сетей Петри и их модификаций можно наглядно представить динамику функционирования систем и составляющих их элементов.

Применение цветных сетей Петри в контексте моделирования ИНС рассматривается в работах [6, 7]. В рассматриваемых моделях используются только пороговые функции активации (так называемые пороговые логические элементы), в которых обработка данных сводится к формированию на выходе бинарных дискретных сигналов. ИНС с пороговой функцией активации, они обладают рядом недостатков, среди которых наиболее существенным является насыщение нейронов от больших значений входных сигналов.

Более приемлемой в практике моделью ИНС является модель, состоящая из нейронов с непрерывной (как правило, сигмоидальной) функцией активации [1, 3, 4]. При этом пространство решений, в котором работает такая сеть, не ограничивается дискретными значениями и состоит из полного спектра возможных входов и их значений, благодаря чему сеть способна аппроксимировать практически любую функциональную зависимость. Кроме того, сигмоидальная функция активации обладает свойством усиливать слабые сигналы и предотвращает насыщение нейрона от больших сигналов [8].

Необходимо отметить, что в ИНС с пороговыми элементами обучение производится лишь на её модели, заноса полученные весовые коэффициенты в память кристалла на этапе проектирования. Использование в аппаратных реализациях многослойных нейронных сетей нейронов с сигмоидальной функцией активации может позволить производить обучение нейросети на кристалле в реальном масштабе времени.

В [9] отмечается, что при проектировании ИНС особое внимание современными разработчиками уделяется реализации ИНС с нейронами, обладающими сигмоидальной функцией активации.

Для исключения указанных недостатков ИНС с пороговой функцией, а также для обеспечения обучения аппаратных реализаций ИНС в реальном масштабе времени, необходима разработка сетевой модели ИНС с реализацией сигмоидальной функции активации.

### 1. Математическая модель искусственного нейрона

На рис. 1 представлена модель нейрона, лежащая в основе искусственных нейронных сетей. В состав нейрона входят умножители (синапсы), сумматор и устройство, реализующее функцию активации.

Синапсы выполняют скалярное произведение  $n$ -мерного вектора входных данных  $x = x_1, x_2, \dots, x_n$  и  $n$ -мерного вектора весовых данных  $w = w_1, w_2, \dots, w_n$ .

Сумматор выполняет сложение взвешенных входов:

$$\Sigma_j = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1)$$

где  $w_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) – вес синапса,  
 $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) – входной сигнал,  
 $n$  – число входов нейрона,  
 $j$  – номер нейрона.

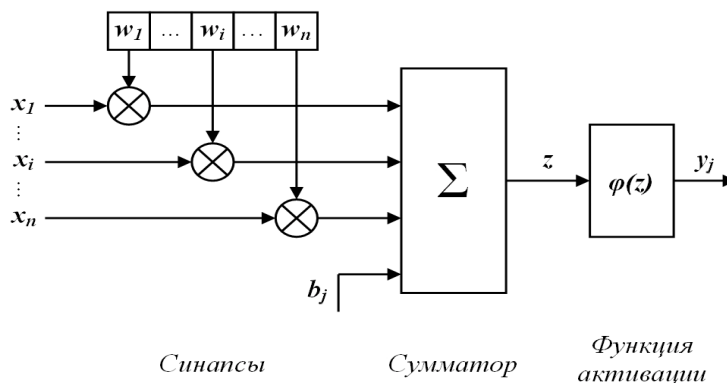


Рис. 1. Структура искусственного нейрона

Нейрон, показанный на рис. 1, дополнен скалярным смещением  $b_j$ . Смещение суммируется со взвешенными входами и приводит к сдвигу аргумента функции активации на величину  $b_j$ :

$$z = \Sigma_j + b_j, \quad (2)$$

где  $b_j$  – значение смещения.

Функция активации  $\varphi(z)$  определяет выходной сигнал нейрона. Сигмоидальная функция активации имеет вид (3).

$$y_j = \varphi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (3)$$

Математическая модель нейрона описывается системой рассмотренных соотношений:

$$\begin{cases} z = \Sigma_j + b_j, \\ \varphi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}; \end{cases} \quad (4)$$

## 2. Аппаратное представление искусственного нейрона

Один из вариантов архитектурного решения искусственного нейрона на основе ПЛИС Xilinx Spartan IIE рассмотрен в работе [4] и представлен на рис. 2.

Структура нейрона состоит из различных вычислительных подблоков. Для определения значения функции активации используется таблица (LUT), хранящаяся в блоке памяти RAM. В структуре содержится один умножитель (MUL) и один сумматор (ADD). Входные сигналы ( $input_i$ ) вводятся параллельно в ROM1. CONTROL UNIT, управляя стартовыми сигналами ( $start$ ), конечными сигналами ( $reset$ ) и счетчиком сигналов нейрона ( $num$ ) координирует функции блоков, обеспечивает синхронизацию входных сигналов и соответствующих им весов. Первый входной сигнал и соответствующий ему вес сохраняется в ROM2, после чего блок MUL последовательно их перемножает и заносит в ROM3. Та же операция повторяется и для других входных сигналов, после чего сумматор ADD суммирует взвешенные входы ( $sum$ ) и добавляет к ним значение смещения BIEST. Результат суммирования ( $sum\_out$ ) поступает в таблицу определения значений сигмоидальной функции LUT, после чего полученное значение сохраняется в блоке OUT, подающем сигнал окончания процесса.

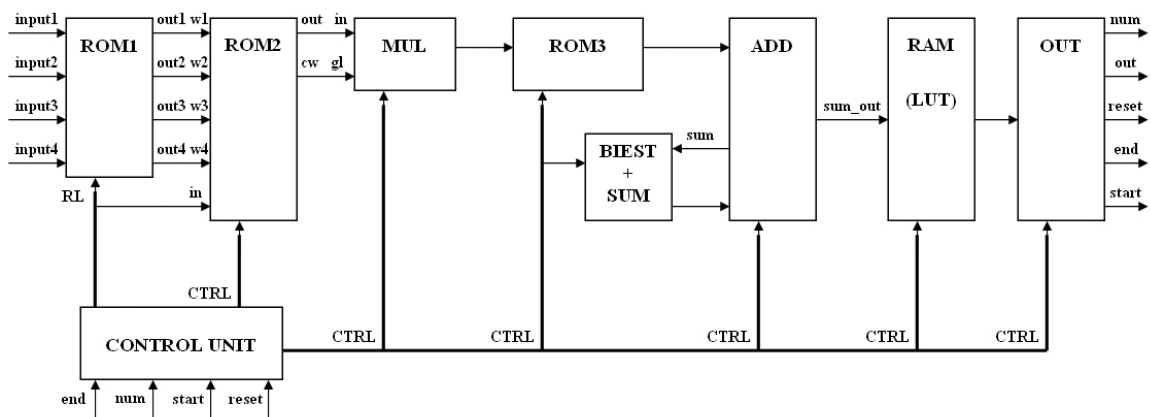


Рис. 2. Структурная схема аппаратного представления нейрона на основе ПЛИС Xilinx Spartan IIE

### 3. Модель искусственного нейрона на основе цветной временной сети Петри

В качестве модели искусственного нейрона предлагается модель, модифицирующая модели, рассмотренные в [6, 7], на основе цветных временных сетей Петри в контексте нейронных сетей с сигмоидальной функцией активации.

**Формальное определение модели.** Модифицированная цветная временная сеть Петри – *СТПНNSIG*, представляющая искусственный нейрон с сигмоидальной функцией активации задается следующим набором:

$$СТПНNSIG = (P, T, A, M, C, F, H, \mu, \tau, OC, CT, SIG), \quad (5)$$

где:  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$  – конечное непустое множество позиций;

$T = \{t_1, \dots, t_m\}$  – конечное непустое множество переходов;

$A$  – конечное непустое множество дуг такое, что  $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ ;

$M$  – функция маркировки, определенная на  $P$  так, что для  $p \in P$   $M(p): C(p) \rightarrow Z$ , где  $Z$  – множество целых чисел;

$C$  – конечное множество цветов, состоящее из двух наборов цветов  $C(p)$  и  $C(t)$ , такое, что  $C = C(p) \cap C(t)$ :

- $C(p_j) = \{\langle \text{цвет}_{jp1}, \text{приоритет}_{jp1} \rangle, \langle \text{цвет}_{jp2}, \text{приоритет}_{jp2} \rangle, \dots, \langle \text{цвет}_{jpc}, \text{приоритет}_{jpc} \rangle\}$  – набор присвоения маркерам каждого места  $p \in P$  цветов и соответствующих им приоритетов, где  $p_c$  – число цветных маркеров в позиции  $p_j \in P$ ;
- $C(t_j) = \{\langle \text{цвет}_{jt1}, \text{приоритет}_{jt1} \rangle, \langle \text{цвет}_{jt2}, \text{приоритет}_{jt2} \rangle, \dots, \langle \text{цвет}_{jtc}, \text{приоритет}_{jtc} \rangle\}$  – набор присвоения маркерам цветов и соответствующих им приоритетов каждому переходу  $t \in T$  цветов, где  $t_c$  – количество цветов, связанных с переходом  $t_j \in T$ .

Цвета и их приоритеты связаны с каждой позицией  $C(p) \in C$  и каждым переходом  $C(t) \in C$  в сети. Для связи цвета с его приоритетом цвета определяются в порядке убывания приоритетов, а именно: красный ( $\kappa$ ), зеленый ( $\zeta$ ), синий ( $\varsigma$ ), черный ( $\chi$ ), желтый ( $\mathcal{J}$ ) и белый ( $\mathcal{B}$ ). Каждому приоритету этих цветов соответствует числовое обозначение в порядке убывания – 1, 2, 3, 4, 5 и 6, соответственно. Например, запись  $\langle \kappa, 1 \rangle$  отражает красный цвет с максимальным приоритетом.

$F$  – функция цветной кратности  $F(a): A(C) \rightarrow Z$ , описывающая тип и количество цветов, связанных с каждой дугой  $a \in A$ , где  $Z$  – множество целых чисел.

$H$  – множество ингибиторных дуг. При этом  $P_h = \{p_h \mid (p_h, t) \in H\}$  – множество ингибиторных позиций,  $p_h \in P_h$  и  $p_h \subseteq P_h$ . Функция  $H(p_h \langle \text{цвет} \rangle, t): H \rightarrow C(p_h) \times C(t)$  описывает каждую ингибиторную дугу  $H(p_h \langle \text{цвет} \rangle, t)$  во множестве  $H$ .

$\mu$  – функция, описывающая цветные маркеры  $C(t) \in C$  в позиции  $p \in P$ ,  $\mu(p): p \rightarrow \langle I, C(p) \rangle$ . Атрибут  $I$  используется для описания процессов, моделируемых нейроном:

- $\mu(p): p \rightarrow \langle x_i, C(p) \rangle$  – передачи входных данных  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) для  $j$ -го нейрона;
- $\mu(p): p \rightarrow \langle w_i, C(p) \rangle$  – передачи весовых коэффициентов  $w_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) для  $j$ -го нейрона. Маркеры  $x_i$  и  $w_i$  имеют одинаковый цвет;
- $\mu(p): p \rightarrow \langle b_j, C(p) \rangle$  – передачи значения смещения  $b_j$  для  $j$ -го нейрона;



- $\mu(p): p \rightarrow \langle out_j, C(p) \rangle$  – передачи конечного результата с выхода  $j$ -го нейрона;
- $\mu(p): p \rightarrow \langle Вход_i, C(p) \rangle$  – передачи нейрону информации о входных данных  $x_i$ , соответствующих им весовых данных  $w_i$ , и значения смещения  $b_j$ .

$\tau$  – функция времени срабатывания, определяющая время выполнения операций в переходах  $t \in T$  (для каждого цвета).

$OC$  – функция вычисления, определяющая параметры, необходимые для выполнения операций сложения и умножения переходов  $t \in T$  в соответствии с имеющимся цветом  $C(t)$ :

- $OC_{j1}(t): T \rightarrow \langle x_i \times w_i, \tau, C(t) \rangle$  – функция, определяющая параметры для операции взвешивания входных данных:  $x_i \times w_i$ ;

- $OC_{j2}(t): T \rightarrow \langle sum_j, \tau, C(t) \rangle$  – функция, определяющая параметры для операции

сложения взвешенных данных  $j$ -го нейрона:  $sum_j = \sum_{i=1}^n x_i \times w_i$ ;

- $OC_{j3}(t): T \rightarrow \langle sum\_out_j, \tau, C(t) \rangle$  – функция, определяющая параметры для операции суммирования смещения и взвешенных данных  $j$ -го нейрона:  $sum\_out_j = sum_j + b_j$ .

$CT$  – функция связи  $CT(t): T \rightarrow \langle CT_i, \tau, C(t) \rangle$ . Определяет параметры, необходимые для срабатывания «связующих переходов»  $t \in T$  в соответствии с имеющимся цветом. Эти переходы моделируют поведение нейронов при приёме-передаче данных между собой.

$SIG$  – функция вычисления  $SIG(t): T \rightarrow \langle \varphi(sum\_out_j), \tau, C(t) \rangle$ . Определяет необходимые параметры для выполнения переходов  $t \in T$  сигмоидальной функции активации в соответствии с появлением цвета  $C(t)$ . Выходной результат выполнения операции вычисления сигмоидальной функции активации  $\langle out_j, C(p) \rangle$  рассчитывается с помощью атрибута  $\varphi: \varphi(sum\_out_j) = 1/(1 + \exp(-sum\_out_j))$ .

В  $CTPNNSIG$  существует функциональная зависимость между цветовым приоритетом включения переходов и цветовым приоритетом маркеров, размещаемых во входных позициях этих переходов./

**CTPNNSIG-модель искусственного нейрона.**  $CTPNNSIG$ -модель искусственного нейрона представлена на рис. 3. По аналогии с аппаратной моделью на моделируемый нейрон поступают четыре входных сигнала.

Для разрешения воздействия на моделируемый нейрон со стороны соседних нейронов используются ингибиторные дуги  $H(p_4, t_5)$ ,  $H(p_7, t_5)$ . При наличии маркера в позициях  $p_4$ ,  $p_7$  ингибиторная дуга запрещает нейрону получение данных от других нейронов до завершения текущих вычислений моделируемым нейроном. Когда указанные позиции пусты, моделируемый нейрон готов к дальнейшей связи с соседними нейронами.

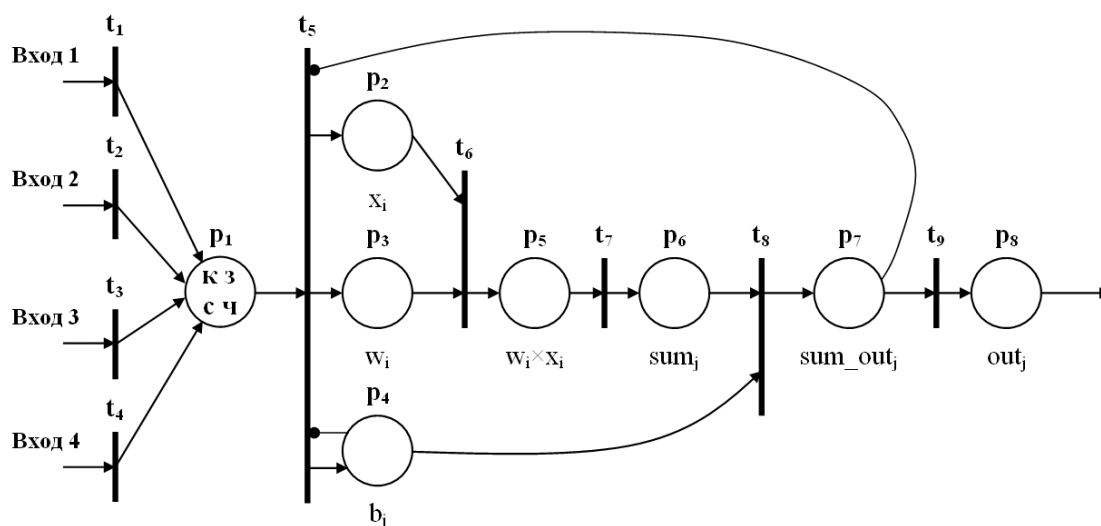


Рис. 3. СТПНNSIG-модель искусственного нейрона

Поясним работу этой модели. В позицию  $p_1$  заносятся поступившие в нейрон входные данные  $\langle \text{Вход}_1, (\kappa, 1) \rangle$ ,  $\langle \text{Вход}_2, (3, 2) \rangle$ ,  $\langle \text{Вход}_3, (c, 3) \rangle$ ,  $\langle \text{Вход}_4, (4, 4) \rangle$ , помеченные цветными маркерами. При отсутствии маркеров в позициях  $p_4$  и  $p_7$ , срабатывает переход  $t_5$ , осуществляя передачу входных сигналов  $x_i$  в позицию  $p_2$ , соответствующих им весовых данных  $w_i$  в позицию  $p_3$  и значения смещения  $b_j$  моделируемого нейрона в позицию  $p_4$ . При этом маркер в позиции  $p_4$  запрещает переходу  $t_5$  принимать новые данные. Переход  $t_5$  выполняет операцию умножения  $w_i \times x_i$  – он последовательно обрабатывает маркеры, согласно их цветовому приоритету, и заносит полученные результаты в позицию  $p_5$ . Переход  $t_7$  выполняет операцию суммирования взвешенных входных сигналов, занося результат  $sum_j$  в позицию  $p_6$  с присвоенным ему максимальным цветовым приоритетом. Переход  $t_8$  производит суммирование маркеров позиций  $p_6$  и  $p_4$ , добавляя к  $sum_j$  смещение.

Полученный результат  $sum\_out_j$  заносится в позицию  $p_7$ . При этом ингибиторная дуга  $H(p_7, t_5)$ , запрещает переходу  $t_5$  получение данных. Переход  $t_9$  производит вычисление сигмоидальной функции активации  $\varphi(sum\_out_j)$  и передает результат  $out_j$  в позицию  $p_8$ . При этом маркер покидает позицию  $p_7$ , снимая запрет для перехода  $t_5$ , и нейрон готов к дальнейшей работе.

**Формальное описание работы модели.** Формальное описание алгоритма работы модели и её динамическое поведение можно представить как множество всех состояний модели, которые могут быть достигнуты ею в определенный момент времени при срабатывании конечного числа переходов.

В исходном состоянии модели  $\text{Сост}_1$  позиция  $p_1$  содержит поступающие в моделируемый нейрон данные, помеченные цветными маркерами:  $\langle \text{Вход}_1, (\kappa, 1) \rangle$ ,  $\langle \text{Вход}_2, (3, 2) \rangle$ ,  $\langle \text{Вход}_3, (c, 3) \rangle$ ,  $\langle \text{Вход}_4, (4, 4) \rangle$ . Каждый цвет присваивает маркерам приоритет для организации последовательности событий на переходах  $t \in T$ .

Состояния модели описываются атрибутами  $MAP_i$ ,  $ПЕР_i$  и  $ИНГ_i$ .

Атрибут  $MAP_i$  показывает распределение маркеров в различных позициях текущего состояния модели в соответствии с функцией  $M_i$ .

Атрибут  $ПЕР_i$  описывает работу переходов в текущем состоянии и имеет три параметра:  $T_{сраб}$  – показывает сработанные переходы,  $T_{зот}$  – новые переходы готовые к срабатыванию и  $T_{мин}$  – отображает минимальное время срабатывания переходов, описываемых атрибутами  $T_{сраб}$  и  $T_{зот}$ . Целью параметра  $T_{мин}$  является оценка общего времени работы переходов до текущего состояния.

Атрибут  $ИНГ_i$  показывает распределение маркеров в ингибиторных местах и надписи на ингибиторных дугах, которые соответствуют текущему состоянию модели в соответствии с функцией  $H_i$ .

Формально состояния модели имеют следующее описание:

$$\begin{aligned} \text{Сост}_1: \quad MAP_1: \mu(p_1) &= \langle \text{Вход}_1, (\kappa, 1), \langle \text{Вход}_2, (3, 2), \langle \text{Вход}_3, (c, 3), \langle \text{Вход}_4, (u, 4) \rangle \rangle \rangle \\ ПЕР_1: T_{мин}: t_5 &= \langle (\kappa, 1), (3, 2), (c, 3), (u, 4) \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Сост}_2: \quad MAP_2: \mu(p_2) &= \langle x_1, (\kappa, 1), \langle x_2, (3, 2), \langle x_3, (c, 3), \langle x_4, (u, 4) \rangle \rangle \rangle, \\ \mu(p_3) &= \langle w_1, (\kappa, 1), \langle w_2, (3, 2), \langle w_3, (c, 3), \langle w_4, (u, 4) \rangle \rangle \rangle, \\ \mu(p_4) &= \langle b_j, (\kappa, 1) \rangle \\ ПЕР_2: T_{мин}: t_5 &= \langle (w_i \times x_i), \tau_1, ((\kappa, 1), (3, 2), (c, 3), (u, 4)) \rangle \\ ИНГ_2: H(p_4) &= \langle \kappa, 1, t_5 \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Сост}_3: \quad MAP_3: \mu(p_2) &= \langle x_2, (3, 2), \langle x_3, (c, 3), \langle x_4, (u, 4) \rangle \rangle, \\ \mu(p_3) &= \langle w_2, (3, 2), \langle w_3, (c, 3), \langle w_4, (u, 4) \rangle \rangle, \mu(p_5) = \langle w_1 x_1, (\kappa, 1) \rangle, \\ \mu(p_4) &= \langle b_j, (\kappa, 1) \rangle \\ ПЕР_3: T_{мин}: t_5 &= \langle (w_i \times x_i), \tau_1, ((\kappa, 1), (3, 2), (c, 3), (u, 4)) \rangle \\ ИНГ_3: H(p_4) &= \langle \kappa, 1, t_5 \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Сост}_4: \quad MAP_4: \mu(p_2) &= \langle x_3, (c, 3), \langle x_4, (u, 4) \rangle \rangle, \\ \mu(p_3) &= \langle w_3, (c, 3), \langle w_4, (u, 4) \rangle \rangle, \mu(p_5) = \langle w_1 x_1, (\kappa, 1), \langle w_2 x_2, (3, 2) \rangle \rangle, \\ \mu(p_4) &= \langle b_j, (\kappa, 1) \rangle \\ ПЕР_4: T_{мин}: t_5 &= \langle (w_i \times x_i), \tau_1, ((\kappa, 1), (3, 2), (c, 3), (u, 4)) \rangle \\ ИНГ_4: H(p_4) &= \langle \kappa, 1, t_5 \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Сост}_5: \quad MAP_5: \mu(p_2) &= \langle x_4, (u, 4) \rangle, \\ \mu(p_3) &= \langle w_4, (u, 4) \rangle, \mu(p_5) = \langle w_1 x_1, (\kappa, 1), \langle w_2 x_2, (3, 2), \langle w_3 x_3, (c, 3) \rangle \rangle \rangle, \\ \mu(p_4) &= \langle b_j, (\kappa, 1) \rangle \\ ПЕР_5: T_{мин}: t_5 &= \langle (w_i \times x_i), \tau_1, ((\kappa, 1), (3, 2), (c, 3), (u, 4)) \rangle \\ ИНГ_5: H(p_4) &= \langle \kappa, 1, t_5 \rangle \end{aligned}$$

- Сост<sub>6</sub>:**  $MAP_6 : \mu(p_5) = \langle w_1x_1, (\kappa,1) \rangle, \langle w_2x_2, (3,2) \rangle, \langle w_3x_3, (c,3) \rangle, \langle w_4x_4, (y,4) \rangle,$   
 $\mu(p_4) = \langle b_j, (\kappa,1) \rangle$   
 $ПЕР_6 : T_{мин} : t_7 = \langle sum_j, \tau_2, ((\kappa,1), (3,2), (c,3), (y,4)) \rangle$   
 $ИНГ_6 : H(p_4 \langle \kappa,1 \rangle, t_5)$
- Сост<sub>7</sub>:**  $MAP_7 : \mu(p_6) = \langle sum_j, (\kappa,1) \rangle,$   
 $\mu(p_4) = \langle b_j, (\kappa,1) \rangle$   
 $ПЕР_7 : T_{мин} : t_8 = \langle (sum_j + b_j), \tau_3, (\kappa,1) \rangle$   
 $ИНГ_7 : H(p_4 \langle \kappa,1 \rangle, t_5)$
- Сост<sub>8</sub>:**  $MAP_8 : \mu(p_7) = \langle (sum\_out_j), (\kappa,1) \rangle$   
 $ПЕР_8 : T_{мин} : t_9 = \langle \phi(sum\_out_j), \tau_4, (\kappa,1) \rangle$   
 $ИНГ_8 : H(p_7 \langle \kappa,1 \rangle, t_5)$
- Сост<sub>9</sub>:**  $MAP_9 : \mu(p_6) = \langle out_j, (\kappa,1) \rangle$

### Выводы

Достоинство предложенной модели состоит в использовании сигмоидальной функции активации, позволяющей исключить насыщение нейрона от больших сигналов, а также обеспечить возможность производить обучение нейронной сети в реальном масштабе времени при аппаратной реализации.

Модель в сравнении с известными является более адекватной процессам, реализуемым искусственными нейронами. В качестве входных и выходных сигналов могут быть не только бинарные сигналы, но и любые другие. Это позволяет достаточно полно обеспечивать свойства искусственного нейрона, необходимые при разработке конфигурации желаемой ИНС, с последующей аппаратной реализацией на ПЛИС.

Формальное описание функционирования модели представляет собой довольно простой метод для разработки и проверки алгоритмов обучения и диагностики, которые могут применяться на модели. Результаты анализа таких свойств сети, как условия выполнения переходов и время срабатывания переходов, проверяют реальную динамику функционирования модели.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Himavathi S., Anitha D., Himavathi S. Feedforward Neural Network Implementation in FPGA Using Layer Multiplexing for Effective Resource Utilization. Muthuramalingam A. // IEEE Transactions on Neural Networks. 2007. Vol.18. No.3. P. 880-888.
2. Грибачев В.П. Элементная база аппаратных реализаций нейронных сетей // Компоненты и технологии. 2006. №8. С. 12-15.
3. Lee Y., Ko S.-B. FPGA Implementation of a Face Detector Using Neural Networks // IEEE CSECE/CCGEI. Ottawa. 2006. P. 1914-1917.
4. Sahin S., Becerikli Y., Yazici S. Neural Network Implementation in Hardware Using FPGAs // ICONIP 2006. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. Part III. P. 1105-1112.
5. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.

6. Koriem S.M. CN-Nets for Modeling and Analyzing Neural Networks // Journal of King Saud University. Computer & Information Sciences. 2001. Vol.13. №1. P. 19-47.

7. Крюкова Д.Ю., Суконщиков А.А. Разработка системы моделирования сложных систем на базе нейронных сетей Петри // Актуальные проблемы управления и экономики: история и современность: мат. науч. конференции. Вологда: филиал СЗАГС, 2006. С. 144-148.

8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2е издание. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

9. Omondi A., Rajapakse J., Bajger M. FPGA Implementations of Neural Networks. Berlin: Springer, Germany, 2006. 360 p.

**Маршаков Даниил Витальевич** – аспирант Донского государственного технического университета, ассистент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность» института энергетики и машиностроения Донского государственного технического университета

**Marshakov Daniil Vital'evich** – Postgraduate Student of Don State Technical University, Technical Assistant of the Department “Computing Systems and Information Security”, Institute of Energy and Machine Building of Don State Technical University

**Фатхи Денис Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник 1 научно-исследовательской лаборатории Ростовского военного института ракетных войск

**Fatkhi Denis Vladimirovich** – Candidate of Technical Science, Senior Research Worker of 1<sup>st</sup> Research Laboratory, Rostov Military Institute of Rocket Forces.

*Статья поступила в редакцию 20.03.2011, принята к опубликованию 20.08.2011*

**А.А. Митрофанов**

**ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА РАСПОЗНАЮЩИХ ПРИЗНАКОВ  
ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСАХ**

*В статье рассматривается задача распознавания образов при ограниченных ресурсах. Предлагается метод оптимизации выбора распознающих признаков на основе информации об их эффективной распознающей способности в текущий момент времени. В результате строится тест с оптимальными затратами времени на измерение значений признаков.*

Распознавание образов, ограничения на ресурсы, оптимизация

**A.A. Mitrofanov**

**ON ONE OPTIMIZATION METHOD OF THE CHOICE OF RECOGNIZING SIGNS  
AT THE LIMITED RESOURCES**

*The article is about recognition problem of pattern recognition at the limited recourse. The optimization method of the choice of recognizing signs is offered. The sign is gets out depending on the information about effective recognizing ability of sign at the moment. As a result the test with the minimum time expenses for calculation of signs values is constructed.*

Pattern recognition, resource limits, optimization

Одной из наиболее важных и часто решаемых задач в человеческой деятельности является задача распознавания образов (объектов, явлений или процессов). Основная задача распознавания образов – построение на основе систематических теоретических и экспериментальных исследований эффективных методов отнесения объектов к соответствующим классам образов.

Образ – наименование области в пространстве признаков, в которой отображается множество объектов или явлений материального мира, выделенное в соответствии с определенной целью. Признак – количественное или качественное описание свойства (параметра) исследуемого предмета или явления.

Будем рассматривать задачу распознавания в рамках следующей схемы. Пусть имеется некоторый объект  $A$ , который может принадлежать какому-то классу объектов  $v_j \in V (j = \overline{1, m}; m = |V|)$ . Классы характеризуются набором параметров-признаков  $x_i \in X (i = \overline{1, n}; n = |X|)$ , где  $X$  – множество признаков, описывающих объекты. Некоторые наборы значений этих признаков  $\alpha = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  описывают класс  $v_j$ . Эти наборы как строки составляют матрицу  $T_j$ . В свою очередь совокупность подматриц  $T_j$  образует матрицу  $T$ , которая описывает все классы объектов. Для того чтобы определить, какой класс описывается конкретным набором значений признаков, нужно проверить, в какую подматрицу  $T_j$  этот набор входит. Решение этого вопроса называют задачей распознавания [1].

Практическое использование математической теории распознавания образов связано с различными трудностями, обусловленными особенностями предметных областей. Как правило, такие особенности выражаются в виде ограничений на распознавание при выборе признаков распознавания. Самыми значимыми для практических приложений являются ограничения в затратах ресурсов и времени при измерении значений признаков распознаваемых объектов и соответствующие им задачи оптимизации распознавания при ограничениях ресурсов и времени.

Пусть  $\sigma \subseteq X$  – набор признаков,  $T_{j,\sigma}$  – часть таблицы  $T_j$ , образованная столбцами, соответствующими  $\sigma$ , а  $T_\sigma$  – все  $T_{j,\sigma}$ . Тогда набор  $\sigma$  образует тест для  $T$ , если  $T_{j,\sigma}$  и  $T_{k,\sigma}$  не имеют общих строк при  $j \neq k$ . Тест называется тупиковым, если никакое его собственное подмножество не является тестом.

Обозначим через  $\tau_i$  затраты времени на выполнение работы  $b_i$  по измерению значения признака  $x_i$ . Предполагается, что продолжительность пары последовательно выполняемых работ  $b_1, b_2$  по измерению значений признаков есть:

$$\xi_{(b_1, b_2)} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{\Delta_{1,2}}, \quad (1)$$

где  $\tau_1$  – продолжительность работы  $b_1$ ,  $\tau_2$  – продолжительность работы  $b_2$ ,  $\tau_{\Delta_{1,2}}$  – промежуток времени между работами  $b_1$  и  $b_2$ .

В случае параллельного выполнения работ затраты времени определяются по формуле:

$$\xi_{(b_1, b_2)} = \max(\tau_1, \tau_2). \quad (2)$$

Очевидно, что уменьшения затрат времени можно достичь путем увеличения числа параллельно выполняемых работ. При этом существуют естественные ограничения на возможность одновременного выполнения определенных работ. Одной из моделей, описывающих комплекс связанных между собой работ, выполняемых последовательно или параллельно, является сетевой график работ (СГР) [2].

Сетевой график работ – это ациклический орграф (сеть) без тупиков, в котором каждая работа (процесс) обозначается дугой, ориентированной по направлению выполнения проекта, а вершины графа, называемые событиями, устанавливают отношения предшествования среди работ. Событие – точка на временной оси, в которой завершается одна работа и начинается другая, соответствующие моменты времени обозначим через  $t_1, t_2, \dots, t_l$ . Путь – последовательность различных дуг в СГР, в которой конечная вершина каждой предшествующей дуги совпадает с начальной вершиной следующей дуги.

Для построения СГР используется следующая информация:

1. Список признаков  $x_i \in X (i = \overline{1, n}; n = |X|)$ , где  $X$  – множество признаков, описывающих объекты. Список представляет собой таблицу, строки которой соответствуют классам объектов, а столбцы – признакам. Значения в ячейках определяют значения признаков объектов, относимых к соответствующему классу.

2. Список работ  $b_i \in B$  по измерению значений соответствующих признаков с указанием длительностей  $\tau_i$  выполнения этих работ.

3. Список обязательных/недопустимых последовательностей работ, определяющий взаимное расположение определенных работ в СГР. Этот список содержит пары работ, которые могут определять отношение одного из 3-х видов:

$\delta_1 \subset B \times B$  – соответствует строго установленному порядку выполнения работ в непересекающиеся периоды времени;

$\delta_2 \subset B \times B$  – соответствует любому порядку выполнения работ в непересекающиеся периоды времени;

$\delta_3 \subset B \times B$  – соответствует паре работ, выполняемых в пересекающиеся периоды времени.

Необходимо оптимальным по времени образом вычислить набор признаков, однозначно определяющий класс объекта, стремясь при этом к эффективному использованию ресурсов в рамках СГР.

Принятие решения о выборе признака на каждом этапе производится на основе значений эффективной распознающей способности признаков в настоящий момент времени  $t$ .

Для вычисления значения эффективной распознающей способности выбираемого признака будем использовать функцию  $P: X \rightarrow R_+$ :

$$P(x_i, t) = \frac{J_{(x_i|t)}}{\xi_{(x_i|t)}}, \quad (3)$$

где  $J_{(x_i|t)}$  – значение распознающей способности признака  $x_i$  в момент времени  $t$  относительно объектов, принадлежащих классам, не разделяемым признаками, включенными на предыдущих шагах;

$\xi_{(x_i|t)}$  – длина пути, включающего в себя работу  $b_i$  по измерению значения признака  $x_i$ .

Чаще всего значение  $J_{x_i}$  определяется как число тупиковых тестов, содержащих признаки, включенные в СГР на предыдущих шагах [3]. Значение  $\xi_{(x_i|t)}$  определяется по формуле:

$$\xi_{(x_i|t)} = \beta_i + \tau_{(i|t)} - R_i, \quad (4)$$

где  $\beta_i$  – длина пути до включения в него работы  $b_i$ ;  $\tau_{(i|t)}$  – продолжительность работы  $b_i$  в момент времени  $t$ ;  $R_i$  – полный резерв времени в ветви разветвленного участка пути СГР, в которую будет введена работа  $b_i$ .

Полный резерв времени определяется в соответствии с методом критического пути [4].

При наступлении очередного события, соответствующего завершению работы в момент времени  $t$ , в формируемое множество  $Q_t \subset X$  добавляется признак  $x_i$ , удовлетворяющий равенству:

$$P(x_i, t) = \max_{k \in X \setminus Q_{t-1}} (P(x_k, t)). \quad (5)$$

Параллельно может быть организованно вычисление значений признаков, длительность работ по измерению которых не превосходит  $\tau_i$ . Признаки, включенные в  $\delta_1$  и  $\delta_2$  в паре с одним из признаков, добавленным в  $Q_t$  ранее, не рассматриваются.

Добавление новых признаков в СГР прекращается, когда после очередного шага установлено что полученный набор признаков  $Q_t$  позволяет однозначно определить класс объекта. Предполагается, что набор  $Q_t$  представляет собой тест, обеспечивающий минимальные затраты времени на измерение значений признаков [5]. Критический путь в СГР определяет общую длительность комплекса работ по измерению значений признаков, включенных в тест. Очевидно, однако, что решение по предложенному методу оптимально на каждом шаге, хотя может и не быть оптимальным в целом.

Таким образом, предложенный метод выбора признаков на основе значений их эффективных распознающих способностей оптимизирует процесс вычисления значений распознающих признаков по времени.



ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев В.Б., Андреев А.Е., Гасанов Э.Э.. Теория тестового распознавания. М.: Физматлит, 2007. 320 с.
2. Голенко Д.И. Статистические методы сетевого планирования и управления. М.: Наука, 1968. 400 с.
3. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А.. Современное состояние проблемы распознавания. М.: Радио и связь, 1985. 160 с.
4. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций. 7-е издание. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 912 с.
5. Бродская Ю.А. Распознавание образов при заданных ограничениях // Доклады 11-ой всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов». М.: ВЦ РАН, 2003. С. 30-33.

**Митрофанов Андрей Андреевич** – аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» Саратовского государственного технического университета

**Mitrofanov Andrey Andreevich** – Post-graduate Student of the Department “Information Systems and Technology”, Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 25.02.2011, принята к опубликованию 20.08.2011*

УДК 004.896:004:41

**И.Ю. Зинаков****ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
КОНФИГУРАЦИЕЙ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ**

*Описан процесс управления конфигурацией как часть инженерии программного обеспечения. Анализ различных реализаций систем управления конфигурацией показывает необходимость применения одноранговой распределённой архитектуры. Такая архитектура может быть реализована на основе мультиагентных систем с применением интеллектуальных агентов. Рассмотрены базовые механизмы мультиагентных систем и предложены модели применения и взаимодействия различных типов агентов.*

Инженерия программного обеспечения, интеллектуальные агенты, мультиагентные системы, анализ сложных систем, системный анализ

**I.Yu. Zinakov****CONSTRUCTION OF THE SYSTEM SOFTWARE  
CONFIGURATION MANAGEMENT PLATFORM  
USING INTELLIGENT AGENTS**

*The process of configuration management as part of software engineering. Analysis of the different implementations of configuration management systems indicates the need for a peer to peer distributed architecture. This architecture can be implemented using multi-agent systems using intelligent agents. Examined the basic mechanisms of multi-agent systems and proposed models of interaction and different types of agents.*

Software engineering, intelligent agents, multi-agent systems, the analysis of complex systems, systems analysis

В сложных распределённых программных системах существует необходимость в автоматизированном сопровождении процесса эксплуатации программного комплекса как единого целого. При этом часто сложные программные комплексы содержат разнородные программные системы и требуют различного подхода к конфигурированию, что ранее достигалось консервативными средствами, а именно работой различных технических специалистов, что обычно занимает много времени при исполнении и существенно менее надёжно из-за наличия человеческого фактора при относительно большом объеме рутинных операций.

Поэтому в процессе эксплуатации программного комплекса, в рамках задачи инженерии программного обеспечения, выделяют процесс управления версиями и набором настроек, обобщенно называемых конфигурацией программного обеспечения.

Управление конфигурацией, согласно стандарту ISO 12207, является процессом применения административных и технических процедур на всем жизненном цикле программных средств для обозначения, определения и установления состояния базовой версии программных продуктов в системе; управления изменениями и выпуском объектов;

описания и информирования о состояниях объектов и заявок на внесение изменений в них; обеспечения полноты, совместимости и правильности объектов; управления хранением, обращением и поставкой объектов [7].

Системой управления конфигурацией будем называть технический комплекс, на основе которого осуществляется процесс управления конфигурацией.

Многие существующие системы управления конфигурацией программного комплекса построены на основе распределённой [2] клиент-серверной архитектуры [3]. Выбор архитектуры обычно predetermined техническими требованиями, однако главной особенностью и недостатком этой схемы является наличие сложного централизованного сервера, от которого во многом зависит работоспособность всего программного комплекса и клиентских модулей. Для того чтобы исключить зависимость системы от одного центрального узла, необходимо применять резервирование, либо декомпозицию и частичное распределение серверных функций по нескольким серверным узлам, что неизбежно приведёт к увеличению стоимости системы.

Другим подходом является применение одноранговой архитектуры, что в терминах клиент-серверной архитектуры требует наличия в узле одновременно и клиентской, и серверной частей.

Современные подходы к процессу эксплуатации программного комплекса требуют внедрения [1] систем управления конфигурацией программного обеспечения (англ. software configuration management или SCM). Система управления конфигурацией в общем случае включает: планирование и управление, идентификацию, контроль, инвентаризацию, верификацию и аудит (рис. 1).

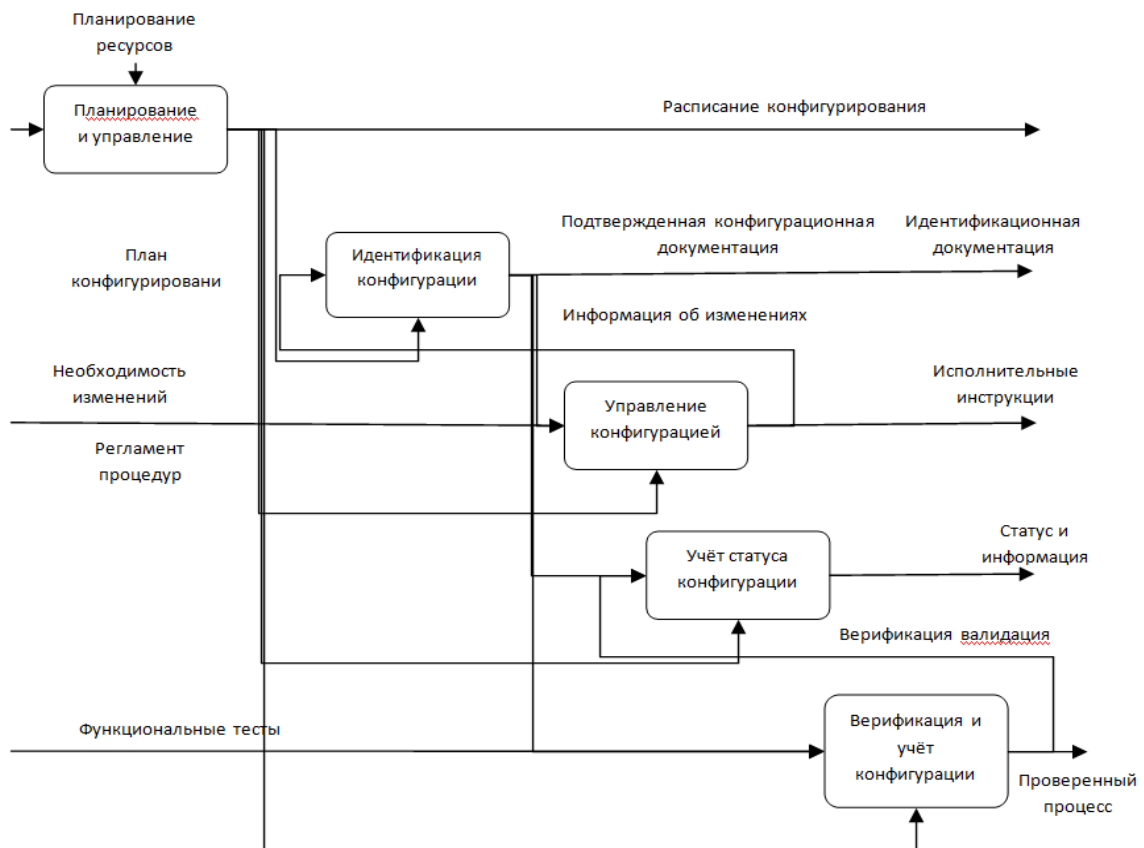


Рис. 1. Система управления конфигурацией. Верхний уровень

Согласно рис. 1, с точки зрения системного анализа, современные системы управления конфигурацией программного обеспечения можно представить как совокупность множеств исполнительных клиентских модулей  $M$ , управляемых программ  $E$ ,

централизованных серверов  $C$ , специалистов-администраторов  $S$  и конечных пользователей  $U$ , в результате:

$$SCM_1 = \{M, E, C, S, U\}. \quad (1)$$

При применении одноранговой архитектуры на клиентские модули  $M$  распределяются серверные функции  $C$ . В результате получаем множество автономных программных модулей  $A$ , определяемые как  $A = C \cup M$ , при этом  $A = \{A_c, S_n, M_p, L\}$ , где  $A_c$  – множество исполнительных алгоритмов,  $S_n$  – сенсорных алгоритмов,  $M_p$  – алгоритмов и протоколов связи с агентной платформой и  $L$  – алгоритмов логики агентов. Для одноранговой агентной системы получаем:

$$SCM_2 = \{A, E, S, U, P\}, \quad (2)$$

где  $P$  – множество алгоритмов агентной платформы.

Поэтому для преодоления вышеуказанных недостатков целесообразно применение мульти-агентного подхода к построению систем управления конфигурацией распределенных систем. При этом необходимо использовать существующий международный опыт и разработки, представленные в виде открытых спецификаций в области синтеза архитектуры мульти-агентных систем. Кратко рассмотрим их.

Согласно существующим требованиям к открытым архитектурам мульти-агентных систем, описанных в FIPA-спецификациях [4], платформа состоит из контейнеров агентов, распределенных по сети. Агенты расположены в контейнерах, которые, являясь процессами, обеспечивают выполнение модуля платформы  $P$  и всех служб, необходимых для размещения и работы агентов. Существует специальный контейнер, называемый *Главный Контейнер*, который представляет собой загрузочную точку платформы и является первичным запускаемым контейнером. Другие контейнеры должны присоединяться к основному контейнеру, регистрируясь в нём. В UML диаграмме на рис. 2 схематично представлены отношения между главными архитектурными элементами платформы.

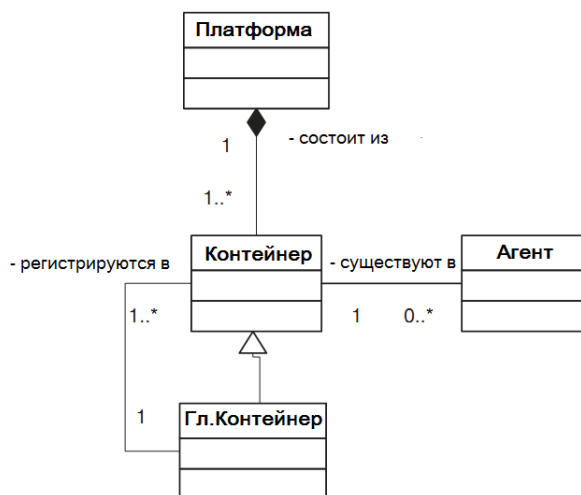


Рис. 2. UML-диаграмма

В момент загрузки Главный Контейнер [5] выполняет следующие специальные функции:

- управление таблицей контейнеров ( $CT$ ), которая регистрирует описания объектов и транспортные адреса всех контейнерных узлов, входящих в состав платформы;
- управление Глобальной Таблицей Описания Агентов ( $GADT$ ), которая является реестром всех агентов, представляющих платформу, в том числе их нынешнего состояния и местоположения;

- размещение *AMS* (агент управления системой) и *DF* (агент каталога-посредника), двух специальных агентов, которые обеспечивают управление и поддержку справочной службы и стандартной службы объявлений платформы.

Основными элементами этого идентификатора агента является имя агента и его адрес.

Имя агента является глобально уникальным идентификатором, которое состоит из пользовательского псевдонима и имени платформы. Адреса агентов передаются от адресов, унаследованных от платформы, в которой каждый адрес платформы соответствует протоколу МТР (Протокол передачи сообщений) и конечному пункту, где FIPA-совместимые сообщения могут быть отправлены и получены.

Для поддержки взаимодействия между разными платформами в разрабатываемой системе управления конфигурацией программных комплексов реализуются все стандартные протоколы обмена сообщениями, определяемыми в FIPA [6], где каждый сервис МТР включает определение транспортного протокола и стандарт кодирования сообщений в пакете. Для внутреннего сообщения между агентами одной платформы используется Внутренний Сервис Передачи Сообщений (IMTP), который в общем случае не совместим с протоколами МТР FIPA и учитывает только специфику агентов конкретной платформы.

В рамках мультиагентной системы существуют различные подходы к использованию различных видов агентов, гибридизации типов агентов и моделей взаимодействия агентов различных типов.

Агенты с жёсткой логикой, настроенные только реакционно на внешние раздражители, плохо применимы при частом изменении конфигурации информационной системы и в условиях обеспечения стабильности работы, поэтому целесообразно применять различные модификации интеллектуальных агентов, однако применение элементарных агентов оправдано для выполнения функций конечных исполнителей: сенсоров и акторов.

Интеллектуальные агенты имеют важные характеристики: рефлексивность, как свойство системы, позволяющее анализировать результаты собственной деятельности отдельно от изменения окружающего мира; самообучаемость; управление целями поведения; планирование целей. Перечисленные выше характеристики и требования к агентной системе соответствуют логической архитектуре интеллектуальных агентов. Интеллектуальные агенты, построенные на основе BDI-модели [8], включают представления как информацию о закономерностях и состоянии внешней среды; множество всех целей и подцелей агента и множество целей, достигаемых в заданный момент.

В соответствии с архитектурой интеллектуальных агентов и агентной моделью, в нашем случае предлагается, что основу системы управления конфигурацией должны составить резидентные агенты, связанные с локальными хостами, которые содержат представления о спецификации аппаратных и программных средств, а также ожидания пользователей от функциональности конкретной локальной вычислительной системы и её связи с сетью. Резидентные агенты также должны обладать целями, наиболее важными среди которых являются следующие:

- поддержка актуальности версий используемых программ;
- поддержка стабильности локального программного комплекса;
- минимизация использования процессорного времени, загрузки каналов связи;
- уменьшение простоев в работе, связанных с конфигурированием программ.

В соответствии с предложенной моделью интеллектуальные агенты реализуют различные протоколы передачи сообщений – для взаимодействия с обычными типами агентов, а также для взаимодействия между интеллектуальными типами агентов. Протокол передачи сообщений между интеллектуальными типами агентов предусматривает передачу элементов формализованных знаний в мультиагентной системе.

Применение предложенной архитектуры системы управления конфигурацией с интеллектуальными агентами целесообразно в сложных, распределённых программных комплексах в условиях часто изменяющихся конфигураций программных средств и инфраструктуры сети.

Элементы предложенного подхода реализованы в прототипном варианте, который успешно апробирован на Приволжской железной дороге при внедрении системы управления конфигурацией разнородным комплексом программ автоматизации бухгалтерского и оперативного учета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bersoff E.H. Elements of Software Configuration Management. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1997. P. 32.
2. George Reese. Database Programming with JDBC and Java, Second Edition. Sun Microsystems. 2009. P. 145.
3. Васкевич Д. Стратегии клиент/сервер. Киев: Диалектика, 1997. 410 с.
4. FIPA Abstract Architecture Specification, <http://www.fipa.org/> Geneva, Switzerland, 2005. P. 35.
5. FIPA Agent Management Specification, <http://www.fipa.org/> Geneva, Switzerland, 2004. P. 52.
6. FIPA Agent Message Transport Service Specification, <http://www.fipa.org/> Geneva, Switzerland, 2001. P. 62.
7. Липаев В.В. Программная инженерия. Методологические основы. М.: Тэис, 2006. 608 с.
8. Burmeister B., Sundermeyer K. Cooperative problem-solving guided by intensions and perception, edited by E. Werner and Y. Demazeau, Decentralized A.I. 3. – Amsterdam, The Netherlands, North Holland, 1992. P. 81.

**Зинаков Иван Юрьевич** –  
аспирант кафедры «Системы искусственного  
интеллекта» Саратовского государственного  
технического университета

**Zinakov Ivan Yur'evich** –  
Post-graduate Student, Department of  
“Systems of an artificial intellect”, Saratov  
State Technical University

*Статья поступила в редакцию 21.01.2011, принята к опубликованию 20.06.2011*

УДК 656.1+519.21

**М.М. Ахмадинуров, Г.А. Тимофеева****МОДЕЛИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СВЕТОФОРА**

*Рассмотрен метод нахождения оптимальных параметров светофора основанный на теории систем массового обслуживания. Рассмотрены вопросы существования стационарного режима. Для уточнения модели используется имитационная программа. В программе применяется микроскопическое моделирование, входящие потоки автотранспорта моделируются как простейшие. Оптимизация параметров цикла проводится на основе многокритериального подхода.*

Управление транспортными потоками, системы массового обслуживания, имитационное моделирование, транспортная сеть, светофор, перекресток, микромоделирование

**М.М. Ahmadinurov, G.A. Timofeeva****QUEUING THEORY MODELS IN OPTIMIZATION PROBLEM OF TRAFFIC LIGHTS**

*The method of the optimization of traffic lights cycle is considered on the base of the queuing theory. Stationary regimes of the operation of the queuing system are studied. To qualify the model a imitating compute program is suggested. The research work is directed to the solving for optimum traffic light parameters under given car flow intensities. The program uses a microscopic simulation. The flows of vehicles coming to an intersection are assumed to be Poisson. The optimization is done on multi-criteria approach.*

Control of traffic flows, queuing systems, imitating modeling, transport network, traffic flow, traffic light, intersection, microscopic models

**Введение**

Проблема перегруженности автомагистралей является одной из важнейших для большинства современных мегаполисов. Ежегодно на развитие транспортных магистралей затрачиваются существенные средства. С другой стороны, не исчерпаны возможности улучшения ситуации на отдельных участках дорожной сети за счет оптимизации регулирующих циклов на перекрестках. Последнее направление требует меньших финансовых затрат, чем строительство новых и расширение старых дорожных развязок.

Проблемы нахождения основных характеристик транспортного потока, следующего через перекресток, и на этой основе вычисление оптимальных параметров цикла исследуются систематически, начиная с известной работы Вебстера [1]. К настоящему времени количество публикаций по данной тематике исчисляется сотнями, в разных странах выпускаются учебники и монографии, посвященные проблемам оптимального регулирования потоков автотранспорта (например, [2]).

Одним из возможных направлений моделирования движения транспортных потоков через регулируемый перекресток является теория Марковских процессов с непрерывным временем. Среди актуальных постановок задачи оптимального управления циклом светофора можно выделить следующие направления: адаптивное регулирование циклом, совместное рассмотрение нескольких перекрестков, исследование устойчивых режимов работы.

Адаптивное управление переключениями сигналов светофора предполагает установку датчиков длины очереди (или просто наличия ожидающих автомашин). Среди работ данного направления отметим оригинальный метод регулирования, предложенный в [3] и состоящий в том, что светофор переключается на зеленый сигнал, как только в заданном направлении исчезает очередь. Отметим, что режим такого адаптивного управления позволяет максимально использовать дорожную сеть, однако не экономит время проезда, так как каждый автомобиль вынужден остановиться на перекрестке. Такой режим оправдан в случае, когда дорожная сеть работает на границе своей пропускной способности. Другим важным направлением улучшения управления потоками автотранспорта является организация «зеленой волны», создание приоритетов для общественного транспорта и т.д. [4].

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим перекресток с равным числом пересекающихся полос. С каждой стороны перекрестка, на определенном расстоянии от него, начинают движение автомобили с известными интенсивностями  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ . Причем направления движения 1 и 3 являются перпендикулярными по отношению к направлениям 2 и 4.

Введем следующие обозначения:  $T$  – продолжительность цикла светофора,  $\tau_1$  – продолжительность красного сигнала для первого направления движения ( $\lambda_1, \lambda_3$ ),  $\tau_2$  – продолжительность красного сигнала для противоположного направления движения ( $\lambda_2, \lambda_4$ ). Продолжительность желтого сигнала обозначим  $\tau_0$ , обычное значение этого параметра в России равно 3 секунды [5].

Таким образом, продолжительность цикла светофора равна:

$$T = (\tau_1 + \tau_0) + (\tau_2 + \tau_0) = \tau_1 + \tau_2 + 2\tau_0. \quad (1.1)$$

Необходимо определить, как нужно настроить параметры светофора  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , чтобы пропускная способность во всех четырех направлениях была оптимальной. В данной статье будем рассматривать только программные управления, то есть предполагается, что параметры цикла светофора  $\{T, \tau_0, \tau_1, \tau_2\}$  выбираются на некоторый, достаточно длительный период времени постоянными.

Для постановки и решения задачи оптимального выбора цикла светофора были исследованы следующие проблемы: распределение входного потока автомобилей, описание проезда автомобиля через перекресток; построение математической и имитационной моделей движения транспортных потоков через перекресток; выбор целевых функций, которые следует минимизировать при выборе цикла светофора. Среди таких критериев – среднее время простоя автомобилей, т.е. сколько времени в среднем автомобиль не двигается (скорость равна нулю) на данном дорожном участке. Возможен учет всех временных потерь



водителей, возникающих с момента начала движения автомобиля до полного пересечения перекрестка. Другими критериями являются характеристики длины очереди. Здесь также возможны различные варианты: в качестве критерия можно выбрать максимальную длину очереди в течение цикла, среднюю суммарную длину очереди, а также вероятность того, что квартал в каком-нибудь из направлений будет полностью занят и т.п.

## 2. Описание математической модели

Традиционно авторы [1, 3], использующие модели массового обслуживания для описания работы регулируемого перекрестка, берут за основу систему с неограниченной очередью. В этом случае для существования стационарного режима работы необходимо выполнение ограничений на интенсивности входящих потоков автотранспорта, которые не выполняются в условиях перегруженной дорожной сети. Для преодоления этой проблемы в работе [6] была предложена оригинальная математическая модель, основанная на системах обслуживания с ограниченной очередью. В предложенной модели с ограниченной очередью стационарный режим работы существует всегда, что позволяет находить основные характеристики работы системы и решать задачу их оптимизации [7], не накладывая дополнительных ограничений на интенсивности входных потоков.

В качестве модели перекрестка далее рассматривается совокупность взаимосвязанных систем массового обслуживания (СМО) ограниченными очередями и с изменяющимися интенсивностями обслуживания. Будем считать, что машины, движущиеся в одном направлении, обслуживаются одной СМО. Получаем, что стандартный перекресток на пересечении двух перпендикулярных дорог представляет собой совокупность 4-х систем массового обслуживания. Используя предлагаемый подход, можно рассматривать и более сложные циклы регулирования с выделенным поворотом в одном или нескольких направлениях. При детализации модели нужно учесть и очереди, возникающие из автомашин, совершающих поворот на перекрестке.

Будем использовать модель с переменной интенсивностью обслуживания: в период, когда проезд запрещен в  $i$ -ом направлении, то есть горит красный сигнал светофора, интенсивность обслуживания  $\mu_i(t)$  равна нулю. В случае, когда включен разрешающий сигнал светофора, обслуживанием заявки (автомобиля) будем считать проезд им стоп-линии и освобождение места для следующей машины. Количество мест в очереди  $n_i$  в каждом направлении будет равно количеству автомобилей, которые могут поместиться в предшествующем квартале на всех полосах:

$$n_i = \frac{L_i \cdot m_i}{l}, \quad (2.1)$$

где  $L_i$  – длина квартала,  $l$  – длина автомашины вместе с дистанцией (в среднем).

Обычные значения количества мест в очереди в городских условиях 20-80 автомобилей. При таком подходе предполагается, что машина, подъехавшая в момент, когда весь квартал занят, покидает систему. Числом обслуживающих каналов  $m_i$  будет количество полос для проезда перекрестка в одну сторону,  $m_i = 1, 2, 3$ .

Исследования входного потока автомобилей на нескольких перекрестках г. Екатеринбурга показывают [8], что в случае свободного движения автомобилей поток подъезжающих автомашин хорошо описывается простейшим (Пуассоновским) потоком при выполнении двух условий:

1. относительно малой интенсивности входного потока  $\lambda < 0,5$  автомашин/сек;
2. расстояние от ближайшего регулируемого перекрестка достаточно большое, а следовательно, количество мест в очереди значительно, например, для одноканальной системы  $n \geq 30$ .

При увеличении плотности входного потока, в соответствии с фундаментальной диаграммой [9], его скорость снижается, расстояние между автомобилями перестает быть случайным и приближается к детерминированному потоку. Для моделирования потока в таких случаях можно использовать поток Эрланга или детерминированный поток. В случае, когда расстояние до предыдущего регулируемого перекрестка мало, поток теряет свойства простейшего, так как автомобили двигаются «пакетами», и здесь можно применить модель следования за лидером.

Предположение о показательном распределении входного потока используют и другие авторы [1, 3, 10]. Далее будем считать, что поступающие потоки автомашин являются простейшими с интенсивностями  $\lambda_i$  автомобилей в секунду, обозначим через  $\mu_i$  интенсивности обслуживания при разрешающем сигнале светофора. Отметим, что параметры системы разделяются на три группы:

1. постоянные характеристики перекрестка:  $m_i$  – количество полос движения;  $n_i$  – максимальная длина очереди;
2. переменные:  $\lambda_i$  – интенсивности входных потоков;  $\mu_i$  – интенсивность  $i$ -го потока обслуживания в зеленой фазе;
3. управляемые: продолжительность цикла светофора и его фаз:  $T$  и  $\tau_1, \tau_2, \tau_0$ .

Статистические наблюдения показали, что интенсивности входных потоков  $\lambda_i$  существенно меняются в течение суток и в зависимости от других факторов, а интенсивности обслуживания  $\mu_i$  меняются незначительно.

В качестве выходных характеристик работы системы можно рассматривать: средние потери времени, приходящиеся на один автомобиль при пересечении данного перекрестка; вероятность того, что хотя бы в одном направлении образуется затор; общее количество автотранспорта на перекрестке и прилегающих кварталах в среднем и т.д.

### Описание СМО для одного направления

Рассмотрим более подробно  $\Omega_i$  – систему массового обслуживания (СМО), описывающую проезд в одну сторону. В качестве обслуживания будем рассматривать проезд автомобилем перекрестка, более точно – проезд стоп-линии и освобождение места для проезда следующей автомашины.

Следуя обычной технологии применения СМО, интенсивность обслуживания определяется на основе статистических данных о среднем времени обслуживания  $\theta_i$ . Тогда интенсивность обслуживания равна  $\mu_i = (\theta_i)^{-1}$ . В статье [6] были рассмотрены два варианта моделирования интенсивности обслуживания: кусочно-постоянная и переменная интенсивность обслуживания. Для иллюстрации предлагаемого подхода построим математическую модель движения по перекрестку, считая, что он образован простым пересечением 2-х однополосных дорог. Рассмотрим подробно, как происходит изменение состояния системы в одном  $i$ -ом направлении для случая кусочно-постоянной интенсивности обслуживания.

Состояниями рассматриваемой СМО являются:

$S_i^{(0)}$  – отсутствие автомашин в данном направлении непосредственно перед стоп-линией,

$S_i^{(1)}$  – одна автомашина совершает проезд,

$S_i^{(2)}$  – одна автомашина совершает проезд перекрестка и одна находится перед ним и т.д.,

$S_i^{(n)}$  – все места в очереди заняты, то есть весь квартал заполнен автомашинами.

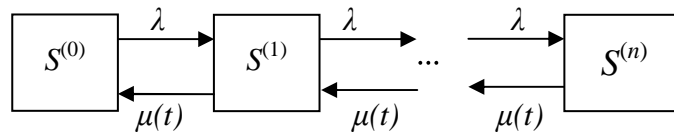


Рис.1. Граф состояний системы для одного направления

Обозначим  $p_i^{(k)}(t)$  – вероятность  $k$ -ого состояния системы  $\Omega_i$  в момент времени  $t$ . В соответствии с теорией Марковских цепей с непрерывным временем вероятности состояний удовлетворяют дифференциальным уравнениям Колмогорова:

$$\begin{cases} \dot{p}_i^{(0)} = -\lambda_i^{(0)} p_i^{(0)} + \mu_i^{(1)}(t) p_i^{(1)} \\ \dot{p}_i^{(1)} = -\lambda_i p_i^{(1)} - \mu_i(t) p_i^{(1)} + \lambda_i p_i^{(0)} + \mu_i(t) p_i^{(2)} \\ \dots \\ \dot{p}_i^{(n-1)} = -\lambda_i p_i^{(n-1)} - \mu_i(t) p_i^{(n-1)} + \lambda_i p_i^{(n-2)} + \mu_i(t) p_i^{(n)} \\ \dot{p}_i^{(n)} = \lambda_i p_i^{(n-1)} - \mu_i(t) p_i^{(n)} \end{cases} \quad (2.2)$$

Здесь  $\mu_i(t)$  – кусочно-постоянная функция интенсивности проезда, которая для нечетных направлений равна:

$$\mu_i(t) = \begin{cases} \mu_i, & kT \leq t < kT + \tau_1 \\ 0, & kT + \tau_1 \leq t < (k+1)T \end{cases}, \quad (2.3)$$

где  $k$  – количество целых циклов, прошедших от начала наблюдений.

Аналогично определяются интенсивности проезда для четных направлений. Для вероятностей состояний каждой системы выполняется условия нормировки:

$$p_i^{(0)}(t) + p_i^{(1)}(t) + \dots + p_i^{(n)}(t) = 1. \quad (2.4)$$

Через  $q_i(t)$  обозначим  $(n+1)$ -мерный вектор вероятностей состояний в момент времени  $t$ . Систему (2.2) можно записать в матричном виде:

$$\dot{q}_i = (\lambda_i A + \mu_i(t) B) q_i, \quad (2.5)$$

где  $\mu_i(t)$  кусочно-постоянная интенсивность проезда, матрицы  $A$  и  $B$ , размерности  $(n+1) \times (n+1)$ , соответственно равны:

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & -1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Система дифференциальных уравнений (2.5) с условием нормировки (2.4) однозначно определяет вероятности состояний системы  $\Omega_i$ , если известно начальное распределение вероятностей:  $q_i(0) = (p_i^{(0)}(0); p_i^{(1)}(0); \dots p_i^{(n)}(0))$ . Система дифференциальных уравнений может быть решена, например, с помощью пакета Matcad. С помощью численного

моделирования можно изучить зависимость средней длины очереди от интенсивности входного потока и режима работы светофора. Однако такой метод не дает возможности для аналитических исследований и выбора оптимального режима работы. Поэтому далее исследовались стационарные режимы работы системы.

Обозначим через  $Q(t)$  объединенный вектор состояний всех 4-х систем:  $Q(t) = \{q_1(t), q_2(t), q_3(t), q_4(t)\} \in R^{4(n+1)}$ . Так как системы дифференциальных уравнений (2.5) для всех  $i=1, \dots, 4$  имеют периодическую правую часть, то с увеличением  $t$  их решения могут приближаться к некоторой векторной периодической функции  $Z(t)$ , которую назовем *периодическим стационарным режимом работы всей системы*.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ.** Если для любых начальных условий, удовлетворяющих равенству (2.4), соответствующее решение  $Q(t)$  систем дифференциальных уравнений (2.5) приближается к периодической функции  $Z(t)$ , то есть выполняется условие:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|Q(t) - Z(t)\| = 0, \quad (2.7)$$

где  $\|Q\|$  – норма вектора, то  $Z(t)$  называется стационарным режимом работы объединенной системы  $\Omega_i$ .

Из определения следует, что стационарный режим работы может быть только один, и он совпадает с асимптотически устойчивым периодическим решением системы. В работе [7] доказано, что для системы такой режим всегда существует и найдены соотношения для его аналитического описания, на этой основе разработан численный метод расчета оптимальных параметров цикла на основе модели (2.4)-(2.6).

### 3. Имитационная модель

Для уточнения модели была разработана программа [11, 12], предназначенная для выполнения имитационного моделирования движения автотранспорта через регулируемый перекресток. Программа создана в среде разработки Borland Delphi 7. Программа позволяет конструировать небольшую дорожную сеть (несколько кварталов) с регулируемыми перекрестками и «прогонять» по ней автомобили. В качестве входных параметров задаются местоположения генерации автомобилей, интенсивность автомобильных потоков, параметры светофоров. На выходе программа возвращает пропускную способность каждого дорожного участка, вероятность возникновения пробки на участке, среднюю длину очереди на участке и другие параметры.

Основные функциональные возможности программы:

- Загрузка карты с изображением дорог и перекрестков через файл, подготовленный в графическом редакторе.
- Задание входного потока автомобилей в любом месте карты (имитация мест рождения транспортного потока: магазины, места работы и учебы и т.д.).
- Моделирование проезда автомобилей через регулируемый перекресток. На входе задаются: интенсивность движения, границы красного и зеленого сигналов светофора. Программа вычисляет все варианты сигналов светофора и для каждого варианта выполняет прогон автомобилей. Все выходные параметры (длина очереди, среднее время задержки и т.д.) фиксируются в таблице.
- Получение объединенных результатов для перекрестка в целом. Если задать четыре интенсивности (как на перекрестке), то программа вычислит объединенные результаты (средневзвешенные значения параметров: пропускная способность, длина очереди, среднее время задержки).

- Ускорение вычислений. Программа позволяет смоделировать десятичасовой прогон автомобилей за 30 секунд реального времени. (Вычисления проводились на процессоре Intel Core Duo 1,6 Ghz).
- Нахождение оптимальных режимов светофорного регулирования для одного перекрестка. Можно указать ограничения на ряд выходных параметров, программа отобразит только те результаты, которые удовлетворяют заданным условиям.
- Сохранение результатов вычислений в MS Excel.
- Вставка результатов вычислений из MS Excel в программу моделирования.
- 

### Входной поток автомобилей

Входной поток автомобилей задается с помощью, так называемых, *генераторов* (имитация мест рождения транспортного потока). Можно создать любое количество генераторов, у каждого указываются параметры: место создания автомобилей ( $x, y$ ), интенсивность (*авто/мин*), направление движения и максимальная скорость автомобилей (*км/ч*). После чего генератор с заданной интенсивностью создает автомобили в указанном месте.

Результаты, полученные в работе [8], свидетельствуют о том, что реальный поток автомобилей имеет показательное распределение или близкое к нему. Поэтому в программе временные интервалы между созданием автомобилей генерируются случайным образом [14, 15] по показательному распределению, интенсивность потоков задается через параметр  $\lambda$ , единица измерения авто/с. Для удобства использования в интерфейсе программы интенсивность автомобильного потока задается в авто/мин.

### Выходные параметры системы

При моделировании движения автомобилей через перекресток программа фиксирует выходные параметры системы:

$Q_{авто}$  – общее количество обслуженных автомобилей, авто. Учитываются автомобили, которые пересекли перекресток за все время проведения вычислительного эксперимента.

$Q_{цикл}$  – общее количество циклов светофорного регулирования, циклов. Количество циклов светофорного регулирования за все время проведения вычислительного эксперимента.

$Q_{пропуск, мин}$  – пропускная способность перекрестка, авто/мин. Среднее количество автомашин, проезжающих через перекресток за одну минуту.

$Q_{пропуск, цикл}$  – пропускная способность перекрестка, авто/цикл. Среднее количество автомашин, проезжающих через перекресток за один цикл светофора.

$T_{общее}$  – среднее время жизни автомобиля, чч:мм:сс. Среднее время полного прохождения автомобилем дорожного участка с момента генерации и до пересечения перекрестка.

$T_{задержка}$  – среднее время задержки автомобиля, с. Сколько времени в среднем автомобили не двигаются (скорость равна нулю) на данном дорожном участке.

$Q_{авто, сист}$  – общее количество автомобилей в системе, авто/мин. Среднее количество автомобилей в системе на момент включения зеленого сигнала, с любой скоростью.

$Q_{очередь}$  – длина очереди, авто/мин. Среднее количество автомобилей в системе на момент включения зеленого сигнала, у которых скорость равна нулю.

$T_{внешн.задержка}$  – общее время внешней задержки, чч:мм:сс. Общее время задержек автомобилей вне системы (за рамками рассматриваемого квартала, причина задержки: невозможно заехать в квартал из-за затора).

$T_{отн.внешн.задержка}$  – относительное время внешней задержки, %. Время задержки в процентном соотношении времени задержки от общего времени проведения эксперимента.

$\lambda_{факт}$  – фактическая интенсивность, авто/мин. Сколько фактически автомобилей в минуту создает генератор, у которого установлен входной параметр  $\lambda$ .

### Модель движения автомобилей

В программе используется микроскопическая модель [11, 12] движения автомобилей. За основу взята модель умного водителя (The Intelligent Driver Model, IDM) [13, 9], в которую внесены некоторые упрощения. Уравнение движения состоит из двух частей:

$$\dot{v} = \dot{v}_{speed} + \dot{v}_{brake}, \quad (3.1)$$

где  $\dot{v}_{speed}$  – функция ускорения,  $\dot{v}_{brake}$  – функция торможения.

Уравнение ускорения автомобиля задается в виде:

$$\dot{v}_{speed}(v_\alpha) = a \left[ 1 - \left( \frac{v_\alpha}{v_0} \right)^4 \right], \quad (3.2)$$

где  $a$  – максимальное ускорение,  $v_\alpha$  – текущая скорость,  $v_0$  – желаемая скорость (скорость, с которой автомобиль перемещался бы в свободном потоке).

Уравнение торможения автомобиля задается в виде:

$$\dot{v}_{brake}(s_\alpha, v_\alpha) = \begin{cases} -a \left( \frac{s_0 + v_\alpha T}{s_\alpha} \right)^2, & s_\alpha \in [1, 10] \\ 0, & s_\alpha > 10 \end{cases}, \quad (3.3)$$

где  $s_\alpha$  – дистанция до впереди едущего автомобиля (измеряется в метрах),

$s_0$  – минимальное расстояние между автомобилями, которое сохраняется даже в пробке,

$T$  – желаемый временной интервал – время движения автомобиля со скоростью  $v_\alpha$  до столкновения с впереди едущим автомобилем,  $v_\alpha$  – текущая скорость.

Таким образом, автомобиль плавно набирает скорость от 0 до желаемой  $v_0$  с вычисляемым ускорением  $\dot{v}_{speed}$ , которое зависит от скорости  $v_\alpha$  в данный момент времени и от заданного максимального ускорения  $a$ . Снижение скорости в случае возникновения препятствия перед автомобилем осуществляется с помощью функции  $\dot{v}_{brake}$ , которая зависит от расстояния до препятствия  $s_\alpha$ , скорости автомобиля  $v_\alpha$ , от параметров  $T$  и  $s_0$ .

Стохастичность моделирования достигается за счет того, что параметры, характеризующие индивидуальные особенности стиля вождения водителя, вычисляются отдельно для каждого автомобиля случайным образом в соответствии с равномерным

распределением с разбросом 20%. В качестве исходных значений принимаются  $T = 1,5 \text{ с}$ ,  $s_0 = 1,5 \text{ м}$ ,  $a = 2 \text{ м/с}^2$ .

Каждый автомобиль при необходимости может менять полосу движения, при этом проверяется возможность безопасного осуществления перестроения. Как только расстояние  $s_\alpha$  до впереди едущего автомобиля становится меньше допустимого, предпринимается попытка сменить ряд. Сначала проверяется, можно ли перестроиться в левый ряд, если нельзя (маневр приведет к резкому торможению других транспортных средств или к аварии), тогда проверяется возможность перестроиться в правый ряд. Параметр  $s_\beta$  означает дистанцию безопасности, которая проверяется перед осуществлением перестроением автомобиля. Также  $s_\beta$  отвечает за целесообразность перестроения в новый ряд, так как проверяется наличие в новом ряду места для движения вперед.

#### 4. Метод нахождения оптимального цикла светофора

Перейдем описанию алгоритма определения оптимальных параметров светофора с помощью программы моделирования транспортных потоков. Порядок проведения расчетов.

1. Задаются входные параметры:

- Габариты перекрестка, количество полос движения.
- Интенсивности транспортных потоков  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ .
- Минимальные и максимальные значения сигналов светофора и шаг изменения.

2. Запускается прогон автомобилей через перекресток. На этом шаге программа будет моделировать движение автомобилей через перекресток, изменяя при этом значения параметров светофора. В результате прогона будет выполнен перебор всех заданных значений продолжительности фаз светофора. Диапазоны изменения основных выходных параметров, характеризующих качество регулирования движения на перекрестке: средняя длина очереди по всем направлениям, максимальная длина очереди в одном из направлений, среднее по всем направлениям, максимальное в одном из направлений при переборе возможных параметров цикла светофора фиксируются в таблице.

3. Выбирается условие оптимальности на основе метода главного критерия. Для этого среди выходных параметров выбирается главный, который будет оптимизирован, и задаются ограничения на остальные выходные параметры. При этом программа произведет фильтрацию выходных параметров, полученных на шаге 2, и отобразит только те, результаты, которые удовлетворяют заданным условиям.

Особенность программы заключается в том, что программа позволяет загружать перекресток любого размера и с любым количеством полос движения. Автомобили соблюдают безопасную дистанцию и способны при необходимости обгонять друг друга. В программе реализован механизм ускорения вычислений, который позволяет увеличить скорость моделирования движения автомобилей в 1 000 раз. Полученные результаты можно скопировать в файл MS Excel и при необходимости вновь загрузить в программу для выполнения анализа.

#### Выводы

При выполнении работы была рассмотрена математическая модель транспортного потока, основанная на теории систем массового обслуживания. Для уточнения математической модели использовалась имитационная программа, в которой применяется

микроскопическое моделирование, входящие потоки автотранспорта моделируются как простейшие. Разобран алгоритм нахождения оптимального цикла светофорной сигнализации с помощью программы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Webster F.V. Traffic signal settings // Road Res. Lab. Ministry Transport, HMSO, London. U. K. P. 1-43. Road Research Technical Paper 39, 1959.
2. Teyly S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Committee Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, Second Edition, 1995. 117 p.
3. Newell G. F. The rolling horizon scheme of traffic signal control // Transport Res., part A, v.32. 1998. №1, P. 39–43.
4. Долль Х., Листль Г. Немецкий опыт внедрения системы приоритетного движения трамваев и автобусов на регулируемых перекрестках по методу «зеленой волны» // Транспорт российской федерации № 8, 2007. С. 76–79.
5. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения: Учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 279 с.
6. Тимофеева Г.А., Завалицин Д.С. Математическая модель регулируемого перекрестка // Транспорт Урала. 2008. № 2(17). С. 92-97.
7. Завалицин Д.С., Тимофеева Г.А. Исследование математической модели регулируемого перекрестка //Труды института математики и механики УрО РАН. Екатеринбург, 2009. Т.15, №4. С.108-119.
8. Ахмадинуров М.М. Определение типа распределения входящего потока автомобилей // Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании. Вып. 5: Прикладные аспекты информационно-аналитического моделирования и обработки информации: сборник материалов 3-й Международной научной конференции. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 86–92.
9. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Agents for Traffic Simulation // Multi-Agent Systems: Simulation and Applications, 2008.
10. Капитанов В.Т., Хилажев Е.Б. Управление транспортными потоками в городах. М., Транспорт, 1985. 94 с.
11. Ахмадинуров М.М. Обзор методов моделирования транспортных систем // Транспорт Урала №3 (22), УрГУПС, 2009. С. 39–44.
12. Ахмадинуров М.М., Тимофеева Г.А. Метод оптимальной настройки параметров светофора // Молодые ученые – транспорту-2009: Сб. научн. тр.: в 3-х ч. Екатеринбург: Изд-во УРГУПС. 2009. Ч. 1. С. 254–261.
13. Treiber M., Hennecke A., Helbing D. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations // Physical Review, 2000, E 62. P. 1805–1824.
14. Тимофеев Н. А., Тимофеева Г. А. Оптимизация работы Центра обслуживания вызовов на основе теории Марковских случайных процессов // Научный журнал «Вестник Уральского государственного университета путей сообщения», № 2(6). 2010. С. 22–28.
15. Вакулина Г.М. Вероятностные методы оценки рисков инвестиционных проектов // Научный журнал «Вестник Уральского государственного университета путей сообщения», №1 (9). 2011. С. 93–100.

**Ахмадинуров Максим Минихатович** – аспирант, Уральский государственный технический университет-УПИ,

**Ahmadinurov Maxim Minihatovich** – Post-graduate Student of the Ural State Technical University-UPI, Ekaterinburg



г. Екатеринбург

**Тимофеева Галина Адольфовна** –  
доктор физико-математических наук, доцент,  
заведующий кафедрой уральского  
государственного университета путей  
сообщения, г. Екатеринбург

**Timofeeva Galina Adolfovna** –  
Doctor of Physical and Mathematical Science,  
Professor, Head of the Chair, Ural State  
University of Railway Transport, Ekaterinburg

*Статья поступила в редакцию 25.01.2011, принята к опубликованию 10.06.2011*

**И.В. Вешнева**

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СОЦИАЛЬНОГО ОБЪЕКТА,  
ОСНОВАННАЯ НА ПОСТРОЕНИИ МНОГОМЕРНОГО «ПОЛЯ КАЧЕСТВА»  
СБАЛАНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

*В работе впервые представлена математическая модель для количественной многоаспектной характеристики качества социального объекта, подобная моделям, используемым в естественнонаучных исследованиях. Модель, сформированная на принципах лингвистического моделирования, может быть использована как база экспертной системы мониторинга качества образования и как основа качественного анализа качества.*

Лингвистическое моделирование, качество, качество образования, экспертная модель, нечеткие множества, теория катастроф

**I.V. Veshneva**

**ESTIMATION OF THE QUALITY OF SOCIAL OBJECT  
BASED ON THE BALANCED SCORE CARD MULTIDIMENSIONAL  
“QUALITY FIELD” CONSTRUCTION USING FUZZY SETS THEORY**

*In present work the mathematical model for quantitative multi-aspect quality characterization of social object is presented for the first time. The model is similar to the models from the natural sciences. The model based on the linguistic modeling may be used as the base for expert system for education quality monitoring and the base for quality analysis of the concept of quality.*

Linguistic modeling, quality, education quality, expert model, fuzzy sets, catastrophe theory

**Введение**

Качество – это степень соответствия присущих отличительных свойств объекта (продукции, процесса, системы, системы менеджмента качества и др.) потребностям или ожиданиям, которые установлены, обычно предполагаются или являются обязательными [1]. Такое определение качества включает многомерность данного понятия. Очевидно, что высшее образование не может позволить себе роскошь использования суженых определений качества. Качество образования, качество вуза – понятия многомерные и многоаспектные. Понятие многомерного качества шире традиционной идеи качества, которая выражается в степени соответствия стандарту содержания учебных программ или уровне экзаменационных оценок студентов вуза [2].

При изучении истории развития управления качеством со времени возникновения массового производства материальной продукции в работе [3] выделено два направления развития управления качеством:

1. обеспечение производства качественной продукции (от простейших методов контроля готовой продукции до современных методов универсального менеджмента качества);

2. предоставление потребителю гарантий качества приобретаемой продукции (до сертификации систем качества).

Аналогичные два направления могут быть положены в основу математической модели характеристики многомерного качества образования или измерения эффективности деятельности образовательного учреждения или его структурного подразделения [4].

В данной статье предлагается выделить два основных набора параметров оценки качества, используя структуру сбалансированной системы показателей (ССП). Используемые показатели позволяют вузу решить две ключевые проблемы: эффективно оценивать результаты деятельности и реализовывать стратегию по реализации миссии на уровне операционного контроля управления. Наборы показателей и их оценки в лингвистических формулировках получены в результате проведения экспертного опроса в открытой форме [5]. Для каждого показателя поставлена в соответствие функция принадлежности и реализован алгоритм лингвистического моделирования. По двум выделенным направлениям проведено разворачивание структуры показателей в трехмерную поверхность. В результате для каждого аспекта СПП получено «поле», описывающее качество образования.

Сама структура СПП включает четыре аспекта, группирующих стратегические цели успешной реализации миссии организации. В данной работе используется ранее проведенная модификация аспектов [5] с целью адаптировать идею объединения нескольких показателей в сбалансированную систему, наиболее корректно соответствующую специфике высшего образовательного учреждения.

Проведено объединение четырех поверхностей в общую структуру поля, названное «полем качества». Такое модельное представление сложной многомерной структуры качества позволит применять к ее исследованию методы, используемые при исследовании математических моделей реальных объектов, изучаемых в естественных науках, таких как физика, биология, химия.

В работе впервые представлена математическая модель для количественной многоаспектной характеристики качества социального объекта, подобная моделям, используемым в естественнонаучных исследованиях. Для каждого из показателей СПП использованы функции принадлежности как в теории нечетких множеств. Конкретные значения показателей получены в результате экспертного опроса. Четыре аспекта СПП позволили структурировать показатели в сложные пространственные функции принадлежности промежуточных выходных переменных СПП. СПП была использована для структуризации большого количества входных переменных, что позволило сформировать сложную пространственную структуру.

Для ее последующего исследования предполагается применять методы теории особенностей отображений множеств, называемой также иногда теорией катастроф.

### **Формирование показателей СПП в поле качества**

Проведенный анализ экспертной информации и промежуточная апробация результатов при построении модели оценки качества образовательного процесса на основе модифицированной СПП в системе электронной кафедры медицинского вуза [6] позволили нам сформировать систему критериев оценки деятельности подразделений высших учебных заведений, основанной на СПП. Она состоит из трансформированных для вуза четырех аспектов сбалансированной системы, для которых введем обозначения:

- аспект обучения и развития (показатели повышения квалификации ППС; участие в конференциях и др.),
- аспект на взаимоотношения (удовлетворенность выпускников карьерным ростом; показатели психологического комфорта в коллективе и др.),
- аспект на внутреннюю деятельность (бюджетное финансирование; внебюджетное финансирование и др.),

- аспект на виды деятельности (основан на процессном подходе, обязательном для систем менеджмента качества, и использует структуризацию по бизнес-процессам, обеспечивающим процессам и процессам менеджмента).

Выделим в аспекте на виды деятельности две группы показателей. В некотором смысле они аналогичны двум, традиционно выделяемым направлениям обеспечения качества, исходящим из основы рыночных взаимоотношений поставщика и потребителя. Однако в рассматриваемом случае важно отметить, что эти отношения имеют не просто рыночную основу, они связаны отношениями взаимной обратной связи. Эти направления названы направлением на внутренние бизнес-процессы и на предоставление потребителю гарантий соответствия качества поставляемой продукции предъявляемым требованиям. Основываясь на процессном подходе, выделим три группы процессов: бизнес-процессы обозначим функцией  $q_1$ , обеспечивающие процессы –  $q_2$ , процессы менеджмента –  $q_3$ . Каждая из этих групп процессов получается в результате операций с множеством соответствующих входных переменных.

Каждая входная переменная оценивается лингвистическими терминами, которым ставится в соответствие функция принадлежности  $\mu$  из набора функций, представленных на рис. 1.

Например, частный показатель  $q_{11}$  – образовательные услуги – оценивается группой экспертов уровнем выше среднего, что соответствует лингвистическому высказыванию «Предложение новой образовательной услуги наряду со старой образовательной услугой с применением информационных технологий». Ему соответствует функция принадлежности  $\mu^{bc}$ :

$$\mu^{bc} = \exp\left(-\frac{(x - a^{bc})^2}{2b^{bc2}}\right),$$

где  $x$  – это число, выставяемое в соответствие лингвистической трактовке оценки.

Базируясь на [3], создадим модель качества, основывающуюся на плоскости двух направлений деятельности организации в области обеспечения качества. Направление на внутренние бизнес-процессы можно символично назвать направлением «*внутри*», направление на предоставление потребителю гарантий соответствия качества поставляемой продукции предъявляемым требованиям – «*наружу*». Этим направлениям поставим в соответствие две переменные и назовем их традиционной парой  $x$  и  $y$ . Тогда результирующие функции, соответствующие группам показателей ССП, будут изменяться по псевдо осям абсцисс и ординат. Зададим пределы изменений этих переменных соответствующими пределами изменений функций принадлежности  $[0,100]$ , как на рис. 1.

Сгруппируем показатели по двум выделенным направлениям. Тогда для показателей ключевых факторов успеха достижения целей в области предоставления гарантий качества потребителям мы будем использовать функции принадлежности, зависящие от переменной  $y$ , а соответствующую ось обозначим на рисунках «*наружу*», иллюстрируя направленность данной группы показателей во внешнюю среду образовательной организации. Другая группа показателей будет зависеть от переменной  $x$ , а направление на внутренние бизнес процессы организации на рисунках будем обозначать «*внутри*».

Каждый показатель оценивается с применением лингвистических предложений с поставленной им в соответствие функцией принадлежности, зависящей от переменной надлежащей оси (абсцисс или ординат).

Оценка всей группы показателей каждого из двух групп показателей («*внутри*» – «*наружу*») для четырех аспектов получена, исходя из «мягкой» интерпретации операции принципа обобщения посредством замены «жесткой» максиминной операции пересечения с помощью арифметического произведения [7].

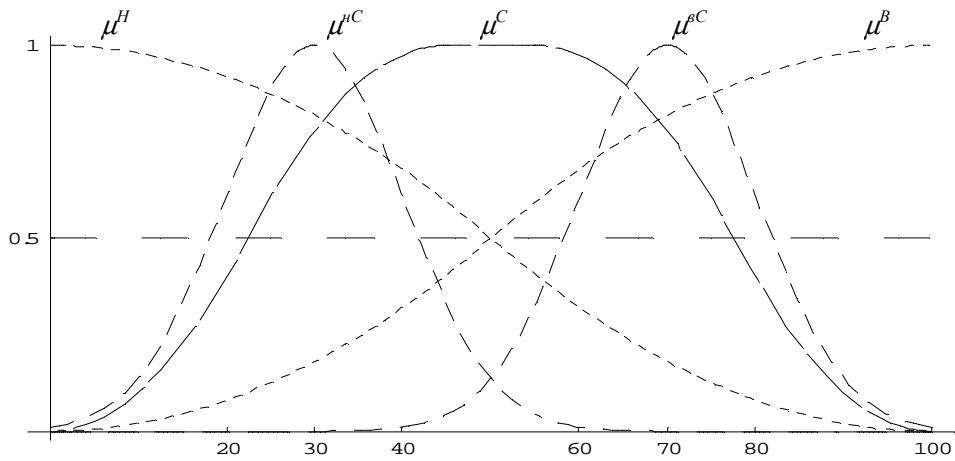


Рис. 1. Вид функций принадлежности

В этом случае предполагается, что существует некоторая возможность компенсации имеющихся значений  $f_x(x)$  какими-либо значениями  $f_y(y)$  и наоборот, «компенсации»  $f_y(y)$  за счет значений  $f_x(x)$  в операции логического пересечения  $f_{x \cap y} = f_x \cap f_y$ . Переменные соответствующих показателей ССП группы аспекта на виды деятельности  $q_i$ , вообще говоря, могут быть как количественными, так и качественными. В любом случае для каждого показателя формируется пара из переменной и ее функции принадлежности. Предполагаем, что лингвистические переменные оцениваются по принципу термометра по приведенной шкале уровней:  $H$  – низкий,  $HC$  – ниже среднего,  $C$  – средний,  $BC$  – выше среднего,  $B$  – высокий. В нашем случае определим их как качественные термы.

В результате проведенных операций получаем поле, соответствующее аспекту на виды деятельности ССП, назовем его  $Q(x, y)$ . Проведем преобразование соответствующего субнормального нечеткого множества и получим нормальное множество, для которого выполняется условие:

$$\sup_U \mu(x) = 1.$$

Для проведения исследования вида функции был проведен экспертный опрос в структурных подразделениях вузов [5]. В результате анкетирования были получены конкретные значения функций принадлежности каждого показателя для оценки степени достижения стратегических целей, а также скорректированы сами наборы показателей. Полученные результаты позволили смоделировать наборы функций принадлежностей конкретных видов и результирующие промежуточные выходные функции четырех аспектов ССП. Например, для аспекта на виды деятельности получена функция вида:

$$\begin{aligned} Q(x,y) = & -0.0056 * \text{Exp}(-0.0111 * (-75 + x)^2 - 0.05 * (-50 + y)^2) + \\ & + 0.0653 * \text{Exp}(-0.0091 * (-65 + x)^2 - 0.05 * (-50 + y)^2) - \\ & - 0.0014 * \text{Exp}(-0.0111 * (-50 + x)^2 - 0.05 * (-50 + y)^2) - \\ & - 0.0873 * \text{Exp}(-0.0111 * (-75 + x)^2 - 0.025 * (-40 + y)^2) + \\ & + 1.0148 * \text{Exp}(-0.0091 * (-65 + x)^2 - 0.025 * (-40 + y)^2) - \\ & - 0.0221 * \text{Exp}(-0.0111 * (-50 + x)^2 - 0.025 * (-40 + y)^2) + \\ & + 0.0025 * \text{Exp}(-0.0111 * (-75 + x)^2 - 0.0167 * (-28 + y)^2) - \\ & - 0.0298 * \text{Exp}(-0.0091 * (-65 + x)^2 - 0.0167 * (-28 + y)^2) + \\ & + 0.0006 * \text{Exp}(-0.0111 * (-50 + x)^2 - 0.0167 * (-28 + y)^2) \end{aligned}$$

Соответствующее распределение функции представлено на рис. 2. Видно, что в распределении доминируют гауссовы функции. При этом в результате преобразований множители полиномиальных членов функций принадлежности низкого, среднего и высокого уровней оказались меньше  $10^{-10}$ .

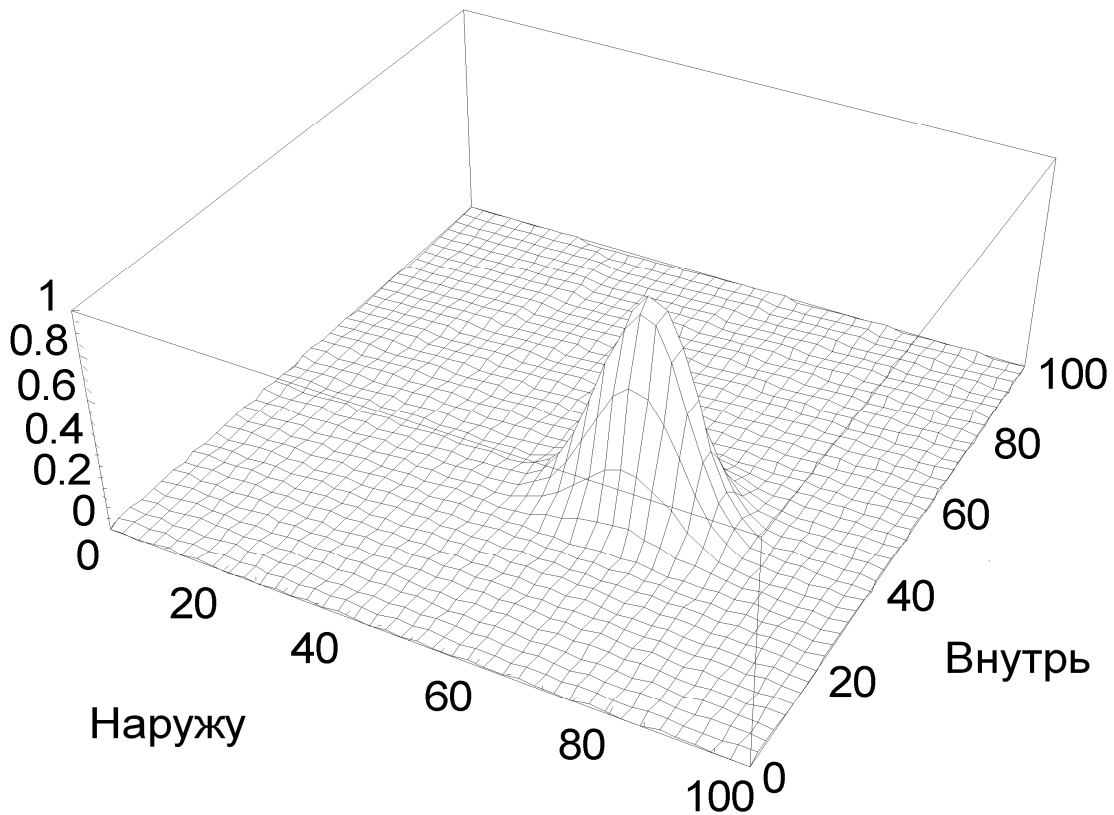


Рис. 2. Трехмерный график нормированных функций принадлежности для показателя  $Q$  (обучения и развития)  $q_y$  "Students" и  $q_x$  "Professors"

ССП состоит из четырех аспектов. Назовем их  $X(x,y)$  – для аспекта обучения и развития,  $Y(x,y)$  – для аспекта на взаимоотношения,  $Z(x,y)$  – для аспекта на внутреннюю деятельность. Для каждого из них получена аналогичная функция «поля качества». Поскольку полученные функции выпуклых поверхностей для четырех аспектов ССП  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $Q$  на порядки отличаются по максимальным значениям, для того, чтобы избежать доминирования функции принадлежности одного из аспектов, для каждой из функции проведена операция нормализации, как для примера  $Q$ .

Не допуская возможности компенсации показателей различных аспектов ССП, проведем классическую операцию объединения полученных множеств. В результате получим поле, представленное на рис. 3.

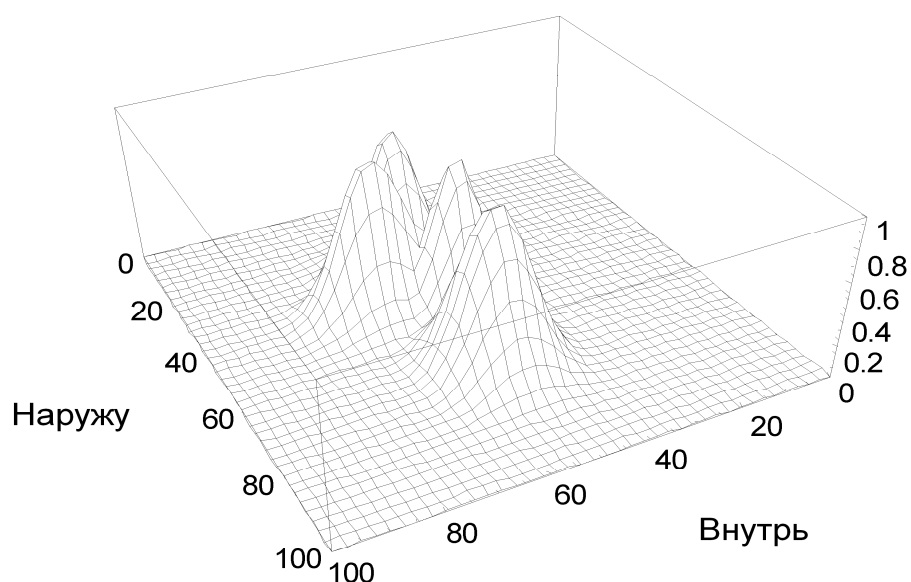
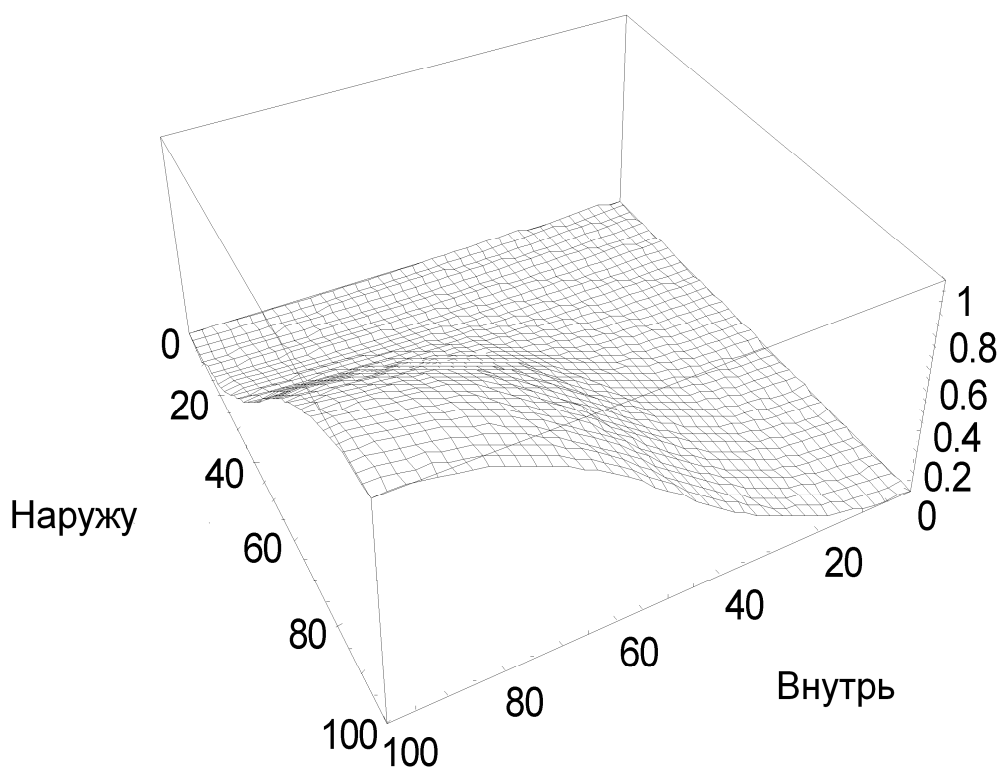
Рис. 3. Результат  $R$  объединения входящих переменных  $X, Y, Z, Q$ 

Рис. 4. Результирующее поле при оценке всех показателей по уровню «высокий»

По оси, отмеченной меткой «*Внутри*», изменяется переменная группы параметров, которые относятся к направлению обеспечения производства качественной продукции, «*Наружу*» – предоставление потребителю гарантий качества приобретаемой продукции

(вплоть до процессов сертификации систем качества вуза). По обоим направлениям оси маркированы от 0 до 100 условных единиц, которые могут быть интерпретированы как проценты реализации факторов успеха для достижения поставленных целей. Все множества, участвующие в проектировании поля, нормированы на единицу, соответственно, это максимальное значение всех функций. Каждая из функций  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и  $Q$ , соответствующая аспектам на обучение и развитие, на взаимоотношения, на внутреннюю деятельность и на виды деятельности, выделенным в ССП, представлена смещенным максимумом в результирующем поле.

Можно сравнить полученное результирующее поле с полем, которое получается при оценке всех показателей по уровню «Высокий» (рис. 4). Кроме того, что максимум поля смещен в сторону понижения по обоим направлениям «Внутрь» и «Наружу».

Данный подход позволяет получить достаточно наглядную диаграмму, позволяющую сделать выводы о состоянии управляемой системы и о возможных путях ее изменения.

### Заключение

Созданная модель представляет собой один из способов создания проекции состояния многомерного многоаспектного сложного социального объекта в трехмерное пространство, в котором состояние может быть оценено не только визуально, но и количественно и качественно. Аналог этому существует при зрительном восприятии. Мы видим реальную физическую действительность вокруг нас в форме проекций поверхностей, ограничивающей физические тела, на сетчатку глаза. Подобные процессы происходят и с формированием представлений о внешнем мире в сознании человека. Через фильтры своих профессиональных знаний, накопленного личного опыта и др. мы формируем в сознании «карту» окружающей территории. Эта карта представляет собой некоторый аналог проекции изображения предмета на сетчатке глаза. По этой проекции мы составляем свое представление о нем.

Полученное «поле качества» может быть интерпретировано как некоторая поверхность, соответствующая реальному качеству образования. Эта поверхность очевидно достаточно сложна. Классическое исследование данной функции на экстремум приведет к нахождению точек равновесия. Последующее исследование данной функции на структурную устойчивость может быть выполнено методами теории особенностей отображений множеств, называемой также иногда теорией катастроф. Такое исследование позволит выявить управляющие параметры, при слабом плавном возмущающем воздействии на которые система даст скачкообразный отклик, называемой «катастрофой» в математическом смысле [8, 9]. В случае исследования социальных систем ситуация может оказаться лингвистически каламбурной, когда «хотели как лучше, а получилось как всегда». Т.е. слегка воздействовали, а масштабы катастрофических социальных последствий налицо.

Проведение подобающего анализа позволит обнаружить вызывающие развитие ростка катастроф различного типа параметры и прогнозировать возможное изменение данной поверхности при изменении различных параметров. Например, можно смоделировать развитие структуры исследуемой поверхности при понижении среднего возраста профессоров в вузе на 15 лет и т.п.

В представленной работе получено «поле качества» результирующего взаимодействия всех показателей, которые были разработаны при проектировании сбалансированной системы показателей. Можно использовать и другие методы построения поля, например, учитывая все четыре компоненты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $Q$  в каждой точке плоскости. Тогда мы получим векторное поле на плоскости.

Исследования этого информационного поля позволит выделить возможные параметры управления, плавное изменение которых может привести к скачкообразному изменению состояния системы. Изучение соответствующих простых математических функций и их производных позволит прогнозировать изменение исследуемого социального



объекта. Поскольку в данной статье речь идет конкретно об образовательном учреждении, такой прогноз представляется важным, по причине высокой степени ответственности системы образования за воспроизводство кадрового потенциала государства.

При этом возможно уменьшения риска снижения качества образования в период происходящих в системе образования реформ, обусловленной сменой образовательной парадигмы на компетентностную, переходом на ФГОС ВПО третьего поколения и России в Болонский процесс.

Поэтому возможные способы его исследования представляются последующим направлением развития данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 9000-2005 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М: Изд-во Стандартиформ, 2009.
2. Вешнева И.В. Построение совершенной системы менеджмента качества в вузе и его подразделениях: Уч.-мет. пос. Саратов.: «Саратовский источник», 2009. 127 с.
3. Лапидус В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях. М: ОАО "Типография "Новости", 2002. 432 с
4. Вешнева И.В., Мельников Л.А. Концепция разработки модели экспертной системы управления качеством образования на основе теории нечетких множеств // Вестник СГТУ 2009. №4 (43) Выпуск 2. С 195-198.
5. Вешнева И.В. Математические модели в системе управления качеством высшего образования с использованием методов нечеткой логики. Монография. Саратов: Саратовский источник, 2010. 187 с.
6. Беляева А.Ю., Вешнева И.В., Левицкая А.Д., Перова Л.Г., Прокофьева Л.П. Комплексная система бально-рейтинговой оценки знаний иностранных студентов. Инновации в современном медицинском образовании. Саратов, 2010. С. 43-45.
7. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 320 с.
8. Melnikov L.A., Derbov V.L., Veshneva I.V., Konukhov A.I. Numerical studies of beam and pulse propagation in lasers and nonlinear media: transverse pattern dynamics and nonparaxial effects // Computers Math. Applic. 1997. V.34. № 7/8. P. 881-909.
9. Melnikov L.A., Veshneva I.V., Konukhov A.I., Ryabinina M.V. Vectorial Karhunen—Loewe modes for the description of the polarization transverse pattern dynamics in lasers and their classification based on the characterization of its singular points // J.Opt.B.:Quantum semiclass.Opt. vol. 3. 2001. P. 209-214.

**Вешнева Ирина Владимировна** – кандидат физико-математических наук, доцент, докторант кафедры приборостроения Саратовского государственного технического университета

**Veshneva Irina Vladimirovna** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associated Professor, Post-graduate Student of the Department “Instrumentation Engineering”, Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 25.03.2011, принята к опубликованию 10.08.2011*

УДК 336.225:51 (001.51)

**Н.П. Ганюкова, А.А. Ханова**

## **ПРОЦЕССНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ КОРПОРАТИВНОГО ТИПА**

*В статье рассматриваются тип и особенности управления финансовыми потоками социально-экономических системам корпоративного типа. В качестве наиболее эффективного, предложен процессный подход к управлению в разрезе логистических процессов предприятия. Описаны операции перехода к процессному управлению в виде анализа и прогнозирования движения, накопления и перераспределения финансовых потоков корпорации.*

Финансовый поток, корпорация, процессное управление, логистика, агрегированный бухгалтерский баланс, реклассификация, прогнозирование

*The article deals with the type and characteristics of cash flow management of socio-economic systems of the corporate type. The most effective, proposed a process approach to the management of logistics processes in the context of the enterprise. We describe the operation of transition to process management in the form of traffic analysis and forecasting, accumulation and redistribution of financial flows of the corporation.*

The flow of funds, a corporation, process management, logistics, aggregate balance sheet, reclassifications, forecasting.

Как известно, финансовое управление является одной из важнейших составляющих деятельности предприятий. В современных условиях посткризиса в экономике, обеспечение эффективного управления финансовыми ресурсами предприятий (и особенно крупных финансово-промышленных групп, далее - корпораций) еще более актуально, поскольку значительная часть из них находится в состоянии, связанном с трудностями формирования новых рыночных отношений.

Поэтому на основе бухгалтерского баланса и некоторых необходимых дополнительных сведений, возможно моделировать как состояние, так и движение финансовых ресурсов предприятий. Кроме того, с целью повышения результативности, как осуществления самого моделирования, так и формирования его аналитического обеспечения, желательно объединение этих процессов в единый комплекс.

Вопросы управления корпоративными структурами были рассмотрены в работах таких ученых, как Е. С. Стоянова, В.В. Бочаров, В.Г. Балашов и др. Значительный вклад в разработку основных теоретических и методологических подходов к управлению финансовыми потоками компаний в целом и в вертикально-интегрированных корпоративных структурах в частности внесли ученые: В.В. Бочаров, В.Е. Леонтьев, И.А. Бланк, Е.С. Стоянова, А.Р. Горбунов, И.А. Баев, Л.А. Дробозина, Н.Г. Сычев, А.Д. Шерemet, В.С. Карелин и другие.

Мировые фундаментальные исследования в области данной проблематики представлены трудами ученых-экономистов: И. Ансофф, Р. Брейли, Л. Гапенски, П. Друкер, С. Майерс, М. Портер, А.Дж. Стрикленд, К. Уорд.

В большинстве работ [4, 5] управление финансами корпораций рассмотрено с точки зрения теории игр, где в качестве соперника выступает агрессивная внешняя среда. Другой блок работ посвящен исследованию и управлению эффектом синергии, возникающим в корпоративных структурах. Оба этих метода в качестве информационной базы исследования используют первичные данные бухгалтерского баланса в динамике. Моделирование и прогнозирование финансовых потоков при этом осуществляется постатейно, что на наш взгляд для принятия управленческих решений является избыточным.

Вследствие этого предлагаемый подход к моделированию финансовых потоков отличается универсальностью, предполагает совместное использование двух основных направлений финансового анализа: аналитических коэффициентов и финансовых потоков, связывающих основные характеристики состояния и движения финансовых ресурсов организации.

Информационной базой являются данные бухгалтерского баланса на начало отчетного периода и необходимые дополнительные сведения. Бухгалтерский баланс подвергается реклассификации (перегруппировке) с целью его полного соответствия схеме движения финансовых потоков предприятия.

Объектом исследования в данном случае выступают временные ряды (ВР), сформированные на основе динамики наблюдений за изменением сумм по агрегированным статьям баланса подразделений корпорации. В связи с чем предлагается выявить зависимости между значениями статей за постпериоды структурных подразделений и консолидированным бюджетом корпорации в целом.

ВР для анализа и прогнозирования сформируем на основе числовых данных, полученных из балансов структурных подразделений корпорации, проведя предварительную свертку. Укрупним значения, излишне детализированные в балансе, путем агрегации в рамках процессного подхода.

Анализ баланса по статьям бухгалтерского учета представляет собой **объектный подход** [1]. Основной недостаток объектного подхода к прогнозированию – излишняя детализация, которая не улучшает качество прогноза, а лишь усложняет расчеты. В связи с чем предлагается использовать **процессный подход** – то есть анализ баланса по агрегированным показателям, характеризующим некие значимые процессы исследуемого субъекта хозяйствования.

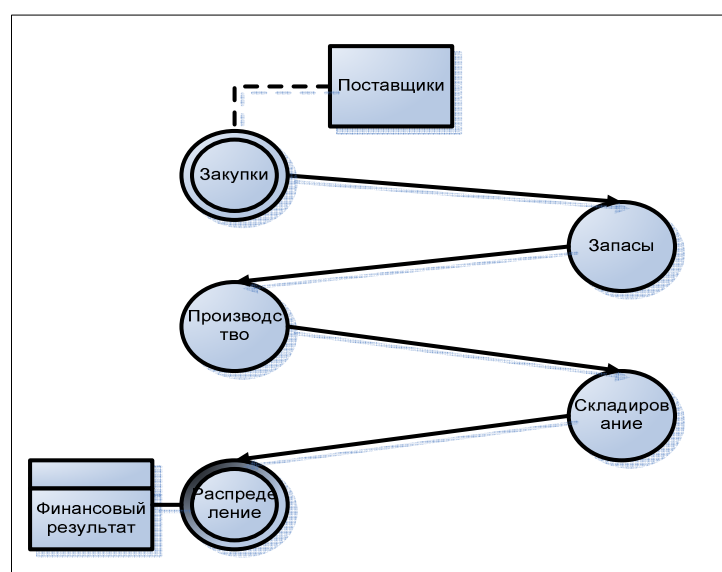


Рис. 1. Логистическая цепочка движения финансовых потоков

Для реализации **процессного подхода** [1] к анализу и прогнозированию могут быть использованы различные аналитические разрезы (анализ в разрезе движения материальных

потоков, в разрезе информационных потоков, в разрезе управления качеством, в технологическом разрезе и многие другие), выбор наиболее соответствующего определяется спецификой исследуемого предприятия.

Для построения прогнозной модели бюджета предприятия корпоративной структуры, на наш взгляд, требуется выбор аналитического разреза, наиболее соответствующего природе возникновения, движения и перераспределения финансовых потоков.

Эта задача типична для логистики, где финансовые процессы рассматриваются как последовательная цепочка операций, приводящая к формированию финансового результата (рис. 1).

Применяя общую теорию логистики, можно сгруппировать финансовые потоки корпорации по уровням возникновения в логистической цепи:

**закупки → запасы → производство → складирование → распределение**

Опишем формально предлагаемый процессный подход к управлению, формализация в терминах управления согласно [2] представлена в схеме на рис. 2. Отметим, что в данном случае *агентом* является управляющая структура корпорации (головное подразделение), а базовые значения в том или ином случае ( $PI_{ibase}$  – индекс рентабельности продаж,  $PI_{jbase}$  – индекс рентабельности производства,  $K_{base}$  – операции по кредитованию извне) определяется ожиданиями собственников корпорации являющихся *центром*.



Рис. 2. Структура задачи процессного управления финансовыми потоками

Следует уточнить, что значение переменных, условно обозначающих финансовый поток, присущий тем или иным сквозным процессам, расшифровано в табл. 1.

Результирующий финансовый поток  $R_i$ , должен отвечать условию оптимальной работы всей системы финансовых потоков в корпорации:

$$R_i = P_i + K_i^- + T_i^- + \{C_i^-\} + \{F_i^+\} \Rightarrow Max \tag{1}$$

При этом критериями оптимальности выступают следующие:

1.  $D_i > K_i$  – превышение погашения дебиторской задолженности над возникновением кредиторской задолженности;

2.  $V_i > 0, K_i > 0$  – поток средств от операций с валютой и кредитами стабилен;
3.  $K_i \leq K_{base}$  – операции по кредитованию извне, для корпорации в целом, должны сокращаться до некоторого заданного уровня  $K_{base}$ .
4.  $F_i > 0$  – поток средств с целью формирования фондов имеется.
5.  $R = \text{Max}$  – значение в узле R должно быть больше нуля и стремится к максимуму, то есть имеющиеся в распоряжении корпорации денежные средства должны превышать потребность в них всех структурных подразделений.

Таблица 1

## Переменные финансового потока

$D_i$	дебиторская задолженность	$D_i^+$	возникшая дебиторская задолженность
		$D_i^-$	погашенная дебиторская задолженность
$K_i$	кредиторская задолженность	$K_i^+$	возникшая кредиторская задолженность
		$K_i^-$	погашение кредиторской задолженности
$S_i$	выручка		
$Sv_i$	внутренний финансовый результат структурных подразделений		
$V_i$	валютные средства	$V_i^+$	покупка валюты
		$V_i^-$	продажа валюты
$C_i$	кредитные средства	$C_i^+$	получение кредита
		$\{C_i^-\}$	погашение кредита в данном цикле
$F_i$	фонды (формирование)	$\{F_i^+\}$	использование фондов в данном цикле
$P_i$	средства, предназначенные для распределения		
$T_i^-$	потребность в денежных средствах		
$R_i$	поток распределения		
230,240....	статьи бухгалтерского баланса (форма №1)		

На рис. 3 представлены следующие узлы:

$W$  – узел, представляющий макросреду, то есть сторонние предприятия и организации, с которыми возникают внешние финансовые потоки  $C_i, V_i, K_i, D_i$  (финансово-кредитные организации, партнеры, контрагенты, налоговые, социальные и другие службы). Данный узел является начальным и конечным элементом модели.

$I$  – узел, характеризующий микросреду, то есть структурные подразделения корпорации, формирующие внутренний финансовый результат  $Sv_i$  и потребность в денежных средствах  $T_i^-$

$D/K$  – узел, аккумулирующий дебиторскую задолженность  $D_0$  (положительный финансовый поток) и кредиторскую задолженность  $K_0$  (отрицательный финансовый поток).

$C/V$  – узел, представляющий результат операций с валютой  $V_0$  (положительный финансовый поток) и кредитные операции  $C_0$  (отрицательный финансовый поток).

$P$  – узел, характеризующий финансовые результаты, поступающие из предыдущих узлов модели.

$R$  – узел, представляющий итоговый финансовый результат деятельности всей корпорации в целом, то есть финансовый поток, предназначенный для дальнейшего перераспределения финансовых ресурсов ( $R_i$ ) в ответ на потребность ( $T_i^-$ ) в них структурных подразделений корпорации.

$F$  – обособленный узел, расположенный между узлами  $P$  и  $R$ , характеризующий накопление финансовых средств ( $F_i$ ) в различных внутрикорпоративных фондах. Эти средства в дальнейшем могут быть использованы как источник внутрикорпоративного финансирования ( $\{F_i^+\}$ ). Следует отметить, что входящие и исходящие финансовые потоки

данного узла возникают не всегда. Использование средств фондов нецелесообразно в некоторых циклах системы.

Хотелось бы отметить, что специфической особенностью вертикально интегрированных корпоративных структур является «структурная вложенность» представленной схемы. То есть если рассмотреть подробно узел  $I$ , можно увидеть что финансово-логистическая модель отдельных структурных подразделений корпорации идентична общей схеме модели. Разница в коэффициентах пропорций бюджета.

Пусть  $Str_{FU}$  – это совокупность узлов финансовой системы, с точки зрения логистической последовательности движения финансовых потоков;

$$Str_{FU} = \{F_{zak}, F_{zap}, F_{pr}, F_{skl}, F_{ras}\}, \quad (2)$$

где  $F_{zak}$  – логистический уровень «Закупки», представляет собой первый этап финансовой системы корпорации, включает в себя операции с валютой ( $V$ ) и кредитами ( $C$ );

$F_{zap}$  – уровень «Запасы», второй элемент финансовой системы, включает дебиторские ( $D$ ) и кредиторские ресурсы ( $K$ );

$F_{pr}$  – уровень «Производство». На данном уровне результируются все финансовые потоки с других уровней системы;

$F_{skl}$  – уровень «Складирование», включает определенные финансовые ресурсы корпорации, предназначенные для выделения в различные фонды компании.

$F_{ras}$  – уровень «Распределение», следующий за уровнями «Производство» и «Складирование», включает обеспеченность системы финансовыми ресурсами, а также сюда поступает потребность в них из структурных подразделений.

Таблица 2

Соответствие узлов финансово-логистической модели логистическим уровням

Логистический уровень	Узел	Тип узла
$F_{zak}$	$U_1$	$\{W\}$
$F_{zap}$	$U_2$	$\{D, K\}$
	$U_3$	$\{V, C\}$
$F_{pr}$	$U_4$	$\{P\}$
$F_{skl}$	$U_5$	$\{R\}$
$F_{ras}$	$U_6$	$\{I\}$
	$U_7$	$\{F\}$

Таким образом, выбирая в качестве признака агрегации логистические процессы, мы можем агрегировать статьи бухгалтерского баланса с целью обеспечения возможности реализации **процессного управления**.

На рис. 3 представлена структура агрегированного баланса в разрезе движения финансовых потоков распределенная по узлам финансово-логистической модели. На схеме обозначены узлы финансово-логистической модели ( $U$ ), финансовые потоки положительные ( $X^+$ ) и отрицательные ( $X^-$ ), а также цифрами отмечены статьи бухгалтерского баланса, формирующие каждый из узлов модели.

Новизна предлагаемого метода процессного управления состоит в выделении сквозных процессов корпорации в разрезе логистических операций, кроме того, предложена методика реклассификации бухгалтерского баланса, позволяющая перейти от качественного оценивания к количественному за счет формирования временного ряда. Временной ряд, сформированный на основе данных баланса, позволит в дальнейшем применить адекватные методы анализа и прогнозирования [3].

Предложено математическое описание методики управления финансовыми потоками корпорации в рамках финансово-логистической модели [6]. Приведены характеристики, ограничения и множество допустимых значений функции управления.

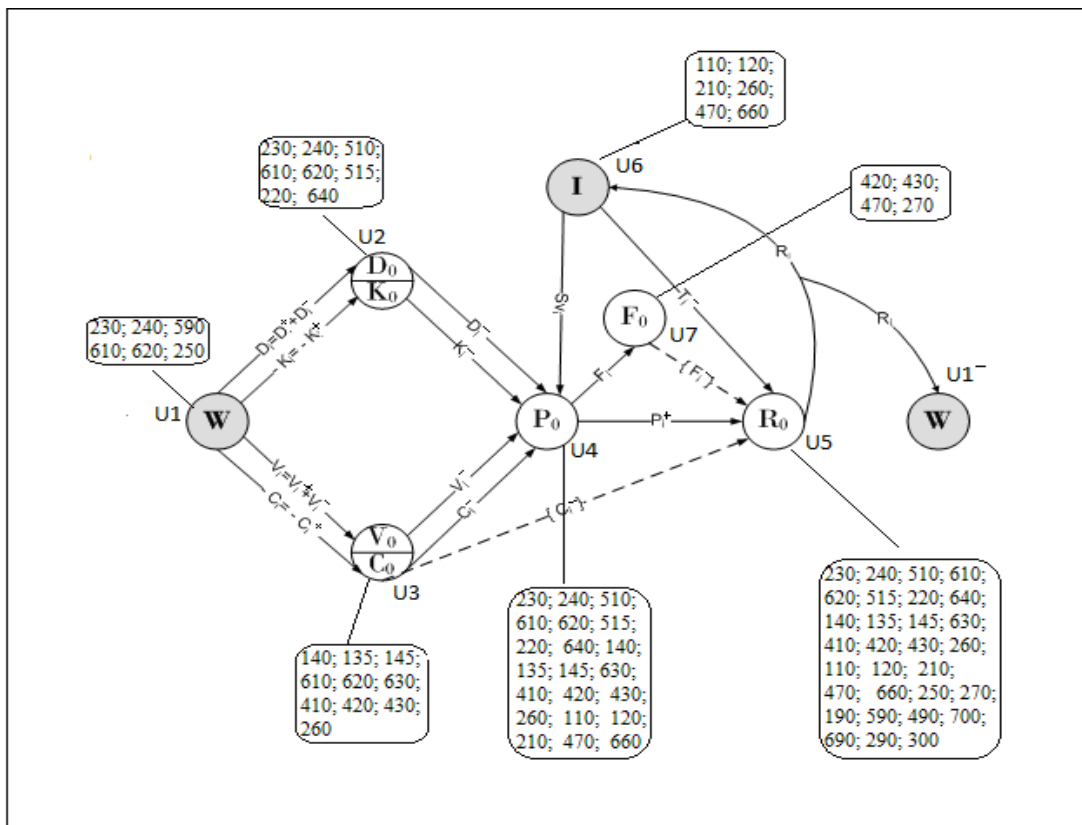


Рис. 3. Принцип реклассификации баланса

Сформированный в итоге агрегированный баланс представляет собой совокупность значений, характеризующих структуру финансовых потоков в привязке к логистическим процессам корпорации. Представленная в таком виде информация удобна для исследования, позволяет избежать громоздкости расчетов, но в свою очередь адекватно отражает финансовую действительность корпорации, так как никакие данные не отбрасываются и не теряются.

Представленные в агрегированном виде данные баланса позволяют отказаться от избыточного **объектного управления** (т.е. анализа и прогноза по статьям бухгалтерского учета) и перейти к **процессному управлению** (в случае систем корпоративного типа в качестве знаменателя предлагается использовать логистические процессы).

Таким образом, к полученным агрегированным данным может быть применен один из методов исследования, моделирования или прогнозирования, как имитационных, так и математических. Представленные в статье экономико-математические решения направлены на создание компьютерных систем управления социально-экономическими системами корпоративного типа. Описаны математические особенности разработки компьютерных систем такого рода [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Д.А. Структура теории управления социально-экономическими системами // Управление большими системами (УБС). М.: 2009. № 24. С. 216-257.
2. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.

3. Перепелица В.А., Тамбиева Д.А. Системы с иерархической структурой управления: разработка экономико-математических и инструментальных методов М.: Финансы и статистика, 2009. 270 с.

4. Томпсон А., Стрикленд А. Стратегический менеджмент. Искусство разработки и реализации стратегии. М.: Банки и биржи, 1998. 567 с.

5. Горбунов А.Р., Управление финансовыми потоками. М.: Глобус, 2004. 240 с.

6. Ганюкова Н.П. Моделирование финансовой системы вертикально-интегрированной корпорации в разрезе финансовых потоков //Сборник материалов к Международной научно-практической конференции «Суперкомпьютеры: вычислительные и информационные технологии». Хабаровск . 2010г. С. 184-190.

**Ганюкова Наталья Павловна** – старший преподаватель кафедры «Прикладная информатика в экономике» Астраханского государственного технического университета

**Ganyukova Natalya Pavlovna** – Senior Lecturer of the Department “Applied Information Science in Economy”, Astrakhan State Technical University

**Ханова Анна Алексеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная информатика в экономике» Астраханского государственного технического университета

**Khanova Anna Alekseevna** – Candidate , of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Applied Information Science in Economy”, Astrakhan State Technical University

*Статья поступила в редакцию 10.02.2011, принята к опубликованию 10.06.2011*



**С.В. Лукина**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ФОРМИРОВАНИЯ И ВЫБОРА  
СТРУКТУРНЫХ КОМПОНОВОК СБОРНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ  
НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

*Рассматриваются вопросы автоматизации процедур формирования и выбора структурных компонок сборных режущих инструментов с использованием линейных математических моделей. разработанные аналитические модели наглядны, универсальны и могут быть автоматизированы с использованием инструментальных средств персональных компьютеров.*

Сборный режущий инструмент, структурная компоновка, булево линейное программирование, сетевая граф-модель

**S.V. Lukina**

**AUTMATING PROCEDURES FOR FORMATION AND CHOICE  
OF STRUCTURAL COMPONENT LAYOUT OF MODULAR CUTTING TOOLS  
IN STEP OF TECHNICAL PREPARATION PRODUCTION**

*The issues of automating the procedures for formation and choice of structural component layout of modular cutting tools are considered. The developed applied analytical models are serviceable, demonstrative and universal. They can be automated with the help of personal computers tools.*

Modular cutting tools, structural component layout, boolean linear programming, network graph-model

Деятельность предприятия по развитию его материально-технической базы, организации производства, труда и управления представляет собой техническую подготовку производства. Техническая подготовка осуществляется в целях эффективного освоения нового или модернизированного изделия, внедрения новых сложных машин и оборудования, новых технологических приемов и изменений организации производства. В задачу технической подготовки производства входит создание технических, организационных и экономических условий, полностью гарантирующих перевод производственного процесса на более высокий технический и социально-технический уровень на основе достижений науки и техники.

В условиях современного производства с экономической точки зрения в ряде случаев выгодно не заменять еще не устаревшее (морально или физически), но не обеспечивающее требуемой точности или производительности дорогостоящее оборудование, а дополнить его новой оснасткой и инструментом. Современное состояние и перспективы развития металлообработки характеризуются широким использованием сборного режущего инструмента (рис), оснащенного сменными, механически закрепляемыми режущими элементами, выполненными из твердых сплавов, керамики и сверхтвердых материалов с поликристаллическими вставками или алмазным напылением.

Конструкции сборных режущих инструментов различаются способами установки и крепления режущих элементов – пластин, т.е. структурной компоновкой и параметрами – размерами пластин, корпусных элементов или элементов крепежа. В настоящее время отечественными и зарубежными производителями разработано и эксплуатируется большое количество сборных инструментов одинакового целевого назначения, а выбор подходящей конструкции осуществляется в основном на основании рекламных материалов или производственного опыта.

Повысить обоснованность принимаемых решений возможно на основе автоматизации процедур формирования и выбора структурных компоновок сборных режущих инструментов. В работе данная задача решена методом булева линейного программирования [1].

К классу задач оптимизации с булевыми переменными относятся такие задачи оптимизации, в которых переменные могут принимать только значения «0» или «1». Общая задача булева линейного программирования может быть сформулирована следующим образом. Необходимо найти максимум линейной целевой функции  $n$  переменных следующего вида:

$$c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \rightarrow \max(\min) \quad (1)$$

$$x \in \Delta_\beta$$

где множество допустимых альтернатив  $\Delta_\beta$  формируется следующей системой ограничений типа равенств и неравенств:

$$\begin{cases} a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n = b_i & (\forall i \in (1, 2, \dots, q)) \\ a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + \dots + a_{kn}x_n \leq b_k & (\forall k \in (q + 1, \dots, m)) \\ x_1, x_2, \dots, x_n \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (2)$$

При анализе множества допустимых альтернатив  $\Delta_\beta$  общей задачи булева программирования оказывается справедливой одна из двух возможных ситуаций:

1. Система ограничений противоречива или несовместна, т.е. не существует такого набора значений переменных, которые удовлетворяют ограничениям. В этом случае задача булева программирования не имеет решения.

2. Система ограничений не является противоречивой. В этом случае задача булева программирования имеет решение, которое, в общем случае, может быть не единственным.

Следует учитывать, что множество допустимых альтернатив  $\Delta_\beta$  любой задачи булева программирования должно иметь конечную мощность, т.е. множество допустимых альтернатив должно быть конечно. Мощность пустого множества равна «0».

С учетом изложенного множество допустимых альтернатив  $\Delta_\beta$  формируется следующей системой ограничений типа равенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n x_{sj} - \sum_{i=1}^n x_{is} = 1 \\ \sum_{j=1}^n x_{tj} - \sum_{i=1}^n x_{it} = -1 \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^n x_{ji} = 0, \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq s, i \neq t) \\ x_{ij} \in \{0, 1\} (\forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}) \end{array} \right. \quad (3)$$

Система выражений (3) определяет следующие условия:

- искомый путь должен начинаться в вершине  $x_s$ ;
- искомый путь должен заканчиваться в вершине  $x_t$ ;
- искомый путь должен проходить через промежуточные вершины графа (ограничение связности оптимального пути графа).

Общее количество ограничений (3) равно  $n+1$  ( $n$  – количество вершин графа). Последнее ограничение системы (3) требует, чтобы переменные  $x_{ij}$  принимали только булевы значения, которые интерпретируются следующим образом. переменная  $x_{ij}$  равна «1», если дуга  $(x_i, x_j)$  входит в искомый путь оптимальной длины, и  $x_{ij}$  равна «0», в противном случае, т. е. если дуга  $(x_i, x_j)$  не входит в оптимальный путь.

Для автоматизации процедуры формирования множества вариантов структурных компонок обобщенной конструкции рис в качестве переменных математической модели были выбраны следующие сборочные элементы, наиболее общие для различных типов сборных инструментов:  $x_{11}$  – корпус или державка;  $x_{12}$  – узел крепления кольца корпуса;  $x_{13}$  – кольцо корпуса;  $x_{14}$  – узел крепления элемента корпуса;  $x_{15}$  – элемент корпуса;  $x_{1(n-1)}$  – узел крепления кассеты;  $x_{1n}$  – кассета;  $x_{21}$  – узел установки опорной пластины;  $x_{22}$  – узел крепления опорной пластины;  $x_{23}$  – опорная пластина;  $x_{31}$  – узел установки стружколома;  $x_{32}$  – узел крепления стружколома;  $x_{33}$  – стружколом;  $x_{41}$  – узел крепления режущей пластины;  $x_{42}$  – режущая пластина (СМП) и другие элементы.

Множество возможных компонок инструмента сформировано в виде системы ограничений, разработанной на основе ориентированных графов сетевой структуры  $g=(x, e, h)$  (рис. 1, 2), где  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множество вершин графа, описывающее варианты конструктивных исполнений инструментов;  $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  – множество дуг графа, описывающее влияние каждого конструктивного исполнения сборочного элемента на критерий предпочтения;  $H=\{h_1, h_2, \dots, h_m\}$  – весовая функция дуг [2]. для математической постановки задачи удобно обозначить отдельные значения весовой функции дуг через  $c_{ij}=h(e_k)$ , где дуга  $e_k \in e$  соответствует упорядоченной паре вершин  $(x_i, x_j)$ . при этом в качестве значений  $c_{ij}=h(x_i, x_j)$  могут быть использованы какие-либо функциональные или качественные составляющие от включения каждого сборочного элемента в компоновку инструмента (связь  $i$ -го и  $j$ -го сборочного элемента).

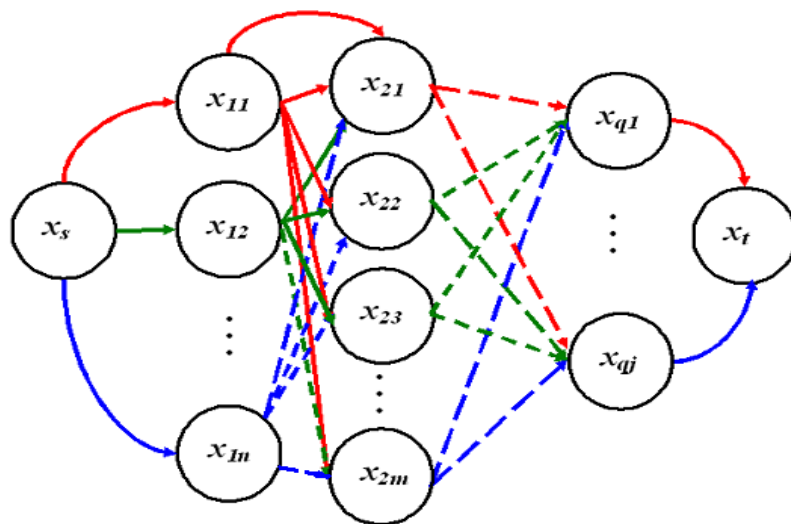


Рис. 1. Сетевой граф формирования вариантов структурных компонок сборных режущих инструментов

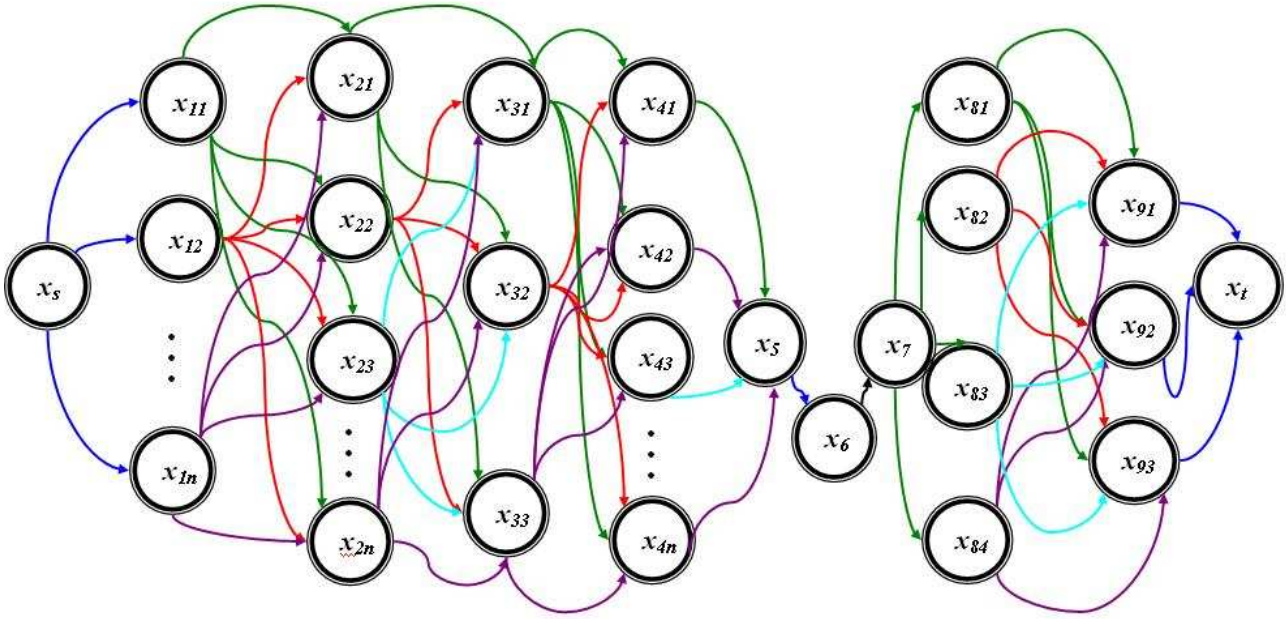


Рис. 2. Сетевой граф выбора сменных пластин для точения

Здесь вершины  $X_{11}-X_{1n}$  обозначают форму пластины:  $P (X_{11}); R (X_{12}); S (X_{13}); T (X_{14}); C, D, E, M, V (X_{15}); L (X_{16}); W (X_{17}); A, B, K (X_{18}); Z (X_{19})$ ; вершины  $X_{21}-X_{2n}$  обозначают задний угол пластины:  $A (X_{21}), B (X_{22}), C (X_{23}), D (X_{24}), E (X_{25}), F (X_{26}), G (X_{27}), N (X_{28}), P (X_{29}), O (X_{210})$ ; вершины  $X_{31}-X_{3n}$  обозначают класс точности:  $G (X_{31}), M (X_{32}), U (X_{33})$ ; вершины  $X_{41}-X_{4n}$  обозначают тип пластины:  $A (X_{41}), G (X_{42}), M (X_{43}), N (X_{44}), P (X_{45}), R (X_{46}), T (X_{47}), W (X_{48}), X (X_{49})$ ;  $X_5$  - длина режущей кромки;  $X_6$  - толщина пластины;  $X_7$  - радиус при вершине; вершины  $X_{81}-X_{8n}$  обозначают форму режущей кромки:  $F (X_{81}), E (X_{82}), T (X_{83}), S (X_{84})$ ; вершины  $X_{91}-X_{9n}$  обозначают исполнение пластины:  $R (X_{91}), L (X_{92}), N (X_{93})$ .

Таким образом, для сетевой структуры, представленной на рис. 1, математическая модель формирования структурных компоновок имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} &x_s x_{11} + x_s x_{12} + \dots + x_s x_{1n} = 1 \\ &x_t x_{q1} + x_t x_{q2} + \dots + x_t x_{qj} = 1 \\ &x_s x_{11} - x_{11} x_{21} - x_{11} x_{22} - \dots - x_{11} x_{2m} = 0 \\ &x_s x_{12} - x_{12} x_{21} - x_{12} x_{22} - \dots - x_{12} x_{2m} = 0 \\ &..... \\ &x_s x_{1n} - x_{1n} x_{21} - x_{1n} x_{22} - \dots - x_{1n} x_{2m} = 0 \\ &x_{11} x_{21} + x_{12} x_{21} + \dots + x_{1n} x_{21} - x_{21} x_{q1} - \dots - x_{21} x_{qj} = 0 \\ &x_{11} x_{22} + x_{12} x_{22} + \dots + x_{1n} x_{22} - x_{22} x_{q1} - \dots - x_{22} x_{qj} = 0 \\ &..... \\ &x_{11} x_{2m} + x_{12} x_{2m} + \dots + x_{1n} x_{2m} - x_{2m} x_{q1} - \dots - x_{2m} x_{qj} = 0 \\ &x_{21} x_{q1} + x_{22} x_{q1} + \dots + x_{2m} x_{q1} - x_{q1} x_t = 0 \\ &..... \\ &x_{21} x_{q2} + x_{22} x_{q2} + \dots + x_{2m} x_{q2} - x_{q2} x_t = 0 \\ &x_s x_{11}, x_s x_{12}, \dots, x_s x_{1n}, x_t x_{q1}, x_t x_{q2}, \dots, x_t x_{qj}, x_s x_{11}, x_{11} x_{21}, x_{11} x_{22}, \dots, \\ &x_{11} x_{2m}, x_s x_{12}, x_{12} x_{21}, \dots, x_{12} x_{2m}, \dots, x_{1n} x_{21}, x_{21} x_{q1}, \dots, x_{21} x_{qj}, \dots, \\ &x_{1n} x_{22}, \dots, x_{22} x_{qj}, \dots, x_{11} x_{2m}, \dots, x_{1n} x_{2m}, \dots, x_{2m} x_{qj}, \dots, \\ &x_{2m} x_{q1}, x_{q1} x_t, \dots, x_{2m} x_{q2}, x_{q2} x_t \in \{0,1\} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Количество возможных вариантов структурных компоновок соответствует множеству обходных путей графа, которые формируются следующим образом.

Вначале необходимо задать количество слоев, которое определяет какой-либо конструктивный признак сборочного элемента. Далее следует задать глубину каждого слоя, которая определяет варианты исполнений каждого конструктивного признака сборочного элемента. При этом следует отметить, что при формировании сетевой структуры для заданной совокупности сборочных элементов изделий, например с использованием каталогов производителей, количество конструктивных признаков и вариантов их исполнений являются величинами конечными. При формировании сетевой структуры, концептуально описывающей какой-либо класс сборочных элементов изделий, величины, определяющие количество и глубины слоев, будут бесконечными. Последнее необходимо предусмотреть для того, чтобы обеспечить единство сетевой структуры и индексации ее вершин при дополнении новыми конструктивными признаками или вариантами их исполнений, что необходимо при создании новых конструкций сборных режущих инструментов.

Таким образом, множество слоев и их глубин формирует множество вершин сетевого графа  $x_j$ , где  $x$  – наименование переменной, отражающей какой-либо конструктивный признак сборочного элемента изделия,  $i$ - переменная, характеризующая порядковый номер слоя графа;  $j$ - переменная, характеризующая глубину  $i$ -го слоя графа.

Дальнейшее формирование сетевой структуры производится путем определения обходных путей графа, образующихся объединением множества ребер, с использованием общего правила (3).

Выбор оптимального (минимального или максимального) пути в графе из множества возможных обходных путей следует производить по свертке значений весов ребер. В качестве весов ребер могут быть приняты любые известные технико-экономические характеристики элементов или критерии, в частности стоимость, вес, жесткость и т.д. Следует отметить, что изменение критерия выбора не оказывает влияние на сформированную сетевую структуру, а влияет только на выбор какого-либо обходного пути в качестве оптимального. Указанное положение послужило основой для разработки алгоритма и программного обеспечения синтеза вариантов структурных компоновок сборных токарных резцов и торцовых фрез.

Выбор оптимального варианта конструкции инструмента производится на основе заданных критериев предпочтения с использованием целевых функций следующего вида:

$$\begin{aligned}
 & C_{x_s x_{11}} \cdot x_s x_{11} + C_{x_s x_{12}} \cdot x_s x_{12} + \dots + C_{x_s x_{1n}} \cdot x_s x_{1n} + C_{x_{11} x_{21}} \cdot x_{11} x_{21} + C_{x_{11} x_{22}} \cdot x_{11} x_{22} + \\
 & + \dots + C_{x_{11} x_{2m}} \cdot x_{11} x_{2m} + C_{x_{12} x_{21}} \cdot x_{12} x_{21} + C_{x_{12} x_{22}} \cdot x_{12} x_{22} + \dots + C_{x_{12} x_{2m}} \cdot x_{12} x_{2m} + \\
 & + \dots + C_{x_{1n} x_{21}} \cdot x_{1n} x_{21} + C_{x_{1n} x_{22}} \cdot x_{1n} x_{22} + C_{x_{1n} x_{2m}} \cdot x_{1n} x_{2m} + C_{x_{21} x_{q1}} \cdot x_{21} x_{q1} + \\
 & + \dots + C_{x_{21} x_{qj}} \cdot x_{21} x_{qj} + \dots + C_{x_{22} x_{q1}} \cdot x_{22} x_{q1} + \dots + C_{x_{22} x_{qj}} \cdot x_{22} x_{qj} + \dots + C_{x_{2m} x_{q1}} \cdot x_{2m} x_{q1} + \\
 & + \dots + C_{x_{2m} x_{qj}} \cdot x_{2m} x_{qj} + C_{x_{q1} x_t} \cdot x_{q1} x_t + \dots + C_{x_{qj} x_t} \cdot x_{qj} x_t \rightarrow \min(\max, \quad (5)
 \end{aligned}$$

где  $C_{ij}$  - весовая значимость дуги графа.

При наличии одного критерия предпочтения задача выбора оптимального варианта конструкции инструмента сводится к поиску минимального или максимального пути в графе, соответствующему минимальному или максимальному значению целевой функции. При необходимости учета множества критериев предпочтения выбор оптимального варианта конструкции инструмента сводится к расчету аддитивной или мультипликативной свертки частных критериев:

$$\Phi_{ad} = \sum_{i=1}^n \Phi_i K_{zn_i} - \sum_{j=1}^m \Phi_j K_{zn_j} \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$\Phi_m = \frac{\prod_{i=1}^n \Phi_i}{\prod_{j=1}^m \Phi_j} \rightarrow \max, \quad (7)$$

где  $n, m$  - число максимизируемых и минимизируемых частных критериев соответственно;  
 $\Phi_i, \Phi_j$  - целевые функции частных критериев предпочтения;  
 $K_{zn_i}, K_{zn_j}$  - коэффициент значимости  $i$ -го и  $j$ -го частного критерия предпочтения соответственно.

Уменьшить влияние неравноценного характера влияния абсолютных значений отдельных целевых функций на итоговый результат при формировании аддитивных сверток возможно путем шкалирования значений целевых функций частных критериев  $\Phi_i, \Phi_j$  относительно их возможных экстремальных значений  $\Phi_{i_{\max}}, \Phi_{j_{\min}}$ :

$$\Phi_{ad} = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i K_{zn_i}}{\Phi_{i_{\max}}} - \sum_{j=1}^m \frac{\Phi_j K_{zn_j}}{\Phi_{j_{\min}}} \rightarrow \max. \quad (8)$$

Здесь  $K_{zn_i}, K_{zn_j}$  - коэффициент значимости  $i$ -го и  $j$ -го частного критерия предпочтения соответственно.

Разработанная математическая модель, состоящая из целевых функций (5)-(8) и системы ограничений (4), реализована в среде электронных таблиц Microsoft Excel. Выбор Microsoft Excel в качестве инструмента обоснован наличием встроенных функций и алгоритмов поиска решения, высокой доступностью и наглядностью приложения [3].

Разработанная методика была реализована на примере сборных токарных резцов и торцевых фрез. При решении практических задач выбора вариантов структурных компоновок рис установлено, что в качестве критерия предпочтения может выступать любой критерий, полученный по результатам производственной деятельности изготовителя инструмента, в частности пригодность пластин для обработки различных материалов. Из такой постановки следует, что должны быть рассмотрены такие варианты пластин, которые могут выполнить заданную работу только с различной эффективностью, т.е. должны быть рассмотрены альтернативные варианты СМП. В этой связи определенную трудность составляет формирование целевой функции выбора оптимального варианта, поскольку, оценить степень пригодности СМП для обработки различных материалов, используя аналитические методы, практически не возможно.

В этом случае в качестве значений степеней соответствия каждого варианта каждому критерию соответствия при формировании целевых функций следует принимать координаты точек графиков, значения ячеек таблиц или баллы, полученные экспериментальным или экспертным путем.

Произведенная апробация аналитических моделей сетевых структур на примере сборных режущих инструментов показала, что разработанные прикладные аналитические и сетевые граф-модели работоспособны, наглядны, универсальны и могут быть автоматизированы с использованием инструментальных средств персональных компьютеров. Граф-модели обеспечивают единство сетевой структуры и индексации ее вершин при ее дополнении новыми конструктивными признаками или вариантами их исполнений, и могут быть использованы при создании новых элементов сборных режущих инструментов.

## Заключение

Численные эксперименты с использованием разработанных моделей позволили произвести выбор оптимальных вариантов конструкций сборных режущих инструментов по заданной системе критериев предпочтения.

Разработанные теоретические положения и алгоритмы реализованы инструментальными средствами современных персональных компьютеров, отличаются универсальностью и могут быть использованы для выбора формирования, выбора и ранжирования вариантов структурных компоновок изделий машиностроения различного целевого назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Системный анализ и принятие решений: словарь-справочник: Учеб. пособие для ВУЗов. / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М.: Высш. шк., 2004. 616 с.
2. Лукина С.В. Моделирование процедур формирования и выбора структурных компоновок сборных режущих инструментов на основе сетевых граф-моделей // Обработка резанием. 2009. №2. с. 28-31.
3. Гай Харт-Дэйвис. Excel 2007. Полное Руководство: Нт Пресс, 2008. 560 с.

**Лукина Светлана Валентиновна** –  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Экономика и управление предприятием»  
Московского государственного  
технологического университета «СТАНКИН»

**Lukina Svetlana Valentinovna** –  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department “Economics and Industrial  
Management”, Moscow State Technological  
University “STANKIN”

*Статья поступила в редакцию 21.03.2011, принята к опубликованию 10.08.2011*

УДК 316.754.4

**К.Ю. Добрин**

### **ФЕНОМЕН СОЦИАЛЬНОЙ НОРМЫ**

*Анализируется феномен социальной нормы, процесс ее трансформации на различных этапах развития общества в контексте наиболее значимых методологических подходов к ее пониманию и возможные пути существования общества в контексте имеющихся в настоящее время идеологий.*

Социальная норма, ритуал, обычай, традиция, anomia, культура, относительность социальной нормы

**K.Yu. Dobrin**

### **PHENOMENON OF SOCIAL NORM**

*The phenomenon of social norm, the process of its transformation at different stages of social development within the most important methodological approaches to its understanding is analyzed. Potential ways of society existence in the context of the currently available ideologies are predicted.*

Social norm, ritual, rite, custom, tradition, anomie, culture, relativity of social norm

Социология отклоняющегося (девиантного) поведения зародилась и сформировалась в недрах общей социологии. Большая заслуга в этом принадлежит Р. Мертону, который ввел научный термин теория «среднего уровня» (значения). В данных теориях сформирована система специфических понятий и определений, применяемых только в конкретной области социологических исследований. Социологи, занимающиеся узкими областями исследования, разрабатывают специфический понятийный аппарат, проводят эмпирические исследования по своей группе проблем, обобщают полученные данные, делают теоретические обобщения и, наконец, соединяют эти обобщения в теорию в пределах своей узкой области.

Все теории «среднего уровня» можно условно подразделить на три группы: теории социальных институтов (социология семьи, социология образования, социология науки и т.д.), теории социальных общностей (социология толпы, социология малых групп, социология организации и т.д.) и теории специализированных социальных процессов (социология конфликтов, социология миграции, социология мобильности и т.д.). К последней группе относится и социология девиантного поведения.

В настоящее время теория девиантного поведения находит широкое применение в практической деятельности и образовательной подготовке юристов, психологов, педагогов, социальных антропологов и социальных работников. Специфика предмета социологии девиантного поведения состоит в том, что изучаемый ею круг явлений исторически изменчив и зависит от сложившихся в данный момент в конкретном обществе социальных норм. Следовательно, исходным для понимания отклонений служит понятие нормы.

Существует множество дефиниций социальных норм. Так, например, по мнению В. Томаса и Ф. Знанецкого: «Социальные нормы – это более или менее формальные правила, с помощью которых группа старается удерживать, регулировать, а также сделать более



распространенными и частными соответствующими типами действий среди своих членов» [15]. Согласно В.Г. Афанасьеву [1], социальная норма - это неотъемлемый элемент общественного управления, одно из средств ориентации поведения личности или социальной группы в определенных условиях и средство контроля со стороны общества за их поведением. По В.Н. Кудрявцеву [8], социальные нормы – это установленные обществом правила, определяющие устойчивые формы социального взаимодействия людей. В целом в данных дефинициях содержится функционалистское объяснение нормы, состоящее в ее важности и полезности для индивида, социальных групп, организаций и общества в целом. Мы полагаем, что в определении социальной нормы должен учитываться еще и культурный и исторический аспект, а также специфика общественного устройства, вариабельность поведения субъекта (индивида). В связи с этим, считаем уместным привести еще одну дефиницию социальной нормы, предложенную Я.И. Гилинским: «Социальная норма – исторически сложившийся в конкретном обществе предел, мера, интервал допустимого (дозволенного или обязательного) поведения, деятельности людей, социальных групп, социальных организаций» [3]. В данном понятии, определяющем понятие норму как «исторически сложившийся предел» и «конкретное общество», обогащается и уточняется понимание сущности социальной нормы. Таким образом, принимая за основу определение Я.И. Гилинского, можно предложить следующую дефиницию: «Социальная норма – это формализованный или неформализованный предел, мера допустимого (дозволенного или должного) поведения, деятельности людей, социальных групп и сообществ, исторически и культурно сложившиеся в конкретном обществе».

Обращаясь к сущности и причинам возникновения социальной нормы, отметим, что она возникает с появлением человеческого общества. Согласно Е.М. Пенькову [10], объективной ее основой является то, что в поступках и действиях людей присутствует не только изменчивость, неповторимость и динамика, но и относительное постоянство и повторяемость. Социальная норма регулирует только такое поведение, которое имеет общественный характер, т.е. связано с взаимоотношениями между индивидами, коллективами, классами, обществом. Этим социальная норма отличается от технической, медицинской или биологической, устанавливающей правила взаимодействия с естественными или искусственными объектами.

Исторически были выработаны самые различные способы существования социальных норм, среди которых в качестве основных можно назвать ритуалы, обычаи, традиции, нравы, культуру. Ритуалы есть зародышевый способ существования социальных норм, в котором они еще не выделились как социальный институт. Аборигену Австралии или индейцу не пришло бы в голову считать, что весь порядок его жизни может регулироваться с помощью каких-то специальных законов, данных извне, поскольку все, что было нужно для поддержания порядка, воспроизводилось с помощью системы ритуалов, тотемов, плясок шаманов и прочих мифологизированных элементов.

Обычай стал первым публичным способом существования социальных норм в их освобожденном от мифов виде. Обычай - это способ воспроизводства социальных норм сословного характера. Субъектом этих норм становится не община в целом, а выделившиеся социальные группы в виде сословий. Принцип обычая таков: то, что допустимо в рамках норм одного сословия, не разрешается по нормам жизни другого.

С возникновением классовой структуры общества механизм регулирования социального поведения осуществляется господствующим классом, который вырабатывает свою идеологию, ценности и нормы. Полезность социальной нормы становится относительной, поскольку норма, полезная для интересов одного класса (социальной группы), может быть нейтральной или даже вредной для другого. По мнению Р. Дарендорфа, в настоящее время классовый характер социальной нормы не изменился: «Установление нормы идет не путем репрезентативных опросов и мнений, а путем выборочных, в которых участвуют, прежде всего «власть имущие» - парламентарии, члены правительства, которые выступают от имени общества» [13]. В связи с этим установленная норма не всегда

удовлетворяет потребности большинства членов общества. Социальные нормы могут выражаться в универсальной форме: в виде социальных установок («будь богатым!»), культурных традиций (ментальности), нравов общества (легкие и тяжелые и др.) и институтов культуры как совокупности общих требований к человеку «будь человеком» [7].

В результате действия через внутренние регуляторы поведения личности, которые формируются через решение проблем соотношения добра и зла, совести и ответственности, убеждения и раскаяния, чувства справедливости и гуманности, возникает мораль как интериоризированная социальная норма.

Одной из существенных сторон социальных норм является императивность (безусловность, не допускающая иного выбора). Она выражается в степени требовательности к характеру поведения человека, когда оценивается его соответствие социальным нормам. Степень императивности социальной нормы зависит от вида нормы. Наибольшей императивностью обладают, как правило, правовые нормы. Однако не меньшей категоричностью могут обладать и моральные нормы, если они связаны с высоким уровнем чувства ответственности личности. Согласно И. Канту [12], категорический императив - это всеобщий обязательный нравственный закон, которому должны подчиняться все люди, независимо от их происхождения, социального положения и т.д. Согласимся с Кантом, поскольку считаем, что понятие нравственности еще существует (за исключением, может быть, отдельных воззрений таких личностей, как Ф. Ницше: «...бог умер») и, возможно, именно понимание и выполнение моральных и нравственных норм по отношению к другому индивиду или группе является путеводной нитью, которая спасет человечество от самоуничтожения. Особенно необходимо осознавать это именно сегодня, в эпоху постиндустриального общества и постмодернистских взглядов.

На сегодняшний день мы бы выделили несколько ключевых теорий, которые отражают различные вехи развития человеческого общества и трансформации социальной нормы в них: это промышленная стадия развития общества, индустриальная и постиндустриальная. На этих этапах развития общества менялась не только техника и технология, но и идеология, которая воплощалась именно в социальных нормах и ценностях. Одна из самых идеологических авторитетных теорий, которая сложилась на стадии перехода из промышленного в индустриальное общество – структурный функционализм, яркими представителями которого являлись Т. Парсонс и Р. Мертон. Данные представители видели социальную норму оплотом порядка, стабильности общества, государства, человеческого общества.

По мнению Т. Парсонса [14] (представитель структурного функционализма), социальным нормам приписываются два типа функций: во-первых, обеспечение членов общности и общества эталонами, моделями, стандартами поведения; во-вторых, стабилизация, интеграция отношений в социуме. По мнению же Э. Дюркгейма (идеолога данного направления) [6], одним из важных вопросов при изучении норм является рассмотрение их функциональной значимости. Функциональная важность нормативного порядка состоит в том, что интегрирующей основой общества является социальная солидарность, которая возникает в результате общественного разделения труда и проявляется в общих верованиях, чувствах, ценностях и нормах. Ослабление норм влечет за собой потерю связей между людьми, что грозит дезинтеграцией общества [5]. Вообще в функционализме содержание норм связывается с культурой. Культура трансформирует социальные нормы в систему ценностей, которые пронизывают всю духовную жизнь общества. Культура, в виде освоенной и устоявшейся системы норм, постоянно воспроизводит существующий порядок общества, является основанием его структурированности и интегрированности.

С наступлением эпохи постиндустриализма и информационного общества (60-70 годы XX-го века) взгляды на нормы и их функции стали меняться. Так, теоретики постмодернизма полагают, что определяющим фактором поведения человека является не норма, а социальная информация. Если в индустриальном обществе источником социальных норм является механизм легитимации, создаваемый властью, то в обществе «постмодерна» доминирующим

источником легитимации становится информация. В эпоху информатики вопрос о знании становится вопросом об управлении. Например, в чьих руках СМИ – в тех руках и власть. Поэтому утрата нормативности общества обозначается как «утрата легитимности», «делигитимация», которая возникает в результате преобладания «спекуляционных дискурсов» и кризиса знания. Так, Ж.Ф. Лиотар [9] полагает, что современное общество перестает быть большой социальной системой с соответствующей ей всеобщей детерминацией, подчиняясь «прагматике языковых частиц». Локальная детерминация разрушает возможность создания эффективного функционирования классических систем управления в виде централизованного государства с вертикальными линиями управления. Следуя логике этих рассуждений, в условиях локальной детерминации критерием нормативности является эффективность и производительность, а не справедливость и гуманность. По мнению Лиотара, видимо, поэтому российское современное общество многими называется постмодернистским, в котором, вместо регуляции посредством социальных норм в обществе, существует локальная детерминация, выражающаяся в революционном насилии, криминальном терроре и политических технологиях.

Отчасти можно согласиться с мнением Лиотара (что касается ситуации с нормативной системой в информационном обществе) о перевесе индивидуального по сравнению с групповым и локального над общественным. Однако разве не западные ценности в течение последних 20 лет прививаются нам, разве не североамериканскую и отчасти европейскую модель демократии (часто «псевдодемократии») пытается «навязать» нам западный мир? Он говорит о победе локальной детерминации над всеобщей, а как же тогда понимать феномен глобализации (попытку привести к общему знаменателю всю экономику, политику и культуру различных государств, т.е. создать однополярный мир, в условиях жесточайшего территориального, географического, социального неравенства в странах)? В этом, на наш взгляд, состоит философия абсурда постмодернизма, абсурда внеморального (внеценностного) и по большей части негуманного.

Постиндустриальное общество, как и любая другая эпоха, строит, диктует правила существования и выживания в повседневной, реальной жизни. Сам «постмодерн» (современность) отрицает что-то устоявшееся, общепринятое в науке и культуре. Несмотря на это, весь современный человеческий мир стремится к унификации, упрощению быта, социальных действий, мышления. Это парадокс. Норма и девиация здесь сливаются и противоречат одновременно. Индикатором, на наш взгляд, в проведении демаркационной линии между нормой и девиацией может послужить соотношение категорий «добра» и «зла». Если придерживаться направления, что добро и зло амбивалентно, то можно писать художественные эпосы и посвятить себя изучению основ субъективного идеализма. Если же нет, то стоит окунуться в реальный мир, наполненный аргументами и фактами.

Для более полного понимания категории социальной нормы коснемся вопроса о сущности такого явления как аномия. Впервые понятие аномии ввел Э. Дюркгейм [6], под которой он понимал состояние общества, при котором отсутствует четкая регуляция поведения индивидов, моральный вакуум, когда старые нормы и ценности уже не соответствуют реальным отношениям, а новые еще не утвердились. Дюркгейм, критикуя модернизацию в Европе в XIX веке, видел дисфункции, проистекающие из недостаточной интеграции возникающих современных институтов. Люди все больше ощущают, что разные части общества не работают совместно и им не хватает солидарности жизни, ее цельности, по сравнению с чувством общности, существовавшими в аграрную эпоху. По мнению Р. Будона [4], аномия имеет место, когда действия индивида больше не регулируются четкими и обязательными нормами. Основной причиной отклонения от нормы в современном обществе он, как и Дюркгейм, видел в аномии. Постепенное ослабление социального контроля, вызванное недостаточной социальной и моральной интеграцией, ведет к индивидуализму, который называют болезнью современного мира». Несколько по-другому видит аномию Д. Плахов [11]. По его мнению, в чистом виде аномии не встречаются, потому что в массе случайных проявлений всегда обнаруживаются некоторые вероятностные закономерности

(нормы). Любую норму сопровождает и дополняет аномия. Также и в аномии всегда имеются элементы нормативного. В качестве антипода нормы выступает не аномия, а аномалия. Под ней Д. Плахов понимает отклонение от нормы, но не в сторону безнормия, а в сторону другой нормы. Аномальные образования не являются безнормативными, а являются нормами, не отвечающими историческому и культурному развитию конкретного общества. В связи с этим хотелось бы затронуть вопрос об относительности норм.

По мнению Я.И. Гилянского [2], относительность социальных норм состоит в том, что они могут быть различны по своему характеру и содержанию не только в разное время и в разных обществах, но и в одно и то же время в одном обществе, но в разных социальных группах. Так, непосещение церковной службы является отклонением с позиции верующего, но нормой с позиции неверующего. Сосуществуют вместе нормы богемы, «истеблишмента», воровские законы, нормы различных религиозных сообществ, нормы молодежных субкультур (хиппи, панки, рокеры, митьки, яппи и другие). Поскольку настоящее время отличается высокими темпами социального развития, постольку ценностные ориентации и оценки людей меняются достаточно быстро. Правовые нормы (правда, в разных культурах и обществах) также относительны. Например, во многих странах Западной Европы смертная казнь за совершенные преступления уже отменена, тогда как в странах Востока она существует. Или, например, возраст ответственности за совершенные поступки в разных государствах колеблется от 11 до 18-21 лет. Кроме того, правовые нормы могут не совпадать с моральными и также подвергаться изменению. В основе моральных норм лежат представления людей о добре и зле, о чести и долге, о справедливости. Для того чтобы понять, насколько эти представления в разные времена и культуры отличаются друг от друга, обратимся к истории.

Среди некоторых народов в 17-18 веке было принято подвергать наказанию не вора, а того, кто имел неосторожность подвергнуться ограблению. Так учили заботиться о сохранении собственности. В средние века на некоторых островах (например, в Минданао) человек, желающий убить кого-либо, возводился в ранг храбрецов. Жители острова Борнео считали, что убитые ими люди на том свете станут рабами своих убийц. У некоторых примитивных племен в первобытное время (кое-где и сегодня) каннибализм, геронтоцид (убийство стариков), инфантицид (убийство детей), кровосмешение считались нормальным явлением, вызванным экономическими причинами (дефицит продуктов питания), либо социальным устройством (разрешение брака между родственниками). В Генуе, Венеции, Неаполе, Албании народы терпимо относились к публичным убийствам. Примером относительности социальной нормы у нас в стране может служить спекулянт-преступник и коммерсант-кормилец – в настоящее время. Приведенные примеры различий в нормах морали и права затрудняют поиск решений в объективности социальной нормы (прежде всего не в правовой, а в нравственной (моральной)).

Таким образом, проанализировав феномен социальной нормы, сделаем ряд обобщений. Исходным для понимания сущности социальных отклонений служит понятие нормы. Социальная норма может существовать в виде ритуалов, обычаев, традиций, нравов, культуры. В разные времена и эпохи норма воспринималась по-разному. Так, в традиционном обществе она сохраняет порядок в родовом коллективе. Все, что нужно было для поддержания порядка, воспроизводилось при помощи ритуалов, тотемов, плясок шаманов и других мифологизированных элементов. Социальная норма проявляется здесь как монопольная (всеобщая и полезная). Обычай был уже связан не с родом, общиной, а с выделенными социальными группами в виде сословий.

С появлением классовой структуры норма устанавливается господствующим классом и становится относительной, т.е. она может быть полезна для одних, нейтральна для других и вредна для третьих. В средние века (V-XV в.) постепенно социальные нормы, существующие в виде обычаев, стали складываться в традиции, которые передавались в неизменном виде. В период индустриального развития понятие нормы является центральным в понимании культуры (прежде всего в трактовке функционализма). Культура здесь легализует нормы и

воспроизводит их, придавая обществу определенный порядок. Культура трансформирует социальные нормы в систему ценностей, которые пронизывают всю духовную жизнь общества. В эпоху постиндустриального и информационного общества, по мнению теоретиков постмодернизма, критерием нормативности является не гуманность и справедливость, а эффективность и производительность.

Сторонники макросоциологических теорий (прежде всего позитивизма и функционализма) считают, что понятие социальной нормы раскрывается через ее регулятивную и интегративную функцию, обеспечивающую стабильность социальной системы и входящих в нее элементов. В основе микросоциологических концепций (феноменология, символический интеракционизм) лежит положение, что социальная жизнь - динамический процесс, и норма является социально конструируемой и относительной категорией. Локальная детерминация первична по отношению к всеобщей. Норма и отклонения амбивалентны друг другу.

Тем не менее, мы полагаем, что нормы являются охранниками всеобщего порядка. Без норм (без нравственного императива по Канту) человечеству прожить просто невозможно, поскольку оно подошло к такой точке бифуркации, когда одна нелепая ошибка в отношениях между странами, государствами, их культурами может привести к гибели цивилизации. Надеемся и желаем, что мониторинги (исследования), проводимые сегодняшним руководством страны, будут направлены, прежде всего, на воспитание, поддержание и развитие культуры человека, образования, здоровья: социального, психического и физиологического. Это, на наш взгляд, является квинтэссенцией современного состояния развития не только нашего общества, но и любого другого.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.Г. Социальная информация и управление обществом. М.: Политиздат, 1975. 408 с.
2. Гишинский Я.И. Девиантология: социология преступности, наркотизма, проституции, самоубийств и других отклонений. СПб.: Издательство «Юридический центр Пресс», 2004. 520 с.
3. Гишинский Я.И. Социология девиантного поведения и социального контроля. СПб.: Филиал ИС РАН, 1993. С. 34.
4. Деболт Дж. У. Причины и следствия неудач модернизации в России: социокультурный анализ // Социс. 2006. № 1. С. 24-25.
5. Дюркгейм Э. О разделении общественного труда // Западноевропейская социология XIX-XX веков. М., 1996. С. 256-309.
6. Дюркгейм Э. Норма и патология // Рубеж: Альманах социальных исследований. Сыктывкар. 1992. № 2. С. 82-88.
7. Козырьков В.П. Природа девиации и структура социальных норм // Вестник ННГУ. Сер. «Социальные науки». Вып. 1(3). Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2004. С. 159-171.
8. Кудрявцев В.Н. Социальные деформации: механизмы и пути преодоления. М.: «Издательство ИГиП РАН», 1992. 133 с.
9. Лиотар Ж.-Ф. Состояние постмодерна. СПб.: Алетейя, 1998. 160 с.
10. Пеньков Е. М. Социальные нормы: управление, воспитание, поведение. М.: Высшая школа, 1990. 96 с.
11. Плахов В.Д. Социальные нормы: философские основания общей теории. М.: Мысль, 1985. 253 с.
12. Современный словарь иностранных слов. М.: Рус. яз., 1993. 740 с.
13. Darendorf R. «Homo-Sociologicus». Koln und Opladen, 1960. P.87. / Бобнева М.И.. Социальные нормы и регуляция поведения. М.: Наука, 1978. С. 167.
14. Parsons T. The structure of Social Actoin. N.Y., 1937. / Бобнева М.И.. Социальные нормы и регуляция поведения. М.: Наука, 1978. С. 63.

15. Thomas W., Znaneccki F. Chi. Op polski w Europe I Ameryce. Warszawa: Lud. Spoldz. Wyd., 1976. Т. 1. S. 61. / Ручка А.А.. Ценностный подход в системе социологического знания. Киев: Наукова думка, 1987. С. 112.

**Добрин Кирилл Юрьевич** –  
кандидат социологических наук, доцент  
кафедры менеджмента туристического  
бизнеса, Саратовский государственный  
технический университет

**Dobrin Kirill Yurievich** –  
Candidate of Social Sciences, Senior Lecturer of  
the Department «Management of Tourist  
Business», Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 19.01.2011, принята к опубликованию 12.06.2011*

УДК [371.014+37.036](470.344)

**Н.Б. Смирнова**

**РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ СОДЕРЖАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО  
ХУДОЖЕСТВЕННО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА  
НАРОДНОГО ДЕКОРАТИВНО-ПРИКЛАДНОГО ИСКУССТВА**

*В статье на примере отдельного компонента «творческий потенциал и опыт творческой деятельности в процессе использования народного декоративно-прикладного искусства» содержания непрерывного художественно-педагогического образования с использованием народного декоративно-прикладного искусства раскрывается технология его формирования на допрофессиональном, профессиональном и постпрофессиональном уровнях.*

Творческий, педагогический потенциал, народное декоративно-прикладное искусство, проектирование, непрерывное художественно-педагогическое образование, учитель изобразительного искусства

**N.B. Smirnova**

**REALISATION OF THE COMPONENTS OF THE CONTENT  
OF THE CONTINUOUS ART-PEDAGOGICAL EDUCATION  
WITH THE USE OF THE PEDAGOGICAL  
POTENTIAL OF THE NATIONAL ARTS AND CRAFTS**

*In this article, on the example of the given component “artistic potential and experience of the creative work in the process of using the national arts and crafts” of the content of the continuous art-pedagogical education with the use of national arts and crafts is shown the technologies of its development on the preprofessional, professional and postprofessionaal levels.*

Creative, pedagogical potential, national arts and crafts, projecting,  
continuous art-pedagogical education, teacher of visual arts

Развитие российской системы образования и придание ему статуса непрерывного образования, выделение в нём национально-регионального компонента предопределяет наш интерес к разрешению проблемы реализации педагогического потенциала народного декоративно-прикладного искусства в региональном непрерывном художественно-педагогическом образовании.

Для этого предполагается осуществить проектирование концепции непрерывного художественно-педагогического образования с использованием педагогического потенциала народного декоративно-прикладного искусства, удовлетворяющей постоянно возрастающим потребностям общества в высокообразованных, социально активных художниках-педагогах, обладающих высокими духовными качествами, гражданскими позициями, национальным достоинством, знающих свою историю, традиции, обычаи, язык, культуру, народное искусство и реализующих это в художественно-педагогической деятельности, что позволит целенаправленно формировать личность обучающихся в соответствии с перспективами развития Российского государства в условиях меняющегося мира.

Поэтому в требования к уровню подготовки выпускника по специальности 020800 – «Изобразительное искусство» вошёл определённый перечень знаний: например, будущий учитель изобразительного искусства должен: знать обычаи и традиции народов региона; владеть системой знаний по теории и истории изобразительного, декоративно-прикладного искусства и народных промыслов в контексте мировой, отечественной, региональной, этнонациональной культуры, в том числе «знать специфику художественного краеведения и уметь организовать краеведческую и экскурсионную работу с учащимися по изучению культуры и искусства края» [2].

Непрерывное художественно-педагогическое образование – трёхуровневое и состоит из допрофессионального (детство), профессионального (базовое образование) и постпрофессионального образования (повышение квалификации, становление личности), отличных по основным направлениям работы, задачам, используемым методам и средствам обучения, формам организации художественного образования, взаимосвязанных и взаимообусловленных общими целями, принципами и задачами непрерывного художественного образования.

Проектируя данную систему, необходимо рассмотреть вопросы определения структуры содержания образовательного процесса, которые поднимались учёными-педагогами в различные временные периоды. Так, структура содержания общего образования исследовалась П. Р. Атутовым, Н. И. Бабкиным, В. С. Леднёвым, В. А. Поляковым и др. Построением и корректировкой содержания отдельных курсов (физика, химия, биология, математика, русский язык и др.) занимались И. А. Володарская, И. И. Ильясов, О. Я. Кабанова, И. П. Калошина, Н. Н. Нечаев, А. И. Подольский, З. А. Решетова, Н. Ф. Талызина, Т. В. Чельшева и др.

В современном российском обществе распространены различные концепции построения содержания образования. Их разнообразие зависит от трактовки места и функции человека в мире и обществе. Например, выделяются позиции В. В. Краевского, который тяготеет к **конструктивно-деятельностному** подходу, закладывая при этом в построение содержания общего образования и культурологический подход, наиболее полно соответствующий установкам гуманистического мышления. Они учитываются концепцией содержания образования, которая рассматривает его как «педагогически адаптированный социальный опыт человечества, изоморфный, то есть тождественный по структуре (разумеется, не по объёму) человеческой культуре, взятой в данном аспекте, во всей её структурной полноте» [3].

По мнению В. В. Краевского, содержание образования выступает в качестве педагогической модели социального опыта. Учёный определяет этапы построения данной модели, которые будут соответствовать определённому уровню формирования содержания

образования. К первому этапу он относит *уровень общего теоретического представления*, содержание которого выступает в виде представления о составе, структуре и функциях передаваемого опыта в его педагогической трактовке и состоит из четырёх основных структурных элементов: опыта познавательной деятельности, фиксированной в форме её результатов – знаний; опыта репродуктивной деятельности, фиксированной в форме способов её осуществления (умений и навыков); опыта творческой деятельности, фиксированного в форме проблемных ситуаций, познавательных задач и т. п.; опыта осуществления эмоционально-ценностных отношений.

Ко второму этапу В. В. Краевский относит *уровень учебного предмета*, который определяет содержание конкретного учебного предмета, определённые участки социального опыта, которым должен овладеть обучающийся в его рамках. При конструировании содержания учебного предмета решающее значение имеет его функция в общем образовании.

К третьему этапу учёный относит *уровень учебного материала*: происходит реальное наполнение элементов состава содержания, которые были обозначены на первом уровне и представлены в форме, специфической для каждого предмета на втором. Здесь речь идёт о конкретных значениях, умениях и навыках, а также познавательных задачах, упражнениях, которые составляют содержание учебников, задачников, пособий и других материалов для учителей и школьников [3].

Для проектирования содержания непрерывного художественно-педагогического образования с использованием народного ДПИ (декоративно-прикладного искусства) важным является *положение о четырёхкомпонентной структуре содержания образования* (И. Я. Лернер, В. В. Краевский), исходя из которого, компонентами содержания непрерывного художественно-педагогического образования с использованием народного декоративно-прикладного искусства являются:

- знания о природе, обществе, культуре, искусстве, способах деятельности;
- общие искусствоведческие, практические, методические навыки и умения, являющиеся основой профессиональной художественно-творческой деятельности в области художественной педагогики;
- опыт художественно-творческой деятельности, который накоплен человеком в процессе развития общественно-практической деятельности в области народного декоративно-прикладного искусства;
- опыт эмоционально-волевого отношения к миру, друг к другу, являющийся вместе со знаниями и умениями в области культуры, искусства, народных промыслов условием формирования убеждений и идеалов, системы художественных ценностей личности.

Как мы видим, одним из компонентов является *творческий потенциал и опыт творческой деятельности в процессе использования народного декоративно-прикладного искусства*. На его примере и рассмотрим процесс реализации компонентов содержания непрерывного художественно-педагогического образования с использованием педагогического потенциала народного декоративно-прикладного искусства.

Проблемы творчества и творческой деятельности исследовались в трудах В. С. Библера, Л. С. Выготского, Я. А. Пономарёва, В. И. Загвязинского, В. А. Кан-Калика, Н. В. Кузьминой, А. К. Марковой, П. К. Энгельмейера и др. По мнению психолога А. К. Марковой, «творчество – это деятельность, порождающая нечто новое, ранее не бывшее, на основе реорганизации имеющегося опыта и формирования новых комбинаций знаний, умений, продуктов» [4]. Она выделяет разные стадии (фазы) творческого процесса: «потребность в новой идее, выделение проблемы, отказ от первого, как бы напрашивающегося решения ради поиска каких-то других путей; переход от рассмотрения многих альтернатив к нескольким решениям и их обсуждение, отход от внутреннего ограничения рамок возможных решений; свободные умозрительные рассуждения; после постановки проблемы занятие новой, возможно, произвольной позиции, затем возвращение обратно и воссоздание, критический



анализ логического пути между новой позицией и отправной точкой; поиск, распознавание и выбор нужной комбинации среди множества других возможных; многократные усилия по приближению решения, приходящего чаще всего внезапно; кристаллизация решения» [4].

К основным признакам творческой личности А. К. Маркова относит: способность замечать и формулировать альтернативы, подвергать сомнению на первый взгляд очевидное, избегать поверхностных формулировок; умение вникнуть в проблему и в то же время оторваться от реальности, увидеть перспективу; отказ от ориентации на авторитеты; способность увидеть знакомый объект с совершенно новой стороны, в новом контексте; отказ от категорических суждений, деления на белое и чёрное; готовность отойти от привычного жизненного равновесия и устойчивости ради неопределённости и поиска и др. [4].

В. И. Андреев, утверждает, что процесс воспитания творческих способностей, как и других свойств личности, достигает своей цели в процессе активизации и интенсификации процесса саморазвития личности. Учёный определяет ряд закономерностей, принципов и правил творческого саморазвития личности, при соблюдении которых в процессе созидательной деятельности самой личности происходит развитие его природных задатков, включая и развитие творческих способностей.

Ученый выделяет семь стадий саморазвития творческой личности. Первая стадия характеризуется устойчиво проявляющимся интересом, ясно выраженной мотивационной направленностью личности на определённый вид творческой деятельности – стадия избирательной мотивационно-творческой направленности личности на определённый вид деятельности. Вторая стадия – стадия начального творческого самоопределения – характеризуется повышенной интеллектуальной чувствительностью личности к усмотрению противоречий и проблем в определённой сфере творческой деятельности. Третья стадия – профессионально-творческого становления – характеризуется повышенной профессионально-творческой активностью личности в определённом виде деятельности в процессе интенсивного творческого овладения профессиональными приёмами и методами. Четвёртая стадия – стадия значительных творческих достижений личности. Эта стадия характеризуется первыми достижениями и первым признанием личности кругом профессионалов.

На пятой стадии развитие характеризуется высокой устойчивой продуктивностью личности и формированием индивидуального творческого стиля деятельности и мастерства. На шестой стадии развитие творческой личности характеризуется как стадия расцвета таланта. Здесь личность далеко превосходит достижения современников в определённой сфере творческой деятельности. Седьмая стадия развития творческой личности характеризуется как гениальность. Она характеризуется наивысшим уровнем развития творческих способностей личности [1].

Мы разделяем точку зрения учёных, утверждающих, что прямое обучение творчеству невозможно, необходимо создать для этого определённые условия, стимулирующие или тормозящие творческую деятельность. При этом условия или факторы, влияющие на творческую деятельность, могут быть двух видов: ситуативные и личностные. Ситуативные факторы могут иметь отрицательный характер (лимит времени, состояние стресса, состояние повышенной тревожности, слишком сильная или слабая мотивация, наличие фиксированной установки на конкретный способ решения и др.).

К личностным факторам, отрицательно влияющим на процесс творчества, относят конформизм, неуверенность в собственных силах, самоуверенность, эмоциональную подавленность и устойчивое доминирование отрицательных эмоций, отсутствие рискованного поведения и другие.

Среди личностных черт, которые благоприятствуют творческому мышлению, выделяют уверенность в своих силах, доминирование эмоций радости и определённой доли агрессивности, склонность к риску, отсутствие боязни показаться странным и необычным, хорошо развитое чувство юмора, наличие богатого по содержанию подсознания, любовь к фантазированию и построению планов на будущее и т.п. [5].

Опираясь на положения о развитии творческого мышления в процессе обучения и воспитания, рассмотренные С. Д. Смирновым [5], мы определили несколько тезисов, следуя которым возможна стимуляция творческого мышления у обучающихся на занятиях по народному декоративно-прикладному искусству, а именно:

- ни в коем случае не подавлять интуицию обучаемого; целенаправленно формировать у учащихся уверенность в своих силах, веру в свою способность овладеть умениями по созданию предметов народного декоративно-прикладного искусства;
- в процессе обучения народному декоративно-прикладному искусству в максимальной степени опираться на положительные эмоции удивления, радости, симпатии, переживания успеха и т.д. (эмоциональное описание образцов народного декоративно-прикладного искусства, встречи с народными мастерами, участие в проведении деловых игр и т.д.);
- всеми возможными средствами развивать воображение и не подавлять склонность к фантазированию в процессе выполнения творческих заданий (выполнение эскиза нарядного платья по мотивам народного женского костюма, чувашской вышивки и ткачества);
- шире применять проблемные методы обучения, стимулирующие установку на самостоятельное или с помощью преподавателя открытие нового знания (использование проблемных лекций, деловых игр и других новых форм проведения занятий);
- привлекать студентов к совместной с преподавателем исследовательской деятельности (участие в научно-теоретических исследованиях кафедр, в работе студенческого научного общества, осуществление оригинальных исследований в курсовых, дипломных работах).

Как показала опытно-экспериментальная работа, при регулярном использовании эти рекомендации значительно благоприятствуют изменению творческого потенциала будущих учителей изобразительного искусства в процессе изучения народного декоративно-прикладного искусства. При этом приобретаются опыт использования творческого потенциала при его изучении, изменяется определённый уровень сформированности способностей, необходимых для творческой деятельности по использованию накопленных знаний в формировании личности школьника.

Положив в основу семь стадий творческого саморазвития личности, разработанные В. И. Андреевым [1], мы определили структуру компонента «Творческий потенциал личности и опыт творческой деятельности в процессе использования народного декоративно-прикладного искусства».

На уровне **допрофессионального образования** ступень *художественно-эстетическое воспитание на традициях декоративно-прикладного искусства родного народа (семья и детские дошкольные учреждения)* предполагает проявление элементов творчества через сотворчество детей и взрослых в деятельности по изучению народного декоративно-прикладного искусства.

На ступени *общего художественного образования с использованием декоративно-прикладного искусства родного народа* компонент определяется как возникновение избирательной творческой направленности на изучение отдельных его видов; накопление опыта включения элементов творчества в процесс создания предметов народного декоративно-прикладного искусства.

**Профессиональный этап** непрерывного художественно-педагогического образования на ступени *начального художественно-педагогического образования с использованием народного декоративно-прикладного искусства* предполагает: формирование индивидуального стиля деятельности по созданию образцов декоративно-прикладного искусства родного народа и народов, его окружающих; осуществление профессионально-творческого становления личности в деятельности по изучению декоративно-прикладного искусства.

Ступень *среднего профессионального художественно-педагогического образования учителя изобразительного искусства с использованием педагогического потенциала народного декоративно-прикладного искусства* подразумевает: наличие повышенной профессионально-творческой активности в его изучении; интенсивное овладение профессиональными приёмами, методами, средствами преподавания народного декоративно-прикладного искусства родного народа и народов, его окружающих; осуществление профессионально-педагогического и художественно-творческого становления личности будущего художника-педагога.

Ступень *высшего профессионального художественно-педагогического образования с использованием педагогического потенциала народного декоративно-прикладного искусства в развитии творческого потенциала личности и опыта творческой деятельности в процессе его использования* предполагает: наличие устойчивой творческой продуктивности художника-педагога в процессе реализации педагогического потенциала в художественной деятельности; формирование индивидуального творческого стиля личности в профессионально-педагогической и художественно-творческой деятельности.

Ступень *«Повышение профессионального уровня художника-педагога, использующего педагогический потенциал народного декоративно-прикладного искусства в профессионально-педагогической и художественно-творческой деятельности»*, находящаяся на этапе **постпрофессионального образования**, предполагает: совершенствование индивидуального творческого стиля личности учителя изобразительного искусства при использовании педагогического потенциала народного декоративно-прикладного искусства; расцвет таланта учителя изобразительного искусства.

Итак, содержание непрерывного художественно-педагогического образования с использованием педагогического потенциала народного декоративно-прикладного искусства имеет четырёхкомпонентную структуру. В качестве компонентов нами выделяются: теоретические знания в области народного декоративно-прикладного искусства, о его месте в культуре, философии народа; сформированная система умений и навыков по созданию объектов народного декоративно-прикладного искусства; опыт творческой деятельности в процессе использования народного декоративно-прикладного искусства; эмоционально-ценностные отношения и положительная мотивация к использованию народного декоративно-прикладного искусства. Реализация компонентов содержания непрерывного художественно-педагогического образования – процесс поэтапный, требующий от его участников активного взаимодействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. И. Конкурентология. Учебный курс для творческого саморазвития конкурентоспособности. Казань: Центр инновационных технологий, 2004. С. 97-98.
2. Государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования «030800 – изобразительное искусство». М., 2000. С. 20.
3. Краевский В. В. Содержание образования: вперед к прошлому // Преподаватель, 2000. № 1. С. 4, 5-6.
4. Маркова А. К. Психология труда учителя. М.: Просвещение, 1993. С. 47, 48.
5. Смирнов С. Д. Педагогика и психология высшего образования: от деятельности к личности: Учебное пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2001. С. 151, 154.

**Смирнова Наталья Борисовна** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры ДПИ и МПИИ, зам. декана по научной работе ХГФ Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева

**Smirnova Natalia Borisovna** – Candidate of Pedagogic Sciences, Associate Professor of the Subdepartment DPI and MPII, Vice-dean for the Questions of Scientific Work of the Arts and Graphics Faculty, Chuvash State Pedagogical University called after I. Ya. Yakovlev

*Статья поступила в редакцию 18.02.2011, принята к опубликованию 10.07.2011*

УДК 94(47)

**А. В. Захаров**

**ИЗ ОПЫТА СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ  
ПО ПОДГОТОВКЕ МЕЛИОРАТОРОВ В 1960 – 1970 ГГ.  
(НА МАТЕРИАЛАХ ВОЛГОГРАДСКОЙ И САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТЕЙ)**

*В статье проанализирована деятельность органов партии, системы образования и хозяйственных организаций по подготовке гидромелиоративных работников на территории Волгоградской и Саратовской областей в период середины 1960-х до конца 1970-х гг. Результаты анализа показывают, что с учётом ряда недостатков проводимая работа в целом явилась весьма эффективным способом по обеспечению орошаемых хозяйств и строительных организаций квалифицированными специалистами.*

Орошаемое земледелие, механизатор, мелиоратор, поливальщик, профтехобразование, курсы подготовки, сельская школа, водостроительные организации

**A.V. Zaharov**

**PREPARATION OF RECLAMATION IN THE 1960'S – 1970'S  
(ON MATERIALS OF VOLGOGRAD AND SARATOV REGIONS)**

*The article analyzed the activity of the party, the education system and economic organizations in the preparation of irrigation workers in the Volgograd and Saratov regions during the mid-1960s until the end of 1970. The results show that, given a number of shortcomings pursued work as a whole was a very effective way to ensure the irrigated farms and construction companies by qualified professionals.*

Irrigated agriculture, mechanic, land reclamation, waterer, vocational training, training courses, rural school, water-building organization

В истории советского народного хозяйства большой след оставил мартовский (1965 г.) Пленум ЦК КПСС. Л.И. Брежнев в своём выступлении на форуме подверг резкой критике предшествующий курс, связанный с сельским хозяйством, и предложил новые подходы к развитию данной отрасли. Основное внимание было сосредоточено на совершенствовании механизмов управления сельским хозяйством. Пленум признал необходимость изменить пропорции распределения национального дохода в пользу сельского хозяйства. Для дальнейшего формирования материально-технической базы сельского хозяйства намечалось направить в предстоящее пятилетие 41 млрд. рублей. Реформируемая производственная база сельского хозяйства находилась в тесной связи с наличием необходимых кадров. В качестве

одной из причин неудач в сельском хозяйстве была названа слабая работа с кадрами, низкий уровень использования специалистов и достижений сельскохозяйственной науки. Будущий успех руководители партии ассоциировали, в том числе, с необходимостью повышения качества руководства, подготовки специалистов и трудолюбия. Одним из решающих условий роста сельскохозяйственного производства являлось обеспечение его высококвалифицированными кадрами инженеров, техников, трактористов, комбайнеров. Пленум предложил разработать меры по улучшению пропаганды и внедрению передового опыта, поощрению мастеров сельскохозяйственного производства, оказанию поддержки специалистам и учёным сельского хозяйства. Одним словом, партия видела перспективу сельского хозяйства в комплексном подходе, но с обязательным условием – опорой на квалифицированных специалистов [1].

Высокие темпы технического прогресса, заданные в 1965 г., проникли и в земледелие, основанное на поливе. В соответствии с Постановлением майского (1966 г.) Пленума ЦК КПСС «О широком развитии мелиорации земель для получения высоких и устойчивых урожаев зерновых и других сельскохозяйственных культур» в стране развернулось бурное водохозяйственное строительство. Перспективный план охватывал всю территорию страны, предусматривая довести к 1985 г. общую площадь мелиорированных земель примерно до 48 млн. га, в том числе орошаемых – до 21 млн. гектар. Из этого количества на Саратовскую область отводилось – 2,8 млн. га, на Волгоградскую – 1,5 млн. га [2]. Задачи, поставленные теперь уже майским Пленумом, вновь упирались в потребность подготовки целой «армии» новых для некоторых регионов специалистов орошаемого земледелия и других гидромелиоративных профилей [3].

Цель настоящей статьи — показать пути, способы и некоторые результаты в деле подготовки кадров мелиораторов на территории Саратовской и Волгоградской областей, где ставка делалась на ирригацию.

Принятые партийные решения, усложнение и масштабность задач, стоящих перед сельским хозяйством, вызвали необходимость пересмотра общего содержания и методов обучения студентов и учащихся сельскохозяйственных учебных заведений. Уже с 1964-1965 учебного года в вузах расширился приём студентов, вводились новые учебные планы, предусматривающие увеличение срока учебной практики, включение новых курсов, направленных на подготовку специалистов узкого профиля. В рамках реформирования предусматривалось сокращение недельной нагрузки студентов 1-4 курсов по изучению обязательных дисциплин до 30-ти, а нагрузки студентов 5-го курса до 24 часов [4].

По ходу модернизации реализовывались и сугубо специфические решения. В обоснованиях необходимости развития орошения подчеркивалось, что с внедрением полива появятся новые специальности, а кадровая структура станет основным залогом успеха. Созданию постоянных кадров поливальщиков, операторов насосных станций и дождевальных машин с этого момента уделялось особое внимание. Масштабы производства поливной техники косвенно подтверждают особую значимость вышеперечисленных профессий. При участии 30 саратовских промышленных предприятий к весне 1970 г. было собрано 60 комплектов дождевальных установок, затем налажено их массовое производство. За 9-ю пятилетку было выпущено 8365 дождевальных машин «Волжанка», «Радуга», «КИ-50» [5]. Оказалось, что промышленность работала быстрее, чем образовательная система смогла перестроиться под новые условия. Это стало видно из того, что многие сельскохозяйственные предприятия на первом этапе внедрения ирригационного земледелия оказались один на один с проблемой обеспечения производства необходимыми кадрами. Так, в колхозе им. К. Маркса Балаковского района с освоением орошения требовалось 34 машиниста дождевальных установок, 34 поливальщика, 2 бригадира орошаемого земледелия, 2 гидротехника, однако в наличии имелось только соответственно 17, 17, 1, 1 человек. Аналогичная ситуация сложилась и в других хозяйствах. Всего по району не хватало 150 машинистов, 182 поливальщика, 15 бригадиров, 14 гидротехников. Задача осложнялась тем, что выискивать резервы для орошаемого земледелия приходилось на фоне

всеобщего дефицита механизаторских кадров. В том же Балаковском районе недоставало 611 механизаторов, 155 рабочих на животноводческие фермы [6].

Некоторые хозяйства, переходящие на использование орошаемых площадей, пытались самостоятельно восполнить кадровый пробел. Ставка делалась на тех, кто хоть как-то разбирался в орошении и умел обращаться с поливной техникой. От Новоузенского района весной 1968 г. 8 человек командировали в Грозненский гидромелиоративный техникум, затем с их участием были организованы курсы подготовки поливальщиков; аналогичным образом поступили в Краснокутском районе. Райком КПСС Краснопартизанского района, кроме устройства курсов на базе хозяйств, инициировал целевую отправку выпускников нескольких школ на обучение в сельские ПТУ для получения массовых мелиоративных профессий. В 1971 г. от района учились в местном СПТУ 36 человек по специальности «машинист насосной станции» [7].

В совхозе «Волго-Дон» Волгоградской области, в котором орошение практиковали с середины 1950-х гг., проходили курсы овощеводов, поливальщиков. Поэтому на первоначальном этапе внедрения орошения здесь имелась возможность ежегодно готовить до 300 овощеводов и 30 поливальщиков. К середине девятой пятилетки образовательная база для поливальщиков была значительно расширена и доведена до 250-300 человек за зимний сезон. Регулярно в хозяйстве устраивались семинары по обмену опытом с участием представителей совхоза «Энгельсский» Саратовской области [8]. Познакомившись с передовым методом ведения хозяйства, энгельские земледельцы в своём совхозе создали 39 хозрасчётных звеньев и 16 бригад, работающих на орошении. В свою очередь, мелиораторы из «Энгельсского» на базе родного для них хозяйства делились знаниями по выращиванию зерновых на крупных орошаемых площадях, так как именно они в числе первых в области освоили данный способ растениеводства [9]. В течение года совхоз проводил подготовку 120 овощеводов, 50 механиков и 30 садоводов [10]. Кроме того, на базе совхоза «Энгельсский» в 1972 г. был создан учебно-курсовой комбинат, который внёс немалый вклад в дело подготовки кадров мелиораторов. За пять лет его функционирования получили различные специальности в области мелиорации 3,5 тыс. человек, из них 2,8 тыс. остались в Саратовской области. Кроме стационарного отделения, учебно-курсовой комбинат имел филиалы. В Ершовском, Краснопартизанском, Марксовском, Ровенском, Советском, Федоровском, Энгельсском районах действовала сеть из 49 учебных пунктов [11]. К сожалению, не все курсы, открывающиеся в орошаемых колхозах и совхозах, носили эффективный характер. К их организации и налаживанию деятельности могли отнестись формально, отчитавшись перед райкомом партии; не все мастера производственного обучения владели методикой преподавания той или иной дисциплины, являясь в первую очередь всего лишь практиками, только что овладевшими новой специальностью. Чтобы восполнить пробел, приходилось отправлять работников в те регионы, где уже давно использовали орошение и накопили определённый опыт преподавания и распространения гидромелиоративных дисциплин. Именно так поступили в Николаевском районе Волгоградской области. Здесь к выращиванию зерновых на орошении приступили первыми в области, и для дальнейшего распространения передового начинания срочно требовались квалифицированные специалисты. По решению райкома партии в 1969 г. группа, состоящая из руководителей и главных специалистов хозяйств, для приобретения навыка была направлена в показательные орошаемые совхозы и НИИ Херсонской области. В дальнейшем, по мере необходимости, повысить квалификацию можно было в Волгоградском сельскохозяйственном институте. Полученные знания помогли создать курсы на базе передовых колхозов своего района и оказывать помощь другим хозяйствам области в деле подготовки поливальщиков зерновых культур. Помощь аграриям оказывало областное объединение совхозов путём организации курсов подготовки и переподготовки кадров массовых профессий. На плановой основе, используя базы хозяйств, в 1971 г. предусматривалось дать профессиональные знания 265 молодым людям, а обучили в 1971 г. 513, а в 1972 г. – 774 человека. В 1972 г. в районе имелось 350 трактористов-машинистов и

поливальщиков, которые обслуживали 14 тыс. орошаемых гектар. За счёт введения мелиоративных специальностей приступили к выпуску механизаторов широкого профиля Суровикинское и Николаевское училища [12]. Специально для ознакомления с работой поливных машин типа «Фрегат» три человека посетили курсы повышения квалификации при Ленинградском сельскохозяйственном институте. Комплекс образовательных мер позволил довести к 1974 г. количество поливальщиков в районе до 556 человек [13].

Тем не менее, перечисленные мероприятия не сняли с повестки проблему недостатка мелиоративных работников. Причиной тому могли стать приписки числа обучающихся, подготовка работников, которые и не собирались оставаться в орошении, а их запись на курсы проводилась командно-административными мерами, иногда на обучение отправляли женщин, не имеющих ни минимальных навыков и знаний, ни желания и возможности заниматься освоением сложных механизмов и электрифицированных поливных установок. Зачастую на курсы записывали молодых людей после окончания средней школы, а те, получив специальность, отправлялись прямо на службу в армию. Таким образом, накапливалось противоречие между выполнением плана подготовки и нехваткой кадров.

Рост дефицита специалистов подтвердили исследования Поволжского филиала ВНИИЭСХ. Численность трудящихся в орошении за трёхлетие с 1976 по 1978 гг. в колхозах и совхозах увеличилась на 10%, в то время как абсолютная численность рабочей силы в колхозах и совхозах выросла только на 4%. Количество сельского населения за этот же период в зоне Поволжья снизилось на 5%. Рост рабочей силы в поливном земледелии был обусловлен в первую очередь высокими темпами мелиоративного строительства и вводом новых орошаемых площадей с увеличением их в совхозах на 17%, а в колхозах на 22%. Как видно, темпы роста орошения в два раза превышали темпы роста рабочей силы. Данное обстоятельство и объясняет в какой-то степени острый дефицит кадров поливного земледелия. Анализ показал, что абсолютная численность в структуре кадров поливного земледелия таких специалистов, как машинисты и операторы дождевальных и поливных машин, в Поволжье выросла за рассматриваемый период на 14%. Удельная численность рабочей силы на 1000 га орошаемой площади в поливном земледелии поволжских областей зоны снизилась. В ряде случаев она оставалась явно недостаточной. Так, в колхозах Саратовской области в 1978 г. она составила 26 человек на 1000 га орошаемых земель при нормативе 45 человек. Низкая обеспеченность рабочей силой в поливном земледелии отрицательно сказывалась на соблюдении оптимальных агротехнических сроков проведения сельскохозяйственных работ, следовательно, на урожайности и в целом на эффективности мелиорированных земель [14].

Подготовка кадров находилась под контролем советского правительства. К примеру, 10 мая 1967 г. вышло Постановление Совета Министров СССР «О мерах по обеспечению сельского хозяйства квалифицированными кадрами механизаторов, а 14 августа 1969 г. — «О мерах по дальнейшему улучшению подготовки специалистов в средних сельскохозяйственных учебных заведениях», адресованные ряду союзных министерств, в том числе мелиорации и водного хозяйства СССР. Документы обязывали соответствующие структуры принять меры к обеспечению колхозов, совхозов и других государственных предприятий сельского хозяйства квалифицированными кадрами механизаторов, с тем, чтобы полностью использовать имеющиеся возможности машинно-тракторного парка для дальнейшего подъема сельскохозяйственного производства, обеспечить полноценный учебный процесс подготовки профессионалов всех профилей, включая мелиоративные специальности [15].

Выполняя государственные решения, Саратовский обком партии в октябре 1970 г. обсудил кадровый вопрос и определил конкретные задачи подготовки и переподготовки специалистов для каждого хозяйства. Примером реализации данного решения может выступить Балаковский район, где был проведён глубокий анализ двухлетнего опыта использования ирригационного земледелия, подтвердивший, что успех в новой отрасли зависит от наличия и трудоспособности квалифицированных кадров, организации поливных



работ как минимум в две смены. До сих пор работа по орошению проводилась в ущерб другим сельскохозяйственным мероприятиям и перенапряжением сил специалистов хозяйств района. Экономисты рассчитали потребность в кадрах для орошения с работой в одну смену, где учли перспективу возрастания орошаемых площадей в 9-й пятилетке, и организовали в районе сеть учебных центров подготовки мелиораторов на плановой основе. На курсы в Саратов были направлены 5 бригадиров и 4 звеньевых орошаемого земледелия. Основным учебным заведением системы профтехобразования стало Балаковское СПТУ-4, проводившее подготовку по специальностям: тракторист-машинист, электромонтёр, машинист скрепера и бульдозера, машинист поливальных и дождевальных установок. Темпы развития сельского хозяйства вынуждали расширять приём студентов. В 1971 г., вместо запланированного набора в количестве 270 человек, было принято 346 абитуриентов. В осенне-зимний период 1972-1973 гг. в СПТУ-4 и опорных хозяйствах района подготовили 8 машинистов насосных станций, 55 трактористов-машинистов дождевальных машин, 59 операторов на «Волжанки», 68 поливальщиков. Прошли переподготовку 56 трактористов-машинистов, 42 машиниста насосных станций. За первые три года пятилетки училище подготовило для орошаемого земледелия 360 специалистов. К 1975 г. учебное заведение открыло 5 филиалов для подготовки мелиораторов, позволяющих обучать по 125 человек в год [16]. Кроме того, средние общеобразовательные школы района подготовили в 1973 г. 96 поливальщиков, из них 46 специалистов-девушек. Все они работали на поливных участках своих хозяйств. В феврале 1973 г. в районе был проведён трёхдневный семинар мелиораторов по обмену опытом с участием сотрудников ВолжНИИГиМ и специалистов совхоза «Новый» Энгельсского района — одного из лидеров в орошаемом земледелии. Такие мероприятия, как правило, положительно сказывались на популяризации и дальнейшем развитии орошаемого земледелия, укреплении кадрового потенциала.

Обучение мелиораторов было налажено и в других районах. В Марксовском, например, добились следующих результатов: в местном СПТУ-9 подготовили 23 машиниста насосных станций, 111 машинистов дождевальных машин и насосных станций, 64 машиниста установок «Фрегат» и «Волжанка»; организовали курсы переподготовки кадров среднего мелиоративного звена; для треста «Марксводстрой» обучили 30 крановщиков, 30 бульдозеристов, 10 шофёров [17]. Вместе с тем имелись и недостатки. На низком организационном уровне находилась подготовка мелиораторов в системе профтехобразования Волгоградской области. Из 18 сельских ПТУ только Среднеахтубинское выпускало машинистов экскаваторов мелиоративных работ, бульдозера, скрепера и грейдера. В остальных училищах сконцентрировали внимание на подготовке механизаторов широкого профиля. Это можно отметить как позитивный сдвиг, но непосредственную потребность в специалистах по орошению сельские училища не обеспечивали [18].

В действительности, в период 1971-1975 гг. вся система профтехобразования испытывала трудности прежде всего в деле комплектования учебных групп. В профтехучилища было принято около 7,5 млн. человек с образованием 8 классов, из них только 4,5 млн. (около 60% окончивших 8-е классы в соответствующем году). Из-за нехватки необходимого контингента училища были вынуждены принимать на учёбу сотни тысяч юношей и девушек из числа так называемого «отсева», т.е. молодёжи, по разным причинам оставившей школу в прошлые годы. Естественно, что формирование состава таким образом негативно сказывалось на процессе подготовки, распределения, закрепления кадров. Молодёжь, попавшая в то или иное учебное заведение случайно или в результате определённого давления, не собиралась работать по полученной специальности. В 10-й пятилетке неблагоприятная демографическая ситуация в очередной раз осложнила проблему комплектования профтехучилищ. Начиная с 1977-1978 гг. численность подростков 15-16-летнего возраста в стране (основного контингента молодёжи, принимаемого в училища) сокращалась ежегодно на 200-300 тыс. человек, в то время как планы приёма учащихся этой категории в ПТУ росли. Предварительными балансовыми расчётами плановых органов союзных республик и Госплана СССР на годы 10-й пятилетки предполагалось направлять в

профтехучилища на 1 млн. меньше молодёжи, чем предусматривалось проектами планов приёма учащихся этой категории [19].

Мы считаем, что забота о подготовке мелиоративных кадров нашла продолжение в Постановлении ЦК КПСС и Совета Министров от 2 октября 1972 г. «О дальнейшем усилении работ по мелиорации земель и улучшении использования орошаемых и осушенных земель» Несмотря на то, что проблемы профессиональной подготовки здесь затрагивались только косвенно, оно имело огромное значение для развития профессиональной и допрофессиональной подготовки молодёжи, давая дополнительный импульс к деятельности образовательных учреждений. В документе говорилось о том, что из-за недостатка квалифицированных кадров в гидростроительных и эксплуатационных организациях мелиоративная техника работает неэффективно. Государственным комитетам по использованию трудовых ресурсов и по профессионально-техническому образованию при Совете Министров РСФСР было дано задание обеспечить структурные подразделения мелиорации и водного хозяйства трудовыми ресурсами и разработать дополнительные меры для более масштабной и качественной подготовки рабочих кадров [15]. Анализ архивных документов позволяет сделать вывод, что после выхода в свет именно этого постановления в подготовку мелиораторов широко включились общеобразовательные заведения не только Балаковского района, о котором шла речь. Практически во всём Левобережье, а также в отдельных районах правого берега Волги как Саратовской, так и Волгоградской областей сельские школы превратилась в источник пополнения квалифицированной рабочей силой совхозов и колхозов, приступив к обучению массовым мелиоративным специальностям. По указанию партии и при поддержке орошаемых хозяйств методично укреплялась материальная база школ, ориентирующих своих выпускников на работу в системе ирригации. Сельские школы таких районов, как Марковский, Ершовский, Духовницкий, Краснокутский, Новоузенский Саратовской области, Михайловский, Палласовский Волгоградской области получили возможность обучать и выпускали из своих стен от 100 до 300 учащихся, подготовленных для работы в сфере мелиорации. Конечно, не все они впоследствии связывали свою судьбу с орошением и даже вообще с сельскохозяйственной отраслью, но данный вид организации обучения имел весьма существенное значение, особенно в летний период, когда учащиеся получали шанс подработать в родном хозяйстве [20].

Получив первоначальные гидромелиоративные знания, выпускники школ могли продолжить учёбу на более высоком образовательном уровне. Основными в этом направлении стали гидромелиоративные техникумы, находящиеся в Волгограде и Пугачёве. Оба учебных заведения начали свою деятельность по другим профилям. Волгоградский техникум был основан в 1952 г. как лесной, а в 1964 г. он был перепрофилирован в гидромелиоративный. Пугачёвский техникум основан в 1929 г. как полеводческий, а в 1933 г. на его базе открылось гидромелиоративное отделение. Выполняя постановления майского Пленума, Саратовский обком в июле 1966 г. принял решение о преобразовании Пугачёвского сельскохозяйственного техникума в гидромелиоративный с увеличением приёма студентов с 60 до 120 человек. К концу 8-й пятилетки учебное заведение стало выпускать ежегодно около 250 человек. С 1970 г. приём в техникум увеличился и составил 270-280 человек, открылся заочный факультет с возможностью обучения 150 студентов в год. За 9-ю пятилетку из его стен вышло более 1300 человек. В 1975 г. приём на дневное отделение составил 300 человек, а на заочное – 500 [21].

Распространялось по стране и высшее мелиоративное образование. На агрономических факультетах 11 сельскохозяйственных вузов страны, в том числе в Волгоградском СХИ, открывалась подготовка кадров по специальности «Луговое хозяйство» с общим приёмом 300 человек, увеличен приём по специальности «Орошаемое земледелие», «Агроресомелиорация», «Лесная мелиорация». В 1966 г. в два раза возрос приём студентов на гидромелиоративный факультет Волгоградского СХИ, который в 1964 г. принял 75 студентов. Теперь совхозы и колхозы области получили возможность постоянно направлять

молодёжь для приобретения мелиоративного образования. Кроме того, при СХИ были организованы постоянно действующие курсы агрономов орошаемого земледелия, позволяющие принимать до 80 человек одновременно [22].

Существенную роль в подготовке молодых специалистов для агропромышленного комплекса сыграл Саратовский институт механизации сельского хозяйства им. С.М. Калинина (СИМСХ). В постановлении бюро Саратовского обкома КПСС и облисполкома от 28 июля 1965 г. «О мерах по развитию орошения зерновых культур на 1965-1966 и 1966-1970 гг. по Саратовской области» обосновывалась целесообразность восстановления, существовавшего до 1958 года при СИМСХ гидромелиоративного факультета, с ежегодным приёмом 200 человек. К тому моменту в вузе по специальности «Орошаемое земледелие» студенты обучались только по одной группе (20-25 ч.) на каждом курсе. Ректорат института настаивал на увеличении количества студентов уже в 1966 г. минимум на 25 человек, с тем, чтобы со следующего учебного года набирать две группы (50 ч.) по орошаемому земледелию ежегодно. Кроме количества, оговорилось и качество преподавания. «В настоящее время на всю специализацию по орошаемому земледелию учебным планом предусмотрено только 200 учебных часов. Этого явно недостаточно. Необходимо специальность «Орошаемое земледелие» реорганизовать в факультет «Агромелиорация» со своим учебным планом в объёме 800-900 часов на спец. дисциплины». Воссоздать факультет в короткие сроки не удалось. На пленуме обкома КПСС 26 августа 1970 г. ректору Д.Г. Вадивасову пришлось в очередной раз убеждать областную власть в том, что институт обладает огромным учебным потенциалом, материальной базой, подготовленным профессорско-преподавательским составом, способным готовить специалистов самого широкого профиля, в том числе так необходимых в стране мелиораторов [23].

Обучать гидромелиораторов начали с 1971 г. последовательно сразу на пяти курсах в составе 5 групп по 25 человек в форме специализаций при факультетах механизации по специальностям: гидромелиорация (75 ч.), механизация гидромелиоративных работ (50 ч.). Лишь 24 ноября 1971 г. после совместно организованных действий парткома вуза и обкома КПСС было принято окончательное решение о создании факультета гидромелиорации. Официальное возрождение факультета с двумя специальностями произошло 11 августа 1972 года под названием: «Гидромелиорация и механизация гидромелиоративных работ». Первым деканом факультета избрали Льва Николаевича Сахарова. Перед новым коллективом предстояла задача в короткие сроки создать партийную, комсомольскую, общественную организации, утвердить учебные планы и программы, методики практических и лабораторных работ, курсовых проектов, производственных практик. Пришлось заново формировать преподавательский состав кафедр, приобретать технику и наглядные пособия. В сентябре 1973 г. состоялся полноценный набор студентов по двум специальностям нового факультета, имеющего в своём распоряжении шесть укомплектованных кафедр. В общей сложности факультет насчитывал 574 человека: 350 на специализации «гидромелиорация», 224 – на механизации гидромелиоративных работ. Выпустил 78 инженеров по механизации гидромелиоративных работ. В 1975 г. набор на первый курс установлен в количестве 225 ч.: гидромелиорация – 150 ч., механизация гидромелиоративных работ – 75 ч. Из 804 студентов, обучающихся на факультете, 91% являлись сельскими жителями, 212 были командированы водохозяйственными организациями. Одновременно принимались меры по организации факультета повышения квалификации. Уже в 1975 г. он подготовил 185 специалистов-мелиораторов.

Преподаватели вуза включились в научно-исследовательскую работу по двум темам: «Исследование надёжности и долговечности дождевальных машин «Фрегат», «Установление предельных сроков службы строительных машин, работающих в сельском хозяйстве». Началась работа по созданию машин для очистки каналов. Работники института приступили к оказанию помощи хозяйствам посредством определения рекомендаций по инженерно-мелиоративному районированию и типам дренажа в совхозе «Энгельском», на двух участках в Новоузенском районе, на территории оросительной системы в бассейне р.

Терёшки (Ершовской ОС). В совхозе «Штурм» Новобураского района проводились исследовательские работы с целью разработки режима орошения картофеля и мероприятий по рациональному использованию оросительной воды [24].

Неотъемлемой частью и необходимым условием подготовки высококвалифицированных кадров сельского хозяйства является приобретение практических умений. В процессе производственного обучения решалось несколько задач: оказание помощи учащимся и студентам в овладении навыками практической работы в различных отраслях сельскохозяйственного производства, закрепление теоретических знаний, приобщение будущих специалистов к сельскому труду. Кафедры, учебные отделы разрабатывали программы и методические рекомендации к проведению практических работ, принимались меры к обеспечению учебных хозяйств техникой, оформлялись договоры с хозяйствами о прохождении практики. Например, производственная практика студентов Волгоградского СХИ проходила в лучших, в том числе орошаемых, хозяйствах области: совхозах «Советская Россия», «Волго-Дон», «Пламя революции», колхозе «Родина». Прибывая на места, студенты работали на штатных должностях – это свидетельствовало о том, что к практике относились серьёзно и руководители хозяйств, и учебные заведения [25].

В вопросах подготовки кадров для орошаемого земледелия существенную роль сыграли научные учреждения, которые по роду своей деятельности первыми осваивали новую технику и технологию полива, имели всё необходимое для обобщения опыта и его передачи. Помощь в вопросах подготовки кадров различного профиля хозяйствам оказывали Волжский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия (ВолжНИИОЗ), находящийся в Волгограде, и Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации (ВолжНИИГиМ) в Энгельсе. На их орошаемых площадях проходили стажировку операторы поливальных машин, руководители и главные специалисты хозяйств и проектных институтов, учёные, студенты, слушатели курсов усовершенствования. База НИИ позволяла за год готовить около 1000 человек. Между тем наука нуждалась в собственной структуре по формированию специалистов. Так, ВолжНИИГиМ в первые годы своего существования ощущал дефицит научных кадров. В 1967 г. в НИИ было принято 26 научных работников, в 1971 г. ещё 26. Если на момент основания в институте работал 51 научный сотрудник, то уже в 1971 г. – 136, и требовался ещё 21 человек. С целью укрепления кадров руководство отправляло молодых сотрудников на учёбу в аспирантуру смежных учебных заведений. Чтобы закрыть кадровую брешь, в 1973 г. администрация ВолжНИИГиМа добилась открытия собственной аспирантуры, которая приступила к подготовке специалистов по нужному профилю [26].

Если научных работников приходилось привлекать из других учреждений, то специалистов массовых профессий для орошения институт начал готовить самостоятельно, используя практику проведения выездных семинаров. Только в 1971 г. в Балаковском, Пугачёвском, Ершовском районах семинары по проблемам орошения охватили 327 человек, из них подготовили 201 поливальщика. В Волгоградской области аналогичные семинары посещали 99 человек, из которых 28 стали поливальщиками. Такая разница в очередной раз показывает, что не все овладевали новой профессией, кто-то уезжал в город, кто-то просто не справлялся или не хотел. Всего за этот год в семинарах приняло участие 529 человек [27].

В начале 9-й пятилетки в 12 лабораториях ВолжНИИОЗ вели исследования один доктор наук и 33 кандидата наук. Аprobация научных исследований проходила на трёх созданных опорных пунктах – «Мариновское», «Новоникольское», «Орошаемое». Научные работники систематизировали свои достижения, оказывали теоретическую и практическую помощь совхозу им. К. Маркса. Тем не менее, отношение обкома к НИИ было весьма негативным, и его деятельность постоянно подвергалась справедливой критике. Институт не стал главным научным центром по разработке передовых технологий возделывания орошаемых культур, отсутствовала положительная динамика в развитии связей с опорными пунктами и другими научными учреждениями. За четыре года не оказано должной помощи хозяйствам области, не накоплено достаточного экспериментального материала по основным

вопросам, происходило распыление творческих сил и научного потенциала работников. Не охвачены такие перспективные разработки, как долголетние пастбища, семеноводство кормовых культур, опыты проводились без севооборотов, с нарушением агроприёмов, полив на отведённых участках осуществлялся нерегулярно [28]. В период внедрения широкозахватных поливальных машин типа «Фрегат» и «Волжанка» опытные хозяйства НИИ подключились к решению кадрового вопроса. Данная техника являлась высокотехнологичной и требовала к себе квалифицированного подхода. Имея опыт работы на новых поливных образцах и возможность их использования для обучения, Ершовская опытная станция из членов собственного коллектива подготовила 6 человек. После чего здесь взялись за переобучение механизаторов из других хозяйств [29]. На территории Волгоградской области открылись курсы машинистов дождевальных машин при Волгоградской и Заволжской ОМС, если в 1969 г. от них требовали подготовить по 50 человек, то за зимний период 1971-72 гг. на Заволжской ОМС обучалось уже 78, а в 1973 г. на каждой из них – по 90 человек [30].

Система вузовского образования и хорошо отлаженная деятельность НИИ позволили постепенно перевести многие хозяйства, в том числе орошаемые, на новые методы работы, базирующиеся на научной основе. Село стало пополняться новой думающей интеллигенцией в лице молодых специалистов, окончивших институты. Некоторые из них сочетали руководящую работу с научной деятельностью. Примером тому может послужить А.Ф. Суханов, проделавший путь от агронома совхоза «Энгельский» до его руководителя, защитивший степень к.с.-х.н., его трудовой путь повторил А.И. Соболев, ратовавший за развитие орошения на научной основе. В соответствии со статусом совхоза как экспериментального по орошению происходил подбор кадров — все специалисты хозяйства имели высшее образование, а бригадиры не ниже среднего, механизаторы обладали двумя, а то и тремя смежными профессиями [10]. Учёная степень к.э.н. была присвоена И.М. Шестеренко – директору совхоза «АМО» Новоаннинского района Волгоградской области, который смог организовать рентабельное универсальное хозяйство, пропорционально основанное на богарном и орошаемом земледелии. В Сурувикинском районе борьбу с солончаками вели на научной основе под руководством к.с.-х.н., главного агронома управления сельского хозяйства А. Барыкина [31]. Именно от таких целеустремлённых людей, отдающих себя полностью сельскому хозяйству, а не только от директив и постановлений партии, во многом зависел успех выполнения предпринимаемых государством программ. Они осознавали ответственность перед следующими поколениями и старались не навредить родной земле. Огорчает только то, что специалистов такого высокого уровня в нашем сельском хозяйстве было недостаточно.

Заботу о формировании собственных кадров для своих подразделений проявляли водостроительные организации. С момента образования крупнейшего в Поволжье треста «Главволговодстрой» его администрация организовала курсы подготовки специалистов при ПМК. К концу девятой пятилетки Главволговодстрой вышел на довольно высокий уровень показателей подготовки кадров гидростроителей. В 1974 г. было обучено 1993 рабочих, 2238 повысили квалификацию, в 1975 г. соответственно 3221 и 1862 человека [32]. Саратовканалводстрой и Саратовводстрой на базе собственных предприятий в девятой пятилетке подготовили 1635 рабочих ведущих специальностей [33]. Для привлечения выпускников СПТУ в свои ряды, крупные водостроительные тресты и орошаемые хозяйства использовали различные методы наставничества, когда опытные мелиораторы передавали свой опыт молодым помощникам. На сооружении Пугачёвской ОС в практику вошёл приём, позволявший адаптироваться и закрепиться на стройке молодёжи и получивший название «ведущий-ведомый», когда молодой скреперист или бульдозерист работал в паре с уже опытным, и последний «сглаживал» недостатки механизатора, осваивающего профессию [34]. Восполнять нехватку кадров помогали организационные наборы. В 1969 г. по комсомольским путевкам на строительство Саратовского оросительного канала прибыло около 300 молодых рабочих, студенческий отряд в количестве 100 человек, выполнивших

объём работ на сумму около 200 тыс. рублей. На Всесоюзной ударной стройке молодёжь работала под девизом: «Не выполнил норму – не уходи с канала». В 1970 г. на водостроительный объект обком комсомола направил 1200 человек [35].

Существенное влияние на характер подготовки кадров оказали темпы ввода в эксплуатацию орошаемых земель в девятой пятилетке и создание мощной строительной структуры в лице «Главсредволгводстроя» («ГСВВС»). По инициативе управляющего трестом И.П.Кузнецова девять ПТУ, работающих по программе подготовки механизаторов, и одно – по выпуску квалифицированных строителей, перешли в ведомство главка. Под влиянием Главка улучшилась подготовка специалистов по эксплуатации дождевальных установок и насосных станций нового поколения в Вольском и Пугачёвском техникумах; Саратовский политехнический институт приступил к обучению инженеров-строителей с мелиоративным уклоном; на геологическом факультете Саратовского университета из числа старшекурсников стали готовить изыскателей и проектировщиков. Отныне руководство треста оказывало непосредственное влияние на распределение выпускников всех уровней с целью бесперебойного обеспечения строительных объектов и сельскохозяйственных предприятий молодыми специалистами. Особенно важным это оказалось в период создания орошаемых совхозов в структуре главка, когда во вновь созданные хозяйства направлялись квалифицированные специалисты различного профиля. Кроме того, «ГСВВС» широко использовал на строительных объектах военные строительные отряды. Так как не все солдаты обладали строительными специальностями, в тресте наладили краткосрочные курсы для их обучения. При этом выигрывали обе стороны: Главк почти на два года получал в своё распоряжение квалифицированных специалистов, а солдаты, пройдя срочную службу, приобретали строительную профессию. Вместе с тем, привлечение на мелиоративные объекты военных строителей имело и негативные последствия. Низкий уровень дисциплины среди солдат срочной службы сказывался на качестве строительства: зачастую ими выполненную работу приходилось переделывать из-за допущенного брака; техника, находящаяся у них в распоряжении, быстро выходила из строя, распылялась; не всегда оправдывались средства, потраченные на устройство необходимой инфраструктуры. Всё это вместе в конечном итоге приводило к увеличению и перерасходу капитальных вложений [36].

В соответствии с актуальной задачей, поставленной перед мелиорацией, постепенно в 60-70-е перестраивали свою деятельность органы СМИ, которые стали чаще обращаться к проблемной теме. О земле и мелиорации писали партийные и советские работники, учёные, литераторы, рядовые труженики деревни. В Саратовской областной газете «Коммунист» была учреждена рубрика «Мелиорация: нерешённые проблемы». Через неё читателей знакомили с новаторами производства, передовыми приёмами эксплуатации мелиоративного оборудования и нормами водозабора из местных водоисточников, правильной организацией труда на орошении. В газете регулярно публиковали объявления о приёме в учебные заведения всех уровней [37].

Популяризацией идей орошения, знаний в области эксплуатации мелиоративной техники и эффективного использования поливных земель занималась тематическая «школа мелиораторов», действовавшая с 1972 г. при Саратовском телевидении. В её работе принимали участие передовики производства, специалисты, видные учёные. Лекции и беседы проводились по трём темам «Орошению – эффективную организацию труда», «Оросительной технике высокую производительность», «Возделывание кормовых культур на поливе». Активное участие в работе телевизионной школы принимали: главный инженер-гидротехник совхоза «Энгельский» Л.И. Левщанов, заведующий кафедрой мелиоративных и строительных машин СИМСХ, к.т.н. Ю.В. Пахомов, заведующий кафедрой сельскохозяйственных машин СИМСХ, д.т.н. А.Ф. Ульянов [38].

Опыт, полученный в первые годы мелиоративного развития, показал, что кадровый вопрос - один из самых насущных. Областные руководители держали эту проблему под своим контролем и регулярно вносили свои коррективы, давая рекомендации райкомам

КПСС и райисполкомам о направлении на постоянную работу в строительные организации, осуществляющие водохозяйственное строительство, рабочих-механизаторов и строителей, а также специалистов с высшим и средним образованием. Но как ни старались советские и партийные органы, обеспечить в полном объёме потребности орошаемого земледелия к концу девятой пятилетки не удалось. В декабре 1977 г. Пленум Саратовского обкома КПСС обсудил вопросы, связанные с развитием сельскохозяйственного производства, в частности с повышением эффективности поливных земель. Участники обратили внимание на то, что орошаемые земли использовались недостаточно эффективно, в том числе по причине неуккомплектованности квалифицированными кадрами [11].

В Волгоградской области к концу 1978 г. насчитывалось около 150 тыс. га регулярного и 50 тыс. га лиманного орошения. Такое количество поливных земель требовало к себе повышенного внимания. XII Пленум Волгоградского обкома КПСС, собравшийся 8 сентября 1978 г., был полностью посвящён орошению. Выступающие отметили планомерный рост ирригационных площадей и вскрыли недостатки в подготовке мелиоративных кадров. Так, в хозяйствах Быковского, Городищенского, Среднеахтубинского районов ежегодно не хватало по 200-250 машинистов дождевальных установок. Помощь вынуждены были оказывать промышленные предприятия Волгограда, Волжского, Камышина, направляя ежегодно в село 700-800 машинистов. Но это не могло стать выходом из сложившейся ситуации, подготовка собственных кадров сохраняла свою актуальность. В этой связи были открыты мелиоративные специальности в профтехучилище в п. Водников и Средней Ахтубе, поставлен вопрос об учреждении гидромелиоративного техникума в г. Николаевске [39].

Таким образом, благодаря реализации программы по мелиорации земель Саратовская и Волгоградская области превращались в регион, где делалась ставка на развитие орошаемого земледелия. В этой связи возник довольно длинный перечень организаций, испытывающих дефицит кадров. Это сельскохозяйственные предприятия, переходящие на орошаемое земледелие, водостроительные организации, проектные и исследовательские институты, сами учебные заведения. Заинтересованные организации были вынуждены перестраивать свою работу, расширять перечень специальностей, совершенствовать подготовку кадров гидромелиоративного профиля. В сформировавшейся образовательной системе особо следует подчеркнуть деятельность профессиональных технических училищ и механизаторский всеобуч на базе колхозов и совхозов. Именно здесь проходили обучение представители массовых мелиоративных профессий, вносящих затем основной вклад в сельскохозяйственное производство. При этом нельзя забывать о помощи в подготовке кадров со стороны общеобразовательных школ, научных учреждений, строительных организаций. К сожалению, обеспечить гидромелиоративный комплекс кадрами специалистов в полной мере не удалось. Часть вины за это ложится на руководителей совхозов, колхозов, районных управлений сельского хозяйства, в обязанность которых входила забота о создании резерва квалифицированных рабочих и специалистов, способных высокоэффективно эксплуатировать оросительные системы и сложное поливное оборудование. Предпринимаемые меры не охватили весь комплекс решаемых вопросов. В организации труда не до конца ещё были изжиты уравниловка и разобщённость, внедряемые кое-где элементы ресурсосберегающей технологии не подкреплялись экономическими стимулами. Поливальщикам платили за объём вылитой воды, а не по конечному продукту. При оценке эффективности мелиорации действовал критерий количества введённых орошаемых гектаров. На состояние по обеспечению кадрами объектов мелиорации сказывалась всеобщая нехватка рабочей силы. Дефицит кадров порождал нездоровую конкуренцию между предприятиями, практику переманивания друга у друга работников, что дестабилизировало коллективы, способствовало росту текучести кадров, наносило социальный урон, способствуя падению трудовой дисциплины, умножая безответственность и число прогульщиков. В сложившейся в колхозах и совхозах, сельхозорганах, системе подготовки и переподготовки кадров многое нуждалось в совершенствовании. Государство

вполне могло повлиять на кадровую подготовку аграриев путём налаживания профориентационной деятельности; организации своевременного научного мониторинга и прогнозирования потребностей в кадрах по основным народнохозяйственным направлениям; обеспечения приёма абитуриентов в региональные учебные заведения всех рангов в соответствии с результатами мониторинга, а не путём простого увеличения мест по тому или иному направлению; усовершенствования учебно-производственной базы образовательных учреждений в соответствии с современными требованиями производства, чтобы прибывшего специалиста не отправляли на переподготовку уже в первые годы работы; оптимизации использования и расстановки кадров на наиболее важных направлениях; а, кроме того, специалист должен быть ограждён от всяких без крайней нужды перемещений; создания мощной системы социальной защиты и обеспечения, особенно молодых специалистов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пленум ЦК КПСС. 24-26 марта. 1965 г. Стенографический отчет. М.: «Политиздат», 1965. С. 8, 21, 26.
2. Алексеевский Е. Развитие орошения в Поволжье и задачи водохозяйственных организаций // Степные просторы. 1970. №1. С. 5.
3. Материалы майского (1966 года) пленума ЦК КПСС. М.: «Политиздат», 1966. С. 52.
4. Крайнова Е.О. Особенности государственной политики в области высшего сельскохозяйственного образования в 1960-1980-е гг. // Актуальные проблемы политической и социально-экономической жизни Поволжья. Сборник научных трудов. Вып. 2. Саратов: издательство Саратовского государственного социально-экономического университета, 2005. С. 137.
5. Долгов В.М. Аграрная политика КПСС и её социально-экономические результаты. (1965-1985) / Под ред. В.Б. Островского. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1988. С. 88.
6. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 698. Оп. 49. Д. 31. Л. 83; Д. 17. Л. 46.
7. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 594. Оп. 8. Д. 162. Л. 20, 169.
8. Государственный архив новейшей истории Волгоградской области (ГАНИВО). Ф. 113. Оп. 83. Д. 85. Л. 6; Оп. 86. Д. 9. Л. 80.
9. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 518. Оп. 1. Д. 4. Л. 37.
10. Суханов А.Ф., Ларионов А.Г. Щедрость орошаемых полей. Саратов: Приволжское книжное издательство, 1972. С. 2, 100.
11. Кривинченко С.В. Деятельность Саратовской партийной организации по обеспечению кадрами мелиораторов в десятой пятилетке // Из истории социалистического строительства. Межвузовский научный сборник. Вып.18. Издательство Саратовского университета, 1989. С. 11, 15.
12. Государственный архив новейшей истории Волгоградской области (ГАНИВО). Ф. 113. Оп. 79. Д. 21. Л. 147, 158; Оп. 82. Д. 75. Л. 75.
13. Волгоградская правда. 1972. 2 июля; 1974. 3 декабря.
14. Богдарин М.Н., Дмитриев С.С., Антропова В.В. Состояние и источники формирования рабочей силы в поливном земледелии // Степные просторы. 1980. №2. С. 44-45.
15. Решения партии и правительства по сельскохозяйственным вопросам. 1965-1974. М.: «Колос», 1975. С. 194, 195, 362, 783-784.



16. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 698. Оп. 50. Д. 7. Л. 1, 119-121.
17. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 594. Оп. 12. Д. 19. Л. 122; Оп. 15. Д. 62. Л. 42.
18. Волгоградская правда. 1973. 27 июля.
19. Государственный архив Российской Федерации (ГАРФ). Ф. Р-5446. Оп. 110. Д. 1235. Л. 42.
20. Захаров А.В. Вклад молодёжи Саратовской области в развитие орошения в годы девятой пятилетки // Социально-экономическое развитие России. Проблемы, поиски решения. Часть 11. Саратов, 2010. С. 57-58; Захаров А.В. Профорориентационная работа в сельских школах Саратовской области // Власть. 2011. №1. С. 121-124; Захаров А.В. Результаты профорориентационной деятельности в сельских школах Нижнего Поволжья в 1960-е - начале 1980-х годов // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. Научно-теоретический и прикладной журнал. 2011. №4(10). Часть 1. Тамбов, 2011. С. 54-58.
21. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 158. Оп. 30. Д. 8. Л. 42; Д. 15. Л. 121-122; Архив музея ФГОУФПО «Пугачёвского гидромелиоративного техникума им. В.И. Чапаева.
22. Развитие высшего сельскохозяйственного образования 1961-1970 гг. М., 1980. С. 33.
23. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 594. Оп. 6. Д. 23. Л. 55; Оп. 10. Д. 12. Л. 91.
24. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 1460. Оп. 1. Д. 159, 162, 163, 167.
25. Зеркалов В.И. Деятельность партийных организаций по подготовке кадров специалистов сельского хозяйства (1966-1970 гг. на материалах Среднего и Нижнего Поволжья). Диссертация на соискание степени к.и.н. Саратов, 1985. С. 104.
26. Вклад ВолжНИИГиМ в развитие мелиорации земель в Поволжье. Саратов: ВолжНИИГиМ, 2001; Архив ВолжНИИГиМ. Д. 1189-А, Л. 240.
27. Архив ВолжНИИГиМ. Д. 1419-А, Л. 331.
28. Государственный архив новейшей истории Волгоградской области (ГАНИВО). Ф. 113. Оп. 83. Д. 36. Л. 148.
29. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 625. Оп. 1. Д. 13. Л. 10; Ф. 594. Оп. 12. Д. 102. Л. 54.
30. Государственный архив новейшей истории Волгоградской области (ГАНИВО). Ф. 113. Оп. 79. Д. 21. Л. 147, 158; Оп. 82. Д. 75. Л. 75.
31. Волгоградская правда. 1974. 12 мая; 1975. 6 мая.
32. Государственный архив Волгоградской области (ГАВО). Ф. 6892. Оп. 1. Д. 1173. Л. 2; Д. 1229. Л. 1.
33. Рыскина Л.М. Развитие орошения в Саратовской области. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1979. С. 100.
34. Новое Заволжье. 1975. 4 июля.
35. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Ф. 594. Оп. 10. Д. 3. Л. 113.
36. Государственный архив новейшей истории Саратовской области (ГАНИСО). Оп. 14. Д. 138. Л. 7-8.
37. Рыбков А.Г. Рациональное использование земли – требование аграрной политики КПСС (1965-1985) На материалах партийных организаций Европейской части РСФСР / Под ред. В.Д. Полищука. Саратов: Издательство Саратовского университета, 1988. С. 91.
38. Школа мелиораторов // Степные просторы. 1977. №5. С. 41-42.
39. Государственный архив новейшей истории Волгоградской области (ГАНИВО). Ф. 113. Оп. 104. Д. 11. Л. 20, 27.

**Захаров Александр Викторович** –  
кандидат исторических наук, доцент, старший  
научный сотрудник кафедры экономической и  
политической истории России Саратовского  
государственного социально-экономического  
университета

**Zakharov Alexander Victorovich** –  
Candidate of Historical Sciences, Senior  
Researcher of the Department “Economic and  
Political History of Russia”, Saratov State  
Socio-Economic University

*Статья поступила в редакцию 10.02.2011, принята к опубликованию 07.06.2011*

Н.А. Дикун

### РОЛЬ СЕМЬИ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ МОЛОДЕЖИ

*Статья посвящена молодежи как особой специфической группе общества, обладающей совокупными половозрастными, социально-психологическими и иными особенностями, которая является своеобразным индикатором общественного развития, физического и духовного здоровья нации. Она в значительной степени влияет на формирование рынка труда, развитие трудовых ресурсов.*

Семья, молодежь, общество, социализация, образование

N.A. Dikun

### ROLE OF FAMILY IN PROFESSIONAL EDUCATION OF YOUTH

*The article "Role of family in professional up-bringing of youth" deals with the youth as a specific group of society, possessing combined sexual-age, socio-psychological and other peculiarities and being distinctive indicator of social development, physical and spiritual health of the nation. It has considerable influence on formation of labour market and development of manpower resources.*

Family, youth, society, socialization, education

Материал для статьи получен в результате исследования, выполненного в рамках научно-исследовательского проекта РГНФ «Психосоциальные проблемы трудовой миграции и адаптации этнических мигрантов», проект № 10-06-01303а/Б. Исследования проводились в период июнь-август 2010 года методом интервьюирования.

Для данного исследования использовался метод маршрутной выборки. Отбор домов для опроса респондентов проводился по заданному шагу. Выборка включала различные социальные слои и группы населения Саратовской, Волгоградской, Ростовской областей и Краснодарского края Российской Федерации. Объем выборки 756 человек, в том числе 52% женщин, 48% мужчин. Также соблюдалась квота в аспектах возраста, образования, вероисповедания, места проживания (большие, малые города, деревня). Мы использовали ту часть выборки, которая соответствует возрастной категории от 14-30 лет, т.е. молодежи как социально-демографической группы (более половина опрошенных).

Очевидно, что в процессе стабилизации политической и экономической ситуации в стране важная роль принадлежит молодежи. Молодёжь - это особая специфическая группа общества, обладающая совокупными половозрастными, социально-психологическими и иными особенностями, является своеобразным индикатором общественного развития, физического и духовного здоровья нации. Она в значительной степени влияет на формирование рынка труда, развитие трудовых ресурсов. Если не складываются достаточные условия для доступа молодежи к образованию, к труду, ограничиваются возможности ее социально-профессионального роста, социального участия, защиты прав, то процесс развития молодежи становится все более неопределенным, спонтанным и непредсказуемым, значительно повышая уровень социальной разбалансированности не только в среде молодежи, но и во всем обществе.

Высшая школа является важнейшим институциональным потенциалом эффективного развития общества, «...высшая школа оказалась более подготовленной к жизни в новых социально-экономических реалиях, потому что для нее в большей мере, чем для других образовательных уровней, характерен дух здоровой корпоративности, более благоприятная научная экипировка, интеллектуальная атмосфера классических университетов и элитарных технических вузов, их расположенность к здоровым реформаторским идеям и стойкий иммунитет к голому, оторванному от живой практики прожектерству» [4].

Молодежь, реализующая свое право на образование через систему высшей школы, в той или иной мере пополнит такие социальные страты, как средний класс, в т. ч. властные структуры, интеллектуальную элиту общества, и будет оказывать в течение ближайших десятилетий определяющее воздействие на развитие своей страны и всего человечества.

Качественное высшее профессиональное образование предполагает высокий уровень теоретической и практической подготовки будущих специалистов. Однако сам по себе уровень образования не является гарантом реализации жизненных планов. Данное положение особенно актуально для современного модернизирующегося общества: знания и информация меняются и устаревают очень быстро, поэтому профессиональная подготовка требует постоянного совершенствования. Сегодня высшее образование ставит своей целью подготовку не только широко образованных, но и творчески и критически мыслящих специалистов, способных к разностороннему целостному видению и анализу сложных проблем жизни общества, а значит, готовых к поиску новых решений социальных проблем. На первый план выходит задача формирования у молодых людей качеств, позволяющих человеку быстро адаптироваться к изменяющимся условиям жизни: самостоятельность, инициативность, мобильность, ответственность. Во всяком случае, уже сейчас отчетливо вырисовываются две тенденции его обучения. Первая связана с тем, что идет упор на подготовку «Специалиста», а набор дисциплин призван сформировать его как практика. Однако еще русский философ Иван Ильин писал, что грядущая Россия будет нуждаться не просто в «образовании» (обозначаемом прошлым словом «учеба»), ибо образование само по себе есть дело памяти, смекалки и практических умений в отрыве от духа, совести, веры и характера. Образование без воспитания не формирует человека, а портит его, ибо дает в его распоряжение жизненно-выгодные возможности, технические умения, которыми он – бездуховный, бессовестный, безверный и бесхарактерный, – и начинает злоупотреблять.

Выбор профессии для молодого человека является основой его самоутверждения в обществе и определяет его дальнейшую жизнь: кем быть, к какой социальной группе принадлежать, какой стиль жизни выбрать, какие цели достигать. Находясь перед выбором жизненного пути, молодые люди должны анализировать свои ресурсы (интересы, способности), оценивать возможность коррекции несоответствий между своими психологическими особенностями и требованиями избираемой профессии, прогнозировать свое дальнейшее трудоустройство, изучая ситуацию на рынке труда. Естественно, что каждый представитель молодого поколения в перспективе хочет, чтобы работа была престижной, то есть перспективной и хорошо оплачиваемой. Поэтому оценка престижности будущей профессии оказывает основное влияние на принятие решения о получении того или иного образования [5].

Важнейшими из факторов, влияющих на стартовые позиции молодёжи и выбор стратегий поведения, являются образовательный статус родителей и уровень материального благосостояния семьи.

В жизненных ориентациях выбора профессии решающее влияние на старшеклассников оказывает семья. По результатам опроса, проводимого среди уже учащейся молодежи, ответ на вопрос: « Кто из Вашего окружения повлиял на Ваше желание получить высшее образование?» 37% респондентов ответили – выбор был сделан самостоятельно, 28% ответили, что выбор им помогли сделать оба родителя, 13% - на выбор повлияла мать, 6% - отец, 5% - другие родственники, 5% - друзья, 6% - коллеги по работе. У 82% опрошенных

студентов оба родителя одобрили их профессиональный выбор. Очевидно, что большинству студентам в выборе профессионального будущего помогла определиться семья.

Родители, имеющие высшее образование и занятые в интеллектуальной сфере, советуют своим детям окончить полную среднюю школу, что даст им возможность продолжить образование в высшем учебном заведении. Следует отметить, что при опросе учащейся молодежи на вопрос: «Планируете ли вы убеждать Вашего ребенка (детей) после окончания средней школы продолжать учебу в ВУЗе?» 76% опрошенных ответили «да, обязательно», 14% считают, что для этого у ребенка должны быть высокие достижения в учебе и желание, только 6% предоставят своему ребенку принимать решение самостоятельно и 4% пока не могут ответить на этот вопрос. Именно ценностные ориентации родителей помогают определиться подростку в своей социально-профессиональной ориентации после окончания неполной средней школы и после окончания общеобразовательной школы. У детей, выросших в семьях, где родители имеют высшее образование и заняты интеллектуальным трудом, наблюдается позитивное отношение и стремление к учебе.

Что касается детей из неблагополучных семей, то большая часть не заканчивает среднюю школу. К неблагополучным семьям отнесем не только неполные семьи, но и семьи с негативным нравственно-психологическим климатом. Причины отклоняющегося поведения у подростков и молодежи в неполных семьях связаны как с материальными трудностями, так и с психологической неустроенностью в семье. Выбытие из школы подростка до ее окончания в связи с материальными трудностями наблюдается чаще всего в семьях только с одной матерью. Матери более благотворно влияют на поведение и успеваемость подростка, однако материальные трудности заставляют ребенка совмещать учебу с работой, или даже бросить учебу ради зарабатывания денег. В семьях, где ребенок живет только с отцом, ситуация хуже, так как одинокие отцы не оказывают необходимого положительного влияния на подростка. В таких семьях причиной отклоняющегося поведения у подростков чаще всего является нравственно-психологический фактор. Таким образом, отклонений в поведении учащихся, живущих только с матерью, меньше, чем отклонений у подростков, живущих только с отцом. Однако большинство подростков, бросивших школу до ее окончания, наблюдается в полных, но неблагополучных семьях. Их неблагополучие определяется такими параметрами, как частота употребления спиртных напитков, конфликты, отсутствие единых требований родителей к детям, нравственно-психологическими факторами. Негативное влияние такой семьи сказывается и на общении учащихся со своими сверстниками и взрослыми [1].

Таким образом, основной причиной, влияющей на успеваемость, формирование жизненных ориентации молодежи, выступает не состав или характер семьи, а ценностные ориентации старших членов семьи.

Родители большинства сегодняшних подростков «становились на ноги» в 90-е годы, в период радикальных социально-политических и экономических перемен. Реальность требовала от них выработать новые жизненные стратегии для приспособления, а подчас и выживания в динамично меняющейся реальности. Многие из них потеряли социальный, профессиональный и финансовый статус. Поэтому для своих детей родители, опираясь на собственный опыт, выработывают стратегии развития, которые менее зависят от социально-политических изменений в стране и которые позволят им адаптироваться в любой меняющейся среде. Такие стратегии в основном опираются на получение детьми высшего образования, причем на первое место становится не получение диплома об окончании ВУЗа, а содержание и качество получаемого образования. Только 35% будущих выпускников готовы не обращать внимания на качество образования [2].

Основным мотивом к продолжению образования в высшей школе для старшеклассников является получение престижной профессии и, как следствие, предполагаемой возможности хорошего заработка. Довольно распространенным мотивом к получению высшего образования является получение определенного статуса в обществе. При выборе будущей профессии половина старшеклассников предпочтет интересную

работу высоким заработком, вторая половина остановит свой выбор на высокой зарплате [3].

Для реализации выбранных стратегий большое значение имеет материальное состояние семьи. И, хотя материальное благополучие является лишь условием для воспитания, крайне важно избегать как недооценки, так и переоценки этого фактора в процессе развития ребенка. Многие родители сохраняют привычное место работы, обусловленное полученной в доперестроечные времена профессией, несмотря на невысокий заработок. В связи с финансовой несостоятельностью возникает угроза падения авторитета родителей в глазах ребенка. Родители перестают быть образцом для подражания, дети не обращаются к ним за советом и помощью, потому что считают их неприспособленными, не способными к преуспеванию в новых жизненных условиях. В более сложных случаях, когда родители остались без работы, ситуация с родительским авторитетом еще хуже. Американский исследователь Г. Элдер пришел к выводу, что безработные родители теряют власть, социальный статус и эмоциональную значимость в системе семейных ролей. Подросток переоценивает значимость денег, представляет их как фактор жизненного успеха, что приводит к потере или снижению интереса к получению образования.

Необходимо отметить, что появление платного высшего образования, которое не согласуется с материальным положением многих семей, приводит к социальной дезориентации.

При всех экономических трудностях наблюдается рост числа учащихся, склонных завышать как оценку и социально-экономические возможности своей семьи. Молодые люди, привыкшие больше получать, чем отдавать, с приобретением нового социального и возрастного статуса подвергаются стрессам и разочарованиям, что ведет к социальной депривации.

Многие выпускники, неудовлетворенные материальным положением своей семьи, планируют совмещать обучение в высшей школе с работой, устраиваясь на неполный рабочий день. На сегодня 12,3% молодых людей удается совмещать обучение как первичную форму занятости с работой.

Что касается уже учащейся молодежи, то на вопрос: «Какие жизненные блага являются наиболее важными для Вас?» 70% опрошиваемых считают, что деньги (наряду с другими благами как здоровье, счастливая семья, гарантированная работа). Около 10% респондентов на вопрос: «Чем Вы обычно занимаетесь в свободное от учебы, работы время?» ответили, что они дополнительно подрабатывают.

Основные профессии, на которые могут устроиться студенты с целью подработки - бухгалтер (кассир), менеджер, администратор, продавец (продавец-консультант), секретарь, оператор. С одной стороны, такое совмещение позволяет решать материальные проблемы. С другой стороны, в случае несоответствия работы профилю обучения возникает реальное препятствие на пути к качественному образованию [3].

Таким образом, эффективное развитие общества в современной России зависит от стартовых позиций молодёжи, их настроенности на получение качественного высшего образования. Образование воспринимается теперь старшеклассниками не как формальная, а как содержательно востребованная составляющая профессиональной стратегии. На сегодня решающее значение при выборе стратегии поведения молодежи играет семья, авторитет родителей. Уровень интеллектуального и духовного развития, профессии, степень материального достатка родителей являются существенными факторами, определяющими параметры социализации старшеклассников и выпускников школ. Рост числа благополучных семей с высокими ценностными ориентациями родителей приведет к настроенности большинства подростков к продолжению образования в высшей школе. Именно семью как основной социальный субъект образования следует рассматривать в качестве важнейшего, фундаментального основания формирования и становления личности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьева И.Ф. Социальное самочувствие семьи // Социальные исследования. 2008. №9. С. 102-109.
2. Бикметов Е.Ю. Взаимодействие семьи и школы в социализации индивида // Социальные исследования. 2007. №9. С. 86-92.
3. Богословская О. Мотивация получения высшего образования в контексте выбора процессии // Высшее образование в России. 2006. №5. С. 44-47.
4. Емчура Т. Современная молодежь и каналы ее социализации // Вестник Московского Университета. Сер.18. Социология и политология. 2006. №3. С. 135-140.
5. Константинов А.С. Динамика жизненных ориентаций выпускников средних школ Архангельска (1985-2005) // Социальные исследования. 2007. №12. С. 121-124.

**Дикун Наталья Александровна** -  
соискатель кафедры «Гуманитарные науки»  
Энгельсского технологического института  
Саратовского государственного технического  
университета

**Dikun Natalia Alexandrovna** –  
Competitor of the Department “Humanities”,  
Engels Technological Institute of Saratov State  
Technical University

*Статья поступила в редакцию 25.02.2011, принята к опубликованию 10.08.2011*

УДК 82.091

**Н.В. Дубровина**

## **ОТРАЖЕНИЕ СОВЕТСКОЙ И НЕМЕЦКОЙ МЕНТАЛЬНОСТИ В СИСТЕМЕ ТОПОСОВ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО РЕАЛИЗМА**

*В статье выявляются идеологические штампы социалистического реализма. Анализ основан на описании топосов, являющихся показательными для соцреалистического романа. Данные модели формируют идеологические и этические рамки содержания соцреалистического произведения. Показательным является выявление особенностей советской и немецкой ментальности.*

Соцреализм, топика, идеологический штамп, топос, ментальность

**N.V. Dubrovina**

## **THE SOVIET AND GERMAN MENTALITIES REFLECTION IN SYSTEM OF THE TOPICES OF SOCIALIST REALISM**

*The work reveals ideological cliché of social realism. The analysis is based on the description of toposes which are significant for the social realistic novel. Given patterns form ideological and ethical content's frameworks of the social realistic works. Revealing of features of Soviet and German mentality is significant.*

*Social realism, topike, ideological cliché, topos, mentality*

Любая идеология, как известно, строится на определенном наборе готовых формул, идеологических штампов. Вся эта строгая заданность находила свое отражение прежде всего в **топике** – совокупности смысловых моделей (топосов), использование которых было обязательным условием соцреализма. Под топосами понимаются «культурные нормы, прежде всего морали, осознаваемые как аксиомы. Они не требуют доказательств,

обоснований, они являются результатом культурного опыта общества, они верифицированы...» [2].

Выполняя соц. заказ, писатели создавали произведения, отвечающие определенным идеологическим установкам, призванные «доводить до сознания то, что на языке постановлений доводилось до сведения <...>, оформлять и приводить в некую систему разрозненные идеологические акции, внедряя их в сознание, переводя на язык ситуаций, диалогов, речей» [1]. Это невозможно было сделать без использования готового набора смысловых моделей, т.е. топосов.

Немецкие соцреалистические произведения отвечали тем же идеологическим установкам, что и советские. В то же время не следует забывать, что немецкий соцреализм вторичен по отношению к советскому. Поэтому система топосов немецкого социалистического реализма включает не только советские топосы, но и модифицированные, в силу немецкой ментальности, топосы, а также этноспецифические (для ГДР) топосы.

Основа топоса **«общественный долг превышает личных интересов»** – конфликт между долгом и чувством, личными интересами, при этом долг неизменно берет верх.

Попадая в ситуацию, когда нужно выбирать между долгом и чувством, герои ведут себя по-разному: одни изначально сориентированы на то, что долг превышает всего – это «готовые рупоры идей» [3], к этой группе относятся, прежде всего, коммунисты; другие некоторое время колеблются, выбирая между долгом и чувством, и, в конце концов, выбирают долг; третьи отдают предпочтение своим личным интересам – такие персонажи квалифицируются как единоличники или – чаще всего – как враги. Таким образом, идейная канва топоса создает некую шкалу, в которой среднее звено (колеблющиеся) изначально сдвинуто в сторону со знаком плюс, в результате шкала выпрямляется до двух противоположных оценок. Выполнение долга понимается как нечто само собой разумеющееся:

*«– У нас, молодых людей, воспитанных Советской властью, должна быть сейчас очень высокая требовательность к себе.*

*– В чем? В смысле сознания своего долга?*

*– Нет, это само собой, это лежит в основе всего – преданность Родине и партии, готовность поступиться личным, даже жизнью, если требует долг»* (В. Ажаев, «Далеко от Москвы»).

Выполняя долг перед партией и правительством, герои постоянно берут на себя повышенные обязательства, работают сверхурочно на других объектах: *«Голубовцы решили строить завод своими силами. Проект был заказан в городе и утвержден Главрыбводом. Он не представлял собой ничего сложного, и рыбаки приняли решение отработать на строительстве по сто часов»* (В. Закруткин, «Плавучая станица»).

Наиболее яркими представителями людей долга являются, естественно, коммунисты, и прежде всего, партийные руководители и политработники. Так, комиссар Яхно *«от зари до зари бродил по разным подразделениям полка, всюду находя себе дело»* (М.Бубеннов, «Белая береза»). Какие именно дела находил комиссар, автор не говорит, но вполне ясно, что все они сводились к пропаганде, «поднятию боевого духа» и «укреплению моральной стойкости».

Ситуация, когда нужно выбирать между долгом и чувством, характерна для немецкого соцреалистического произведения: *«Kennt ihr diesen Zimmermann so wenig, daß ihr glauben könnt, der preise sich im Ernst als einen stets opferbereiten Kämpfer für die Sache?»* (Н.Кант, «Die Aula») – *«Неужели вы так плохо знаете этого плотника, что можете подумать, будто он всерьез хвалится готовностью приносить любые жертвы ради общего дела?»* (Г.Кант, «Актовый зал»).

Отношение человека к долгу есть критерий его социальной оценки. Свои интересы выше общественных могли поставить только отрицательные герои: *«Auch unter den politischen Häftlingen gab es in allen Blocks und bei allen im Lager befindlichen Nationalitäten unsichere Elemente, denen die Angst um das eigene Leben höher stand als das Wohl und die*



*Sicherheit der Gemeinschaft*» (В. Apitz, «Nackt unter Wölfen») – «В каждом бараке, даже среди политзаключенных любой национальности, попадались **ненадежные элементы**, которые собственную жизнь ставили выше **общего блага и безопасности**» (Б. Апиц, «Голые среди волков»).

Но если в советском соцреализме все отступает на задний план перед чувством долга, то немецкому герою чувство долга не мешает решать свои личные проблемы. Очевидно, что в данном случае снова речь идет о различии в менталитете: «... личность человека важна не сама по себе (как у европейцев), а является частью целого – общества. Причем в соотношении личность (часть) и общество (целое) приоритет, конечно, остается на стороне “целого”...» [4]. То есть для немецкого менталитета соотношение частного и общественного при восприятии личностью самой себя перевешивает в сторону «части», сохраняется приоритет личных интересов [8]. То, что автор сосредоточивает внимание читателя на личных переживаниях своего героя и даже изолирует его от общей борьбы пролетариата, советские критики считали недостатком немецких произведений: «*Sollte er die Freiheit wiedererlangen, wird er gescheiter sein. Jetzt sollen erst mal andere Ihren Buckel hinhalten...*» (W. Bredel, «Die Prüfung») – «Если он когда-нибудь снова очутится на свободе, то будет благоразумнее. Пусть теперь другие отдуваются...» (В. Бредель, «Испытание»). В данном примере речь идет о человеке, которого сломило тюремное заключение. Оказавшись на свободе, он все-таки вернется к подпольной борьбе. Но данный факт показателен. В строгих канонах соцреализма нет места сомнениям и колебаниям в мыслях и поступках коммуниста.

**Топос «счастье советского человека – в труде»** является главенствующим, сюжето- и стилеобразующим в произведениях на производственную и колхозную тематику. В них показана жизнь людей в работе – на производстве или на колхозных полях. Личная жизнь людей, их душевные переживания выступают неким дополнительным фоном, призванным создать иллюзию правдоподобия. Этот топос является производным от предыдущего – «общественный долг превышает личные интересы»: поскольку личные интересы заменяются общественными, происходит идеологически (но не психологически) оправданная сублимация: счастье человека возможно прежде всего в труде, а потом уже в личной жизни.

Реализация топоса может осуществляться через прямую оценку – авторскую: «*И будничная работа, которую Максимов всегда считал такой неинтересной, теперь, когда он был оторван от нее, казалась ему прекрасной и желанной*» (А. Рыбаков, «Водители») или персонажами: «– Это здорово! – качнул головой Степан. – **Я уважаю настоящую работу. Без работы скучно жить на свете**» (В. Закруткин, «Плавучая станица»).

Люди, не полностью отдающие себя труду, естественно не вписываются в систему, поскольку их мировоззрение противоречит топосу «счастье советского человека – в труде». По логике вещей, если для них счастье не в труде, они не советские люди, а значит, являются врагами (по крайней мере – потенциальными). Зачастую их так и оценивают: «*У кого душа чиста, вставай под знамя и присягу перед всем советским народом давай, а в присяге этой клянись: землю свою от гадов оборонять, труд свой честный отдать Родине и коммунизм строить каждый день и каждый час... А ежели есть который такой, что его слабина берет, то нечего его и щадить*» (В. Закруткин, «Плавучая станица»).

Все указанные постулаты иногда фокусируются в персонажах, специально вводимых в сюжет произведения, «*которых в народе обычно называют работягами*» (В. Закруткин, «Плавучая станица»). В них сочетаются (часто представленные в гипертрофированном виде) основные качества рабочего человека: любовь к труду, которая проявляется в том, что он все время работает (чем живет этот человек, мы не знаем, но это и не важно) и всегда готов выполнять новые задания; высокий, даже беспредельный профессионализм (обычно доходящий до степени артистизма), самоотверженность (для него не важны условия, в которых он работает), стремление перевыполнить любую норму, лютая ненависть к бездельникам (для подобных людей понятие *бездельник* достаточно широкое), желание вникнуть во все процессы общего дела, чтобы работать еще лучше и продуктивней – в

общем, квинтэссенция идеального труженика, который и работает хорошо при любых условиях, и получает от этого удовольствие. Смысл жизни для таких людей – в работе.

Например, шофер Демин «...был из тех водителей, которые не отойдут от машины, чья бы она ни была, пока не найдут причину ее неисправности. Демин принадлежал к подлинным автомобильным болельщикам. Эти люди отличаются **непостижимым упорством и безграничным терпением**. В поисках неисправностей они способны кропотливо перебирать одну деталь за другой. Автомобиль для них – **больше, чем профессия: это их жизнь**» (А. Рыбаков, «Водители»).

В немецких соцреалистических произведениях на колхозную и производственную тематику труд является жизненной необходимостью, но не смыслом жизни: «*Ich muß jetzt Ordnung auf dem Hof haben, sonst kommen mir noch die Kinder an den Bettelstab*» (А. Seghers, «Die Toten bleiben jung») – «Мне теперь необходимо навести порядок в хозяйстве, а то дети ещё до сумы дойдут» (А. Зегерс, «Мертвые остаются молодыми»). Данный топос нельзя считать заимствованным из социалистического реализма, поскольку труд для немцев представляет собой абсолютную ценность, лежащую в основе развития и благополучия их социума [8].

Героев немецких романов нельзя оценивать по их отношению к труду. Исследователи отмечают, что составляющими этнического характера немцев остаются профессиональное мастерство, уважительное отношение к труду, дисциплинированность, а также восприятие труда как важнейшего долга человека, нетерпимость ко всякой небрежности в труде и любовь к порядку: «*Er [Revierfürster Stamm] ist tüchtig, hat seine Augen allüberall. Im Walde entgeht ihm kein Span*» (Е. Strittmatter, «Ole Bienkopp») – «Он [лесничий Штамм] старательный и энергичный, всё видит, всё замечает. У него в лесу щепки не пропадут» (Э. Штритматтер, «Оле Бинкоп»). Трудолюбие нужно рассматривать не как показатель принадлежности к определенной группе, а как черту национального характера. В немецком соцреализме эта черта присуща и для положительных, и для отрицательных героев. Например, врач, в котором подозревают врага: «...первоклассный специалист и немножко чудак. Работает по шестнадцать часов в сутки...» (Г. Кант, «Актовый зал»).

**Топос «человек есть винтик государственной машины»** так же, как и общее место «счастье советского человека – в труде» напрямую соотносится с топосом «общественный долг превышает личных интересов». Поскольку личное отходит на второй план, на первый план выступает общественная функция человека, то, какую ячейку он занимает в государственной системе.

Топос отражает не идеологические установки советского строя, но реально сложившуюся советскую систему: государство мыслилось как механизм (машина, аппарат), рычаги управления которым были сосредоточены в руках партии; все остальные были составными частями этого механизма, отвечающими за работу той или иной его части. Вследствие этого, каждый человек был прежде всего носителем определенной функции: рабочим, колхозником, учителем, руководителем, строителем, ученым, врачом, писателем, журналистом и т.п., чей труд был направлен на поддержание работы государственного аппарата, налаженной и бесперебойной. «Мы никогда не найдем здесь хотя бы одного немаркированного, немеченого человека, – отмечает Е. Добренко – он – существо определенное, вписанное в готовый миропорядок, у него нет собственных, личностных границ, и иным он быть не может в принципе – таковы законы метода» [1]. Личность человека растворялась в коллективе, поскольку у всех была одна общая задача – строить коммунизм, при этом любая «хозяйственная задача, выполняемая по ходу сюжета, изображается как необходимый этап на пути к высшей цели» [5]: «*Москва поразила Василия и Груню <...> размеренным ритмом сложной, большой жизни, в которой миллионы человек четко выполняли свое дело: водили троллейбусы и автомобили, учили детей, принимали иностранных послов, издавали газеты <...>, то есть совершали все то, что давало возможность каждому из них в отдельности и всем им вместе выполнять одну большую, нужную всей стране задачу*» (В. Закруткин, «Плавучая станция»).

Беридзе, Ковшов, Тополев («Далеко от Москвы») - прежде всего инженеры, чья задача – построить нефтепровод; Максимов, Демин, Пчелинцева – водители, их функция – осуществлять перевозки и бороться за выполнение нормы («Водители»); герои романа В. Закруткина «Плавучая станица» – рыбаки, поэтому на протяжении всего сюжета они или ловят рыбу или говорят о том, как улучшить показатели улова.

Топос «человек есть винтик государственной машины» иногда выражается прямо, персонажи сами осознают свою вторичность по отношению к делу: *«Неприятно говорить и вместе с тем нельзя скрывать: в некоторых наших отделах пока еще не воспитано честное, ревностное отношение к запросам трассы: не все в аппарате понимают, что мы здесь – слуги трассы и существуем для нее...»* (В. Ажаев, «Далеко от Москвы»).

Значимость этого топоса такова, что люди интересуются друг другом прежде всего как носителями определенных функций. Цель искусства, по их мнению, отражение жизни и работы не человека вообще, а представителя конкретной профессии, того, какой вклад он вносит в общее дело. Рассказывая о героях, об их прошлом, авторы нередко ограничиваются указанием места их жительства и профессии: *«По воле судьбы они собрались из разных мест. Сержант Олейник был родом из Мурома, где работал заготовителем пушнины, солдат Осип Чернышев – знаменитый каменщик из Москвы, Федор Кочетов – садовод из подмосковного совхоза, Тихон Кудяров – колхозный агротехник из-под Владимира, Петро Семиглаз – бригадир колхоза с Киевицны, Нургалей Хасанов – помощник комбайнера из Татарии»* (М. Бубуеннов, «Белая береза»).

Счастье, которое испытывает человек, видя свое продолжение в детях и внуках, проявляется не в том, какими людьми они стали (т.е. морально-этический критерий не учитывается), а кем они стали (т.е. в какой функции они выступают): *«Сравнивая свою прежнюю жизнь с теперешней, она хорошо сознавала, что она старая, одинокая старуха, менее беспомощна и одинока, чем в молодости. Внуки ее были учителями, агрономами»* (Г. Николаева, «Жатва»).

Поскольку в немецком соцреализме личное не отходит на второй план, значимость общественной функции человека не становится столь явной, как в советском соцреализме. Однако советская действительность все же проявлялась в том, что человек не мог самостоятельно принимать решение: *«Der Fall ist zu kompliziert, als das wir ihn allein entscheiden können. Hier muß die Partei hinzugezogen werden. Die Sache gehört auf eine höhere Ebene»* (Н. Кант, «Die Aula») – *«Случай слишком сложный, мы не можем взять на себя такую ответственность. Надо посоветоваться с партией. Пусть решает высшая инстанция»* (Г. Кант, «Актальный зал»).

Советская действительность отражалась в оценке степени полезности человека для нового строя: *«Mithelfen in Kossin! Aufbauen!»* (А. Сеггерс, «Das Vertrauen») – *«Быть полезным в Косине! Отстраивать завод!»* (А. Зегерс, «Доверие»). С другой стороны, декларировалось то, что государство существовало для человека: *«Nicht nur er war für unser Land wie geschaffen, auch das Land war es für ihn»* (Н. Кант, «Die Aula») – *«Не только он был словно создан для нашей страны, но и страна была словно создана для него»* (Г. Кант, «Актальный зал»). Декларируются возможности, которые государство предоставляет своим гражданам: *«...das ist doch bei uns nichts Besonderes, wenn ein Landarbeiter Arzt geworden ist»* (Н. Кант, «Die Aula») – *«...в нашей стране это дело обычное, что сельскохозяйственный рабочий стал врачом»* (Г. Кант, «Актальный зал»). Если гражданин нового государства «не понимал», что воля партии ведет к всеобщему благоденствию, то он просто должен был слепо следовать указаниям: *«Wenn heute einmal nicht von selbst mitmacht, weil er selbst will, daß wir weiterkommen, wie du und ich es wollen, wenn er sich nicht mitreißen läßt, weil er ein Klotz ist, der nichts versteht und nichts verstehen will, was bleibt dann andres übrig als anzuordnen von oben: Mach's so!»* (А. Сеггерс, «Die Entscheidung») – *«Если кто-то не идет с нами по доброй воле, то есть, потому что сам хочет нашего продвижения вперед, как хотим этого мы с тобой, если его нельзя увлечь, потому что он чурбан, ничего не понимающий и не*

*желающий понимать, остается одно – приказать ему сверху: делай так!»* (А. Зегерс, «Решение»).

**Топос «все граждане советской страны – одна большая семья»** в некоторой степени «уравновешивает» предыдущую смысловую модель: будучи функцией, каждый человек, тем не менее, способен на великие дела, но только в единении с другими людьми.

Единение народа осуществляется в двух основных обстоятельствах: коллективная работа (строительство, уборка урожая) и война. В первом случае народ объединен общей целью труда на благо родины (здесь происходит переключка с топосом «счастье советского человека – в труде»): *«У всех у нас одна большая жизнь, – подумал он, – потому что воедино слиты наши цели и каждый знает общую большую мечту, ради которой живет...»* (В. Закруткин, «Плавучая станица»); во втором случае общая цель – разгромить врага, т.е. топос неразрывно связан с таким свойством советского человека, как патриотизм: *«Люди держали себя как одна семья, перебиравшаяся со старого места жительства на новое, – их сроднила тревога за Москву и сознание того, что они в этот суровый час объединились для общей задачи»* (В. Ажаев, «Далеко от Москвы»).

Патриотизм понимается и более широко – как необходимость выполнения какой-либо задачи, поставленной государством: *«Деловито изложив суть своего проекта, девушка обратилась ко всем комсомольцам с призывом записываться в сквозную колонну связистов. – Нам предоставляется возможность на деле доказать свой патриотизм, – говорила Таня»* (В. Ажаев, «Далеко от Москвы»).

Именно в ситуации *необходимости* происходит осознание слитности своего «я» с коллективным «мы»: *«На войне он увидел свой народ, узнал его стремления и характер и понял, что это его собственный характер, собственные стремления»* (Ю. Трифонов, «Студенты»).

Единение, сплочение людей вокруг какого-либо дела происходит как бы стихийно, за счет коллективного самосознания, которое было присуще новым, советским людям. Это основа их менталитета: *«Груня и сама охотно подчинялась тому, что направляло работу людей, и знала, что невидимым дирижером всего, что происходило в этот жаркий день на холме, была осознанная людьми сила коллективного, общего труда...»* и далее: *«Груня не столько видела, сколько ощущала всем своим существом ладную, согласованную работу трехсот разбросанных по холму людей и, так же как <...> все, кто трудился на колхозном поле, чувствовала силу и гордость человеческого единения, могучую общность нужного всему народу труда»* (В. Закруткин, «Плавучая станица»).

Руководство выступает лишь как направляющий (дает лишь целевую установку) и контролирующий (поправляет или наказывает выбившихся из общей массы) орган: *«Рыбаки, дымя махорочными скрутками, переглядываясь, одобрительно покачивая головами, слушали выступление Тихона Филипповича (первого секретаря райкома), открывавшее им глаза на многое, чего они, может быть, еще не знали, но к чему уже тянулись всей душой»* (В. Закруткин, «Плавучая станица»). При этом руководитель должен осознавать свою слитность с народом: *«– Убедить людей, зазечь их, добиться того, чтобы они сами повернулись к тебе лицом и пошли за тобой! Идти впереди народа, но обязательно вместе с народом»* (Г. Николаева, «Жатва»).

Отрыв от коллектива, обособление от общества приводит к тяжелым душевным переживаниям: *«Справлюсь ли? Не опозорюсь ли? Комсомольцы, молодежь, колхозный актив – вот моя надежда. Оторвусь от них – затеряюсь в снегу, как эта хворостинка в сугробе»* (Г. Николаева, «Жатва»); *«А теперь, в дни надвигающейся опасности и величайшего душевного испытания, перед угрозой потерять все, она ощутила в себе упрямую русскую душу и вдруг отчетливо поняла: все ее мечты, замыслы, весь ее труд – лишь крупинки большой народной жизни. Вне широкого потока народной жизни ей нечем будет дышать, нечего любить»* (В. Кетлинская, «В осаде»).

И наоборот, осознание своей сопричастности обществу делает человека счастливым: *«Никогда еще Мария не чувствовала такой гордой радости оттого, что она вместе с*

*окружающими ее и милыми людьми – часть родного города и того вернейшего отряда его, что зовется ленинградцы»* (В. Кетлинская, «В осаде»); *«Валентина подняла глаза: – Больше тысячи, Василий Кузьмич, сделаем! Ты послушай, как люди говорят: «мы», «нам», «у нас». Эти слова нам дороже тысяч!»* (Г. Николаева, «Жатва»).

Чувство коллективизма осознается как достижение нового социалистического строя, что приводит к своеобразному классовому высокомерию: *«Гости и хозяева жили хоть и тесно, но зато дружно, без ссор, – по справедливости, надо сказать: так умеют жить только наши люди»* (С. Бабаевский, «Белая береза»).

Следует отметить, что реализация данного топоса в немецких соцреалистических романах была невозможна. Одним из основополагающих признаков немецкого менталитета является четкое разграничение сферы частного и общественного, закрытость частной сферы и эмоциональная закрытость личности, упорядоченность частной сферы [8].

Единение народа в условиях возникновения ГДР строилось на идеях антифашизма. Необходимо было сделать из народа-преступника народ-мученик, народ-жертву: *«Die dreckige Sippschaft hoffte von neuem in ihre Paläste und Ministerien zu kommen und das Volk Blut schwitzen zu lassen, obwohl es gerade im Kriege ausgeblutet war»* (А. Seghers, «Die Toten bleiben jung») – *«Эта гнусная клика надеялась снова вернуться в свои дворцы и министерства и заставить народ исходить кровью, хотя он и так пролил её почти всю на войне»* (А. Зегерс, «Мертвые остаются молодыми»).

«Антифашизм (как отмечают немецкие историки М. Флакке и У. Шмигельт) стал государственной доктриной, которая оказывала свое воздействие даже на обыденную речь, пропитывала ее» [6]. Немецкие граждане имели в определенной степени право выбора, ведь очень многие воевали против Красной Армии. Примером этому могут стать героини немецких соцреалистических романов «Оле Бинкоп» Э. Штриматтера, «Актовый зал» Г.Канта, «Приключения Вернера Хольта» Д.Ноля и другие. Те, кто выбирали ГДР, оказывались интегрированы в новую систему, в том числе и потому, что они нужны были для ее восстановления. В статье, опубликованной в газете «Neues Deutschland» 28 февраля 1948 года, Вальтер Ульбрихт писал, что дело не в том, кто чем занимался во время нацизма, а в том, на чьей стороне он сегодня и насколько активно участвует в демократическом строительстве.

Данный топос, как было указано выше, является спецификой советского соцреализма. Поэтому любое проявление данного общего места необходимо рассматривать как заимствованную модель: *«In Bochow stieg es heiß empor, als ihm Bogorski schweigend die Hände auf die Schultern legte. Durch das Kristall der Tränen hindurch verschwisterten sich ihre Blicke und die brüderliche Liebe, die sie immer füreinander empfunden hatten»* (В. Апитц, «Nackt unter Wölfen») – *«Грудь Бохова захлестнула горячая волна, когда Богорский безмолвно положил ему руки на плечи. Сквозь хрустальную пленку слез их взоры побратались, обоих всегда связывала братская любовь»* (В. Апиц, «Голые среди волков»).

**Топос «молодость (новое) ценнее старости (старого)»**, прежде всего, реализовался в идею «своих и чужих (врагов)», которая была центральной в идеологии советского строя. Главный общественный конфликт 20-30-х годов, нашедший отражение в произведениях литературы и искусства литературы, – борьба с врагами и установление укрепления новой власти, новой общественной формации. Репрессивная политика власти уничтожила реальных и мнимых внутренних врагов строящегося государства, и конфликт исчерпал себя. В 40-50-е годы появляется литература, «где все течет мирно и гладко, где если и есть конфликт между героями, то только между передовыми и самыми передовыми, хорошими и наилучшими» [5].

Вырождение конфликта заставило литературу вновь обратиться к проблеме «отцов и детей», но рассматривалась она уже не на социально-философском уровне, а на идеологическом: *«– А станичная молодежь, уезжающая в техникумы и вузы, – что в ней от старого казачества? Жизнь-то наша, Федор Лукич, не стоит на месте, и мы, молодое поколение, поднялись на несколько ступеней выше своих отцов, на*

*окружающую жизнь смотрим иными глазами, а этому надо только радоваться»* (С. Бабаевский, «Белая береза»).

Новое поколение отличается от старого тем, что *«они ведь теперь за весь свет болеют, не то что мы»* (В. Закруткин, «Плавучая станица»).

Этот конфликт был скорее мнимым, декларативным и заканчивался он почти всегда одним и тем же: представители старшего поколения вначале не понимают молодых (т.е. новых людей), иногда сопротивляются их начинаниям, но в итоге идут за ними, даже учатся у них, т.е. топос сводится к борьбе старых и новых идей.

Классический пример – отношения руководителей стройки Алексея Ковшова, Беридзе и старых инженеров Тополева и Грубского в романе В. Ажаева «Далеко от Москвы», которые *«во всех этих хлопотах ... держались особняком»*. Грубский и Тополев поначалу не верили в возможность осуществления нового проекта нефтепровода, а Грубский даже сопротивлялся его претворению в жизнь, но, в конце концов, оба они встали «под знамена» новых идей.

Процесс метаморфоз сознания инженера Грубского автор не показывает, однако в конце он предстает перед нами резко изменившимся человеком, который *«пришел к вам с глубоким сознанием своих заблуждений»* и понял, что *«страшно остаться одному, без коллектива»* (В. Ажаев, «Далеко от Москвы»). Инженер Тополев менее ортодоксален, он показан как жертва *«неправильных, рабских представлений о жизни, и сейчас, от могучего толчка извне, все возмутилось и перевернулось в нем»* (В. Ажаев, «Далеко от Москвы»). Затем он стал внимательно присматриваться к «новому поколению» и обнаружил, что *«перед ним был инженер нового типа, инженер-большевик, инженер-хозяин. Он решительно распорядился всей жизнью, не только техникой»* (В. Ажаев, «Далеко от Москвы»). Окончательное перерождение инженера Тополева произошло под влиянием коллективного мнения, ключевым моментом стало собрание, где он подвергся резкой критике: *«Острее всех воспринимал происходящее Тополев. Все сказанное Женей и другими было адресовано ему. «Пережиток прошлого», – повторял он про себя, и чувство стыда все острее поднималось в нем»* (В. Ажаев, «Далеко от Москвы»). Естественно, что после этого Тополев стал всячески помогать строительству и более того его технические идеи позволили ускорить процесс прокладки нефтепровода.

Одной из составляющих данного топоса является также внедрение новых, социалистических способов труда: *«– Привыкли мы по старинке хозяйновать на реке: только брать из нее любим, а в остальном на природу надеемся. Колхозник, который на земле работает, далеко от нас ушел. Он теперь на дождик и природу надежду не возлагает, хозяином на своей ниве стал, на полвека вперед расчеты производит, в коммунизм глядит; Закинуть невод и вытащить рыбу легче всего. Так хозяйничали на реке наши деды, но мы не можем так хозяйничать, потому что мы с вами уже другие люди... советские люди...»* (В.Закруткин, «Плавучая станица»). Внедрение новых способов хозяйствования – в противовес старым – использовалось писателями как основа конфликта в производственных и колхозных романах.

Топос «новое ценнее старого» в немецком соцреализме отражается прежде всего в признании нового антифашистско-демократического порядка: *«...begreift er die neue Zeit nicht, wie so viele andere auch?»* (Н.Кант, «Die Aula») – *«Он, верно, не понимает духа нового времени, как, впрочем, и многие другие?»* (Г.Кант, «Актовый зал»). В ГДР необходимо было забыть, что было на войне. Общее прошлое, в котором были совершены преступления, необходимо было облечь в такой нарратив, который позволил бы легитимировать создание государства: *«Er hat für die neue Zeit im KZ gesessen...»* (Н.Кант, «Die Aula») – *«Он ради этого нового времени шесть лет в концлагере отсидел»* (Г.Кант, «Актовый зал»). Следует отметить, что в связи с этой спецификой в немецкой соцреалистической литературе проблема противопоставления старого и нового поколений не решается. Все поколения вовлечены в процесс построения нового государства: *«...daß ihr weder das Recht noch die Möglichkeit habt, euch dem zu widersetzen, was wir anderen, wir Neuen...»* (Н.Кант, «Die Aula»)

– «...у вас нет ни права, ни возможности противодействовать тому обстоятельству, что мы, **другие, новые...**» (Г.Кант, «Актный зал»), Тот, кто занимается строительством нового государства, соответственно обладал новым видением: «*Doch*», sagte Toni, «*du bist mit was wichtigem fertig, was Neues fängt an. Früher, da hast du dem Robert geholfen, damit er die Prüfung macht und was Neues anfangen kann*» (А.Сегхерс, «Das Vertrauen») – «Как сказать, – отвечала Тони, – ты с важным делом управился и теперь будешь жить **по-новому**. Ты-то ведь помогал Роберту готовиться к экзамену, чтобы и он **по-новому** зажил» (А.Зегерс, «Доверие»).

Данное общее место может рассматриваться как сопоставление худшего прошлого (старого) и перспективного будущего (нового) в стране социалистического строя: «*Er hatte kaum eine Vergangenheit, aber eine Zukunft in höchsten Höhen*» (Н.Кант, «Die Aula») – «У него и прошлого-то никакого не было, зато будущее открывало перед ним самые блестящие перспективы» (Г.Кант, «Актный зал»).

С другой стороны, следует отметить, что для немецкого соцреализма не характерна агрессия в отношении к старому, нет стремления его искоренить: «*Man konnte keine Zukunft haben ohne Vergangenheit; das war eine Binsenwahrheit und bedurfte keiner Diskussion*» (Н.Кант, «Die Aula») – «Нельзя обрести будущее, отрекаясь от прошедшего; это азбучная истина, не требующая доказательств» (Г.Кант, «Актный зал»). Более того, в западной соцреалистической литературе сильны традиции [7]: «*Wir stehen in einer Tradition, die vorschnelle Neuerungen ausschließt*» (Н.Кант, «Die Aula») – «...в наших традициях – исключать все чрезмерно новое, **не вызревшее**» (Г.Кант, «Актный зал»). Для немцев характерно передаваемое от поколения к поколению уважение к порядку, к власти, к государству. Это объясняет связь настоящего немецкого народа с его прошлым. В силу чего авторитет прошлого закономерно распространился на все позднейшие установления [8].

**Топос «ответственность за нацистское прошлое»** является специфическим для Германии. В образе своих героев писатели показали процесс пробуждения антифашистского сознания в солдате вермахта, постижения им того, в какой мере на нем лежит вина за преступления нацистов (Г.Кант, «Актный зал», Д.Ноль, «Приключения Вернера Хольта, Э. Штритматтер, «Оле Бинкоп» и др.): «*Wer im Oktober neunundvierzig fünfundzwanzig war und männlichen Geschlechts, der hatte bestimmt einmal ein Soldbuch besessen, und er hatte kaum ein heiles Fell und selten, wenn er denken verstand, ein reines Gewissen*» (Н.Кант, «Die Aula»). – «Тот, кому в октябре 1949 года стукнуло двадцать пять, обязательно носил в свое время в кармане солдатскую книжку, и ему едва ли удалось уберечься от ранений и – если, конечно, это был человек мыслящий – сохранить чистую совесть» (Г.Кант, «Актный зал»).

**Топос «рефлексия по поводу расколотой Германии»** отражает специфику немецкой историко-политической ситуации. После Второй мировой войны Германия разделилась на два враждующих лагеря – «капиталистический» (ФРГ) и «социалистический» (ГДР). В 50-е – 60-е гг. XX века оба враждующих лагеря были предельно организованы, вооружены и, главное, обеспечены идеологически: «*Was sich in diesem Teil Deutschlands begab, noch vor vier Jahren russische Zone genannt, war eine ruckweise, manchmal langsam fühlbare Veränderung. Es gab Menschen, die diese Veränderung fast wie im Fieber erwartet hatten. Manchmal in Lagern und in Gefängnissen. Jetzt kam ihnen jede Schwierigkeit jeder Verdruss bedeutungslos vor verglichen mit den ersten Spuren des neuen Lebens*» (А.Сегхерс, «Das Vertrauen») – «В этой части Германии, каких-нибудь четыре года назад называвшейся русской зоной, перемены совершались рывками, иногда очень резкие, иногда едва заметные. Были люди, лихорадочно дожидавшиеся этих перемен. Этим любая неприятность, любая трудность представлялась ничтожной в сравнении с первыми проблесками новой жизни» (А.Зегерс, «Доверие»).

«Перебежчики» признавались врагами: «...*Linie gegen Eichstrich...*» (Н.Кант, «Die Aula») – «...променял прямой путь на кривую дорожку...» (Г.Кант, «Актный зал»). Под подозрение попадали их близкие, оставшиеся в ГДР. Так, например, после побега Квази, одного из героев романа Г.Канта «Актный зал», в ФРГ, в архиве факультета рабочей

молодежи, где он учился, уничтожается его личное дело. Герою А. Зегерс «Доверие» в суде приходится доказывать верность идеологии ГДР после поездки в ФРГ.

Безотрадная участь ждет тех, кто уехал в ФРГ и США. Благополучие еще больше оттеняет трагизм существования, лишённого цели и веры. Большинство из них, вынесших лишения и удары судьбы, ждет безвыходное отчаяние, крушение иллюзий: *«Bernd erschrak als begriff, daß ... Wolkenkratzer erstaunlich schnell auf ihn zurückten. Er kam sich bedroht vor und undurchdringlich seine Zukunft. Er hielt sich in seiner Verlassenheit an das Nächste»* (А. Seghers, «Das Vertrauen») – *«Бернд испугался, когда понял, что это небоскребы с поразительной быстротой надвигаются на него. Ему почудилось какая-то опасность, будущее его было непроницаемо. В своем одиночестве он цеплялся за ближайшее»* (А. Зегерс, «Доверие»).

Итак, данная система топосов задает тип содержания литературы соцреализма, формирует идеологические и этические рамки этого содержания. Литературные произведения, не вписывающиеся в эту систему, осознавались как «чуждые», «не наши». Доминирующая черта соцреалистических текстов – принципиальная клишированность, проявляющаяся на всех уровнях – семантическом и вербальном. Клишированным оказывалось в первую очередь содержание текстов, детерминированное идеологией и партийно-правительственными документами. Это проявлялось в топике – системе морально-идеологических и логико-смысловых норм. Советская топика, как следует из проведенного анализа, имела характер догм, штампов, не подлежащих развитию и вообще какому-либо изменению.

Таким образом, данная система топосов, характерная для литературы советского соцреализма, лишь частично реализуется в немецкой соцреалистической литературе, что обусловлено, прежде всего, спецификой менталитета немецкого народа и искусственным насаждением метода соцреализма. Немецкий соцреализм, в силу иных геополитических условий, особенностей национального менталитета и культурных традиций, имеет свою специфику и допускает некоторые отклонения от строгих требований советского соцреализма. Однако отличия немецких соцреалистических романов от советских носят не принципиальный, а лишь стилистический характер. Своеобразие проявляет в национальном аспекте и социальном начале.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Добренко Е.А. Не по словам, но по делам его // Избавление от миражей: соцреализм сегодня. М.: Советский писатель, 1990. С. 323, 317.
2. Советская массовая поэзия: хрестоматия / М.В. Козулина, А.П. Романенко. Саратов: ИЦ «Наука», 2009. С. 136.
3. Сергеев Е. Несколько застарелых вопросов // Избавление от миражей: соцреализм сегодня. М.: Советский писатель, 1990. С. 21.
4. Сергеева А.В. Русские: Стереотипы поведения, традиции, ментальность. М.: Флинта: Наука, 2004. С. 153.
5. Синявский А. Что такое социалистический реализм // Избавление от миражей: соцреализм сегодня. М.: Советский писатель, 1990. С. 58, 61.
6. Флакке М., Шмигельт У. Германская Демократическая республика. Из мрака к звездам: государство в духе антифашизма // Неприкосновенный запас. 2005. №2-3. С. 40-41.
7. Łapiński Z. Synkretysm // Słownik realizmu socialistycznego. Kraków: Universitas. cop., 2004. S. 94-96.
8. Wiewiorka M. Kulturelle Differenz und kollektive Identitäten. Hamburg, 2003. 211 S.



старший преподаватель кафедры «Иностранные языки» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного Технического университета Senior Lecturer of the Department “Foreign Languages”, Engels Technological Institute (Branch) of Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 11.02.2011, принята к опубликованию 10.07.2011*

**В.А. Краснощёков**

**ОСОБЕННОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ НАРОДНЫХ ФОРМ КУЛЬТУРЫ  
ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ГОРОДОВ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ  
НА РУБЕЖЕ XIX – XX ВЕКОВ**

*В статье рассмотрены традиционные народные формы культуры и их региональные особенности в области декоративно-прикладного искусства индустриальных городов Среднего Поволжья, а так же исторический и художественный опыт традиционной повседневной культуры региона, возможности по ее возрождению и сохранению в среде постиндустриального общества.*

Традиционные формы, народная культура, повседневная культура, Среднее Поволжье, декоративно-прикладное искусство

**V.A. Krasnoschyokov**

**FEATURES OF TRADITIONAL NATIONAL FORMS OF CULTURE  
OF INDUSTRIAL CITIES OF THE CENTRAL VOLGA REGION  
ON THE BOUNDARY XIX – THE XX-TH CENTURIES**

*In article traditional national forms of culture and their regional features in the field of arts and crafts of industrial cities of the Central Volga region, and as historical and art experience of traditional daily culture of region, possibilities on its revival and preservation in the environment of a postindustrial society are considered.*

Traditional forms, national culture, daily culture, the Central Volga region, arts and crafts

Народная культура в качестве важной составляющей жизненного опыта человека в последнее время получила новое прочтение. Продолжается дальнейшее совершенствование представления о путях развития пространственно-предметной городской среды, объединившей как устойчивость вкусов с их жесткими канонами народного уклада жизни, так и изменчивость, основанную на художественно-стилевой эволюции.

Обладая национальной, социальной и исторической спецификой, культура повседневности все же ограничена дальностью перемещений. По мнению В.Д. Лелеко, границы внешнего пространства повседневности очерчивают территорию города и близлежащего пригорода [1]. Именно здесь происходит «процесс стирания различий между искусством и повседневной жизнью» [2] или процесс эстетизации повседневности.

В последнее время наблюдается рост интереса к истории народной традиционной культуры региона, при этом активно идет переосмысление прошлого. В этом мы видим не случайный характер, т.к. культурное пространство представляет собой своеобразный синтез «этических и эстетических представлений человека и его деятельности» [3].

Национальное прикладное искусство, окружая человека в его повседневной жизни, способствует воспитанию патриотизма. Если вещи, среди которых живет народ, ему близки, удовлетворяют его потребности и эстетические чувства, то этим они усиливают гордость людей своей национальной культурой.

Переход традиционной культуры в XX веке к культуре индустриальной, нашедшей наибольшее воплощение в повседневном быте людей, в искусстве, довольно условен, ибо

традиционная культура в определенной мере продолжает существовать и сейчас. Вызывает интерес культурологический аспект этого феномена – каковы те элементы, которые создавали и воспроизводили традиционную культуру, и каким образом она сама воспроизводила эти элементы.

В современных условиях важно выявить и сберечь национальный культурный опыт, который может стать одним из прорывных ресурсов создания городской среды с учетом традиционной культуры. Необходимо помочь культуре произвести некий элемент выживания, выбрать правильную программу, основанную на региональной культуре, на ментальности, используя социокультурные технологии, позволяющие формировать в своей культуре новое понимание ценностей, норм, правил, регулирующих создание в регионах культурных артефактов.

В постиндустриальном мире продолжаются попытки унификации культур, превращения их в элементы рынка. Возникает ощущение «глубокой внутренней тревоги по поводу культурной идентичности в условиях глобализации» [4]. И здесь особенно важен опыт традиционной народной культуры, обладающей «мощными самоохранительными механизмами, защищающими себя от разрушения, передаваясь из поколения в поколение, выступая, как живая традиция трансляции ценностей» [5].

Современное общество производит значительно больше материальных благ, нежели в прошлом. Изменилась как среда обитания человека, с одноликими предметами материальной среды, так и его отношение к окружающим вещам. Встает вопрос о «качестве жизни» и «культурном капитале» [6]. Рукотворная вещь, создаваемая народным мастером, призвана разрушить стандартность нашего окружения, внести в окружающую среду элемент непосредственного человеческого чувства. Состояние современного российского общества настоятельно требует изучения и использования опыта традиционной народной культуры.

Изучение народной культуры городов Среднего Поволжья представляет значительный научный интерес, поскольку позволяет рассмотреть динамику традиционных форм культуры российских провинциальных городов, особенности их повседневной культуры. Кроме того, необходимость объединения разрозненных исследований по данному направлению определили проблему исследования, которая состоит в рассмотрении феномена народной культуры индустриальных городов Среднего Поволжья на рубеже XIX – XX вв. с позиций ее традиционных форм.

Начиная с середины XIX века, города Среднего Поволжья активно развивались. В этот период формировалось новое культурное пространство городской повседневности – развивалась сфера услуг, в том числе и ремесленно-кустарное производство, опирающееся на народную культуру региона. Кустарная промышленность приобретала все большее значение в Среднем Поволжье, почти исключительно земледельческом крае, служа необходимым дополнением к бюджету крестьянского хозяйства. Поэтому, наряду с сельским хозяйством, население Среднего Поволжья занималось различными производствами, необходимыми в быту – изготовлением орудий труда, домашней утвари, обуви, одежды. Готовые изделия украшали резьбой, росписью или вышивкой. Далее, не претендуя на полноту освещения всех производств, автор предпринимает попытку иллюстрации выдвинутого тезиса.

В декоративно-прикладном искусстве региона использовались разнообразные материалы. Но одним из важнейших и широко распространенных материалов, издавна применяемых в Среднем Поволжье для изготовления разнообразных изделий, являлась древесина. Многие деревянные изделия украшали резьбой – посуду (ковши, солонки и др.), предметы домашнего обихода и орудия труда, такие как вальки, рубели и прялки.

Дерево было основным материалом для изготовления солонки. Самыми излюбленными породами были береза, сосна, ель. В зависимости от местных традиций переселенцев деревянные солонки на территории Среднего Поволжья имели самые разнообразные формы и конструкции. Среди них были долбленые, резные, точеные, плетеные из лозы, бересты. Почти все солонки имели крышки, предохраняющие от попадания мусора и влаги.

У выходцев северных областей (Вологодская и Архангельская губернии), а также Смоленской губернии типичной формой солонок была пlying птица с головой утки, коня, выдолбленная из одного куска дерева с отдвижной крышкой на спинке [7]. Эта форма напоминает форму ковшей. Хвост или голова птицы служили ручкой солонки. Крышка крепилась в хвостовой части с помощью деревянного гвоздя. Форма солонки – спокойно пlying птицы. Часто солонки делали на невысоких подставках, на подставках-ножках. Поверхность таких солонок украшали нехитрой резьбой или росписью.

У переселенцев из центральных черноземных губерний получили распространение солонки на полтора – два фунта, по форме напоминающие кресла, в виде кубического ящичка с откидной крышкой и высокой задней стенкой [8]. Даже отдельные их части назывались так же: подлокотники, спинка и т. п. Подобные солонки выдалбливались из дерева, потом к ним крепились крышка. Они были самой разнообразной формы.

Позднее, в начале XX века, подобные солонки складывались из тонких дощечек неокрашенного дерева и обнизывались деревянными обручами в 4 или 5 рядов. В более упрощенной технике данная форма дошла и до наших дней. Поверхность таких солонок, как правило, покрывалась сплошным мелким узором выемчатой резьбы из розеток и ромбов или росписью. Центральный мотив узора приходился на переднюю часть солонки. Особо украшалась задняя стенка (спинка) солонки.

Солонка постоянно стояла на обеденном столе. Соли в быту придавалось особое значение, поэтому солоницы особенно заботливо украшались резьбой и росписью. Выразительная резьба и яркая роспись придавали солонке нарядный праздничный вид. Подобные солонки в большом количестве изготавливали на продажу.

В XIX веке значительного уровня достигает производство деревянной посуды, выполненной на токарном станке. Солонки, выполненные токарным способом, имели вид простой чаши с крышкой или чаши на невысокой точеной ножке и поддоне. Часто точеные солонки украшались росписью. С развитием промышленного производства, помимо деревянных солонок, на территории Среднего Поволжья получили распространение солонки, изготовленные из металла, стекла и фарфора. Богатые горожане могли себе позволить солонки подарочные, выполненные из серебра с гравировкой и позолотой [9].

Орнамент на солонках (изображение круга, розетки, сегмента, ромба) был схож с геометрическим орнаментом, которым украшали орудия женского труда (вальки, рубели и прялки).

Предмет для глажения («катания») льняных вещей – рубель. Это плоский деревянный брусок длиной 55-70 см, шириной 10-8 см (в широкой части) с рубчиками (валиками – полукруглыми выступами) на рабочей плоскости поперек его длины. Ручки длиной около 10-15 см были круглые, четырехгранные, некоторые имели небольшое дисковидное навершие. Рубель делали из целого куска древесины. Основная рабочая часть его, для более удобной работы и одинакового нажима при прокатывании, выгибалась по длине и расширялась к одному торцу. При изготовлении рубелей применяли древесину твердых лиственных пород – дуба, ясеня, вяза, рябины, клена, черемухи и березы. В разных районах Поволжья была своя, определенная форма рубеля, или своеобразный декор. Нередко рубель сверху украшался резьбой, росписью или подписью владельца [10]. Но на всех рубелях одна техника резьбы, одни элементы узора и почти одна и та же форма плоскости, предназначенной для резного орнамента.

Валек – приспособление для стирки белья, сделан из березовой пластины и представлял собой увесистый короткий, прямоугольный, обычно слегка выгнутый деревянный брусок с ручкой. Хозяйка брала его на речку и, намывив в несколько раз сложенную на камне или доске ткань, с силой била по ней вальком. «Выбивая» вместе с мыльной водой и грязь. Линия изгиба валька определялась движением во время удара. Вальки и рубеля изготавливали либо ремесленники, либо искусные деревенские мастера. Форму предмета, его объем народные мастера прекрасно подчеркивали резьбой. Особенно традиционна для декора вальков Среднего Поволжья геометрическая трехгранно-выемчатая

(клинообразная, клиновидная) резьба. Иногда она состоит из одной, двух, трех или более отдельных розеток, а иногда резная композиция густо заполняет всю поверхность. В основном – это разновидности «креста в круге» или «колеса» – варианты так называемого солярного знака. Резьбу наносили на нерабочую лицевую часть валька – на кончик ручки и на верхнюю, чуть вогнутую, поверхность [11]. Рабочая часть валька делалась более широкой, так как вальком выбивали мокрое белье на речке. Существовали разновидности вальков применяемых в валянии валенок – это рубчатый брусok с прямоугольными гранями [12].

Для переноски воды из колодца и белья служило коромысло – длинный, в размах рук, плоский брусok с вырезами в его концах (куда цепляли дужки ведер), дугообразно изогнутый, удобно лежавший на плечах. Коромысло тоже украшали резьбой, раскрашивали, что придавало ему нарядный и праздничный вид. Производством коромысел были известны Бугурусланский и Бузулукский уезды [13]. В качестве заготовки для коромысла чаще всего подбирали дерево березы, орешника (лещины), клена, реже – сосны и ели, толщиной посередине 5–7 см. и длиной 190–210 см. На территории Среднего Поволжья для переноски стирального белья использовали специальное сильно изогнутое по краям коромысло [14].

Другим важным женским предметом в повседневной жизни жителей Среднего Поволжья была прялка или самопрялка, представляющая наибольший интерес из бытовых деревянных изделий. Прялка была подарком жениха невесте, ее делали в приданое дочери и хранили всю жизнь, передавая от матерей к дочерям. Материалом для самодельных тканей служили главным образом лен, конопля, шерсть. Стебли льна (конопли) вымачивали и мяли, затем трепали и чесали, превращая в «кудель». Эту кудель привязывали к прялке (вертикальной стойке, укрепленной на горизонтальной доске – «донце»), где сидела пряжа и, скручивая нить, наматывала ее на веретено [15].

Различают два вида прялок по способу их изготовления: цельные (или корневые) и составные (где приспособление для крепления кудели вставляется в донце). Корневые прялки делались из цельного куска ствола с корнем (копани), где корень являлся донцем, а на ствол (лопасть) прикрепляли кудель. Составные прялки повторяли форму корневых, но с отдельными донцем и куделью. Они подразделяются в свою очередь (по форме стояка) на палкообразные, лопатообразные, башнеобразные и другие [16]. Форма кудели встречается в виде вилки, гребня и лопатки. В отличие от североевропейской части России, где изготавливали прялки корневые, в Поволжье прялки делали разъемные (так называемый ярославско-костромской тип). В основном на территории Среднего Поволжья, вплоть до начала XX века, пользовались прялкой в виде развилки (кужелем – от «кудель»), на которой пряли коноплю или шерсть. У чувашей преобладали палкообразные прялки («дигэ») [17].

Прялка была не только предметом труда в быту. После работы прялку разбирали, активно декорированное донце вешали на стену. Съёмные донца, покрытые резьбой или росписью, служили украшением избы. В каждой области, в каждом районе были свои традиции изготовления и украшения прялок, которые передавали из поколения в поколение. Во второй половине XIX века роспись наносили поверх резьбы. Размер и форма донца варьировались в зависимости от места изготовления. Мастера по изготовлению прялок имели индивидуальный почерк, характерный для той или иной местности. Поэтому по форме прялки и, особенно, по ее декору можно определить, где она была сделана или откуда привезена. Для Среднего Поволжья характерно донце, типичное для средне-южнорусских областей, в виде массивной вытянутой доски, напоминавшей скамейку или валеk. Причем орнамент вальков и днищ прялок повторяли друг друга. Короткая и широкая, имевшая форму усеченного конуса, доска была характерна для Верхнего Поволжья [18].

Прялка любой конструкции представляла собой, прежде всего, растительный образ (цветка или дерева). По формообразованию прялки подразделяют на древесную и древесно-цветочную группы [19]. К первой группе относятся лопастные прялки, характерные для северорусских областей. Ко второй – «гребневые», более распространенные в Поволжье, центральных и западных областях России. Для Среднего Поволжья характерно разнообразие

местных очагов с разными видами резьбы (трехгранно-выемчатым и скульптурно-зооморфным) и росписи (свободно-кистевые, графические) [20].

С конца XVIII века стала распространяться самопрялка с колесом (так называемая «ножная»), которая просуществовала до 30-х годов XX века [21]. Самопрялка состояла из подставки на 4-х ножках и площадки, на которой укреплены 2 стойки. Между ними находится колесо, вращающееся на железной оси. Вверху укреплен деревянный валик с 2 колесиками и мотовилом. Внизу под подставкой деревянная педаль, соединенная дощечкой с осью колеса. Выпряденную на прялке нить «сновали»: обычно на вращающейся раме, и «основу» натягивали на ткацкий стан [22]. Он ставился в жилой избе, занимая, как правило, целый угол. Ткацкий станок часто украшала резьба. Особенно нарядно декорировались ткацкие станки в Среднем Поволжье. Их массивные стойки («боковины» или «станины»), боковые стены станка, задающие его длину и высоту, с наружной стороны покрывались крупной резьбой. Но чаще всего резьбой украшались «набилки» (накладная сборная резная доска, за которую ткачиха во время работы бралась рукой). В центре «набилки» располагалось бердо – рама-расческа, сделанная из тонких деревянных или железных пластин. В Сызранском краеведческом музее сохранилось несколько железных берд [23].

При обработке пуха в Среднем Поволжье употребляли гребень, моталку и прялку особого устройства, называемую «чигирь». [24].

Разнообразны формы и украшения деревянных ложек. Ложки изготовляли из березы, ясеня, клена с короткими ручками и плоским черпаком. Делали ложки для меда, общего варева, также праздничные, разнообразные по форме (кругло гнутые, мелкие, глубокие, большие и маленькие). Разные виды ложек имели свое название: ложка средней величины – межеумок, у бурлаков ложка называлась «бутырка» (от слова «бутырить» – переворачивать, мешать). Она была толще, грубее и считалась самой крупной. Бурлаки носили ее за ленточкой шляпы, как своеобразный знак отличия. Расписная ложка – баская (т.е. красивая) или боская, была долговатой и тупоносой, полубаская – более округлая. Остроносую ложку называли носатой а некрашенная ложка называлась белой. Ручки покрывали резьбой – плетенкой, выполненной в технике контурной резьбы, которая позволяла более плотно держать черенок. Ручка заканчивается коковкой – утолщением в виде срезанной пирамидки. Ложки оставляли либо белыми, либо раскрашивали в красный, желтый и черный цвета. Встречаются ложки, в росписи которых присутствует зеленый цвет [25].

В XIX веке Среднее Поволжье славилось оформлением кузовов открытых саней. В легковых санях большинства сельского и городского населения использовались местные породы деревьев, которые заготавливались самим мастером или покупались на рынке: ель, сосна, береза, дуб, клен, ясень, липа и др. У зажиточных горожан кузова сверху окрашивались, покрывались резьбой, росписью, токарными деталями, художественной ковкой. При этом обшивка кузова (из досок, луба, жести) крепилась изнутри к каркасу, а «кузов изнутри выстилался тонким листовым железом, окрашенным в черный цвет, а наружный каркас, делавшийся из дерева, украшался резьбой, богатой росписью, ковровой обивкой. Передок, задок и бока по верху отделялись кованой узорной железной решеткой, а иногда ковровый задок просматривался через точеные балясины» [26].

Своеобразием отличались украшения деревянных сундучков в Среднем Поволжье, называвшихся коробья или коробейка. Коробья отличается от современного сундука скругленными углами. Материалом для изготовления коробья чаще всего служил липовый луб, реже осина или ясень. Корпус сундучка делали путем сгибания куска луба определенного размера, края накладывали один на другой и сшивали лыком. Дно и крышку выстругивали из сосны или ели по размеру корпуса короба. Пока луб был сырым или распаренным, вставляли дно: высыхая, стенки сжимались («садились»), и днище прочно закреплялось. Крышку прикрепляли к коробье железными петлями, предварительно обхватив торцы в лубяной обод, и навешивали замок.

Глянцевитая и гладкая поверхность луба была удобна для росписи – почти не впитывала красок и не требовала предварительной обработки. Но все равно, чтобы

уменьшить пористость материала, лубяные стенки пропитывали олифой. Крышки перед раскраской грунтовали составом, приготовленным из мела и клея. Наружные стенки коробки делили на широкие прямоугольники и в каждом рисовали какую-нибудь жанровую сценку. Зачастую роспись наносилась и на внутреннюю поверхность крышки. В XIX – начале XX века в Среднем Поволжье в основном был распространен костромской тип росписи, которая выполнялась без предварительного контура [27].

В Среднем Поволжье также имели распространение пряничные доски. Пряничное тесто заливалось на доски четырехугольной формы с вырезанным углубленным рельефом, и пряник получал волнистую поверхность или какой-либо рисунок. Пряник обычно украшался по краям как картинка, рамочкой или бордюром. Узор в пряничных досках был разнообразным по глубине, частоте и форме. В Самарском областном историко-краеведческом музее им. П.В. Алабина находятся доски, выполненные в стиле выемчатой резьбы, датированные концом XIX – началом XX века [28].

Особо следует остановиться на специфике регионального орнамента. Находясь на вещах, служивших человеку повседневно, орнамент, его мотивы и образы также оказывались частью повседневности.

Два больших стиля пронизывают всю историю народного декоративного искусства Среднего Поволжья – геометрический и изобразительный. Первый из них намного старше по времени своего возникновения, он базируется на художественной традиции, сформировавшейся в Древней Руси [29]. Геометрические орнаменты покрывают многочисленные предметы деревенского обихода: они украшают прялки, вальки, рубеля, посуду, разного рода утварь и предметы труда. Орнамент заключал в себе определенный смысл. Например, ромбо-точечный знак на прялке символизировал землю, пашню. На прялках Среднего Поволжья очень часто встречается ромбо-точечная композиция – «одна из первых ступеней народного декоративного творчества» [30], выполненная самым распространенным видом резьбы – трехгранно-выемчатым. Другим распространенным элементом орнамента Среднего Поволжья было изображение солнца в виде шестилепестковой розетки или колеса с шестью спицами (колесо Юпитера). А крест в круге (а иногда и без круга) часто являлся символом не только солнца, но и огня. Шестилучевой знак связывался также с грозой, молнией и громом. Знаком колеса с шестью спицами, который назывался в славянской традиции «громовым знаком», обозначался Ильин день (20 июля) [31]. «Громовой знак» помещали на особо ценных предметах – на солонках, на сундуках-скрынях для приданого. Этот знак присутствует и на ткацких станах.

Для геометрического орнамента, как выявлено в исследовании, характерно отсутствие каких-либо изображений животных или птиц. Здесь содержатся только одни космологические образы (солнца, небесных светил) которые, быть может, более непосредственно выражают основную идею геометрического стиля.

Затем происходит развитие космологической темы за счет ее изобразительного наполнения: геометрические солярные и звездные образы сочетаются с изображениями животных, птиц, людей. Земля на прялках стала теперь изобразительно выражаться как серия бытовых сцен, связанных с девичьей судьбой [32].

Геометрический стиль жив отчасти и в наши дни. Конечно, всем образам народного искусства тоже свойственны изменения: они не повторяют буквально один другой, находятся в некотором медленном развитии. Но основа, как правило, сохраняется. Ромб, треугольник, квадрат, ломанные или волнистые линии, круг, составляющие основу геометрического стиля, не меняются в своей сути, но подвергаются вариантным изменениям, главным образом за счет усложнения и обогащения их композиционных сочетаний. Длительность существования геометрического стиля была вызвана, прежде всего, тем, что он отвечал мировоззренческим и эстетическим взглядам народа.

Таким образом, традиционные народные формы нашли проявление в повседневной культуре населения индустриальных городов Среднего Поволжья и имеют ряд особенностей.

Во-первых, в заселении региона участвовали выходцы из различных районов России. Среднее Поволжье являлось также местом миграции крупных этнических групп – мордвы, татар, чувашей, поляков, немцев и др. Переселенцы приносили в поволжские земли свои традиции и приемы ведения хозяйства, инструменты, домашнюю утварь. Это способствовало взаимовлиянию их культур.

Во-вторых, в силу более раннего переселения в регион северорусской этнографической группы [33], наличия водного пути и, соответственно, активным торговым связям наибольшее влияние на формирование народной культуры и, в частности, декоративно-прикладного искусства Среднего Поволжья оказали традиции народного искусства верхней Волги (Волго-Камья) – Ярославля, Костромы, Нижнего Новгорода, Городца и других районов севера России.

В-третьих, если размер и форма предметов повседневного обихода и орудий труда варьировалась в зависимости от места выхода переселенцев, то их декоративной отделке были присущи: одинаковая техника резьбы (контурная и трехгранно-выемчатая), одинаковые элементы орнамента (геометрическая резьба) и почти одна и та же форма плоскости, предназначенной для нанесения декора.

В целом, традиционные народные формы культуры Среднего Поволжья сформировала этнографическая неоднородность населения. А также его длительное существование в условиях природно-экологической и культурной среды полиэтнического региона. Общие региональные особенности различных форм традиционной культуры на рубеже XIX – XX веков нашли непосредственное выражение в декоративно-прикладном искусстве Среднего Поволжья.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лелеко В.Д. Пространство повседневности в европейской культуре. СПб.: СПбГУКИ, 2002. 320 с.
2. Социологический словарь / Н. Аберкромби, С. Хилл, Б. Тернер: пер. с англ. под ред. С.А. Ерофеева. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1997. С. 369.
3. Бабаева А.В. Этические аспекты поведения в культурном пространстве // Этическое и эстетическое: 40 лет спустя. Материалы научной конференции. 26-27 сентября 2000. Тезисы докладов и выступлений. СПб.: [Санкт-Петербургское философское общество](#), 2000. С. 18-21.
4. О'Коннор Д. Культурная политика как влияние: экспорт идеи «творческих индустрий» в Санкт-Петербург // Творческие индустрии в России. Результаты пилотного проекта в Санкт-Петербурге. СПб.: Светлица, 2004. С. 32.
5. Зотов С.В. Повседневная культура как константная субстанция национальных культур // Аналитика культурологи. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. ун-та им. Г.Р. Державина, 2005. № 5. С. 28.
6. Бурдые П. Социология социального пространства. М.: Институт экспериментальной социологии. СПб.: Алетейя, 2007. С. 15-16.
7. Чекалов А.К. Народная деревянная скульптура Русского Севера. М.: Искусство, 1974. С. 94.  
Просвиркина С.К. Русская деревянная посуда // Труды ГИМ. М.: Госкультпросветиздат, 1957. С. 42-44.
8. Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. О. ф. Солонки: 1) Солонка, дерево, точеная, в форме цилиндра с крышкой. КП-17853/33, Вб-167; 2) КП-18636/7-1, Вб-502/1; 3) Солонка, дерево, роспись. КП-20508/4; 4) КП-652, Вб-359; 5) КП-20341/34; 6) КП-19996/12, Вб-1497; 7) Солонка, серебро. КП-19492/3, Вб-1026.
9. Димитровградский краеведческий музей. Рубель. КП-1309, инв. № 419; Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. О. ф. Рубели, КП: 1) 19751/9, Вб-1208; 2) 18699/6, Вб-559; 3) 17987, Вб-83; 4) 19161/2, Вб-829; МУ Краеведческий музей



г.о. Сызрань. О.ф. Рубели, КП: 1) д273, № 5212; 2) д283, № 5841; 3) Рубель с подписью на серо-синем фоне, в черной рамке, красной краской: «А.Серебрякова», д480, № 12214.

10. Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. О.ф. Вальки, КП: 1) 17681/15, Вб-138; 2) 728, Вб-380; 3) 18259/4, Вб 406; 4) Валек с орнаментом. 5112, Вб-278; 5) Валек с орнаментом. 21772.

11. Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. О.ф. Валек для изготовления валенок. КП-18632/13, Вб-496.

12. Мещерский А.А., Модзалевский К.Н.. Свод материалов по кустарной промышленности в России. СПб.: Тип. бр. Пантелеевых, 1874. С. 68, 112.

13. Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. О.ф. Коромысла, КП: 1) 18078, Вб-210; 2) 727, Вб-3784; 3) Коромысло для переноски белья. КП-18200, Вб-393.

14. Мещерский А.А., Модзалевский К.Н.. Свод материалов по кустарной промышленности в России. СПб.: Тип. бр. Пантелеевых, 1874. С. 290.

15. Бежкович А. С., Жегалова С. К., Лебедева А. А., Просвиркина С. К. Хозяйство и быт русских крестьян. Памятники материальной культуры. М.: Советская Россия, 1959. С. 84.

16. МУ Краеведческий музей г.о. Сызрань. О.ф. Прялки, КП: 1) д130/1-2, инв. № 4965/1-2; 2) д224, инв. №№ 5466/2, 5675/2, 4972/16; Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. О.ф. Прялки, КП: 1) 19751/13, Вб-1212; 2) 18259/6, Вб-408 3) Прялка чувашская - «Дигэ» КП-19080/20, Вб-755.

17. Тарановская Н.В. Резные прялочные донца центральных и южных районов России // Сообщения ГРМ. М.: Изобразительное искусство, 1976. Вып. XI. С. 51-54.

18. Барадулин В.А. Уральская народная живопись по дереву, бересте и металлу. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1982. С. 28.

19. Шелег В.А. Севернорусская резьба по дереву: Ареалы и этнические традиции (опыт картографирования геометрической изоморфной резьбы) // Русский Север: Проблемы этнокультурной истории, этнографии, фольклористики. Л.: Наука, 1986. С.50-66.

20. Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. 1) Самопрялка чувашская («Дигэ»). О.ф. КП 510/1, Вб-255/1; 2) КП 19080/19, Вб-754. МУ Краеведческий музей г.о. Сызрань. Самопрялка О.ф. КП д460/11091.

21. МУ Краеведческий музей г.о. Сызрань. Ткацкий станок. О.ф. КП д86/3565.

22. МУ Краеведческий музей г.о. Сызрань. Бёрда, КП: д166/5728; д226/5676; д327/1.

23. Давыдова С.А. Кустарная промышленность Саратовской, Пензенской и Московской губерний. Исследования 1888 г. // Отчеты и исследования по кустарной промышленности в России. Том 1. СПб.: Тип. В. Киршбаума, 1892. С. 48.

24. МУ Краеведческий музей г.о. Сызрань. Ложки деревянные, цветная роспись. Н.в.ф. 2027; Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. Ложки деревянные, цветная роспись. 1) НВСП-8074; 2) КП-19002/11, Вб-849/1; 3) НВСП-9971.

25. Лебедева А.А. Транспорт, переноска и перевозка тяжестей // Этнография восточных славян. Очерки традиционной культуры. М.: Наука, 1987. С. 331.

26. Воронов В.С. О крестьянском искусстве. М.: Советский художник, 1972. 351 с.

27. Самарский областной историко-краеведческий музей им. П.В. Алабина. О.ф. Формы для пряников: КП 615; КП 616; КП 617; КП 618.

28. Рыбаков Б.А. Русское прикладное искусство X-XIII в. Л.: Аврора, 1971. С. 8.

29. Бежкович А.С. Хозяйство и быт русских крестьян / А.С. Бежкович, С.К. Жегалова, А.А. Лебедева, С.К. Просвиркина // Памятники материальной культуры. М.: Советская Россия, 1959. С. 85.

30. Макашина Т.С. Ильин день и Илья-пророк в народных представлениях и фольклоре восточных славян // Обряды и обрядовый фольклор. М.: Наука, 1982. С. 83-101.

31. Рыбаков Б.А. Язычество древних славян. М.: София, Гелиос, 2002. С. 234.

32. Ведерникова Т.И. Этнография и праздничная культура народов Самарского края. Самара: Самарский научно-методический центр народного творчества, 1991. 90 с.

**Краснощеков Владимир Александрович** – аспирант кафедры «Философия и культурология» Поволжского государственного университета сервиса, г. Тольятти

**Krasnoshchekov Vladimir Aleksandrovich** – Post-graduate Student of the Department «Philosophy and Cultural science», Volga region State University of Service (Toglyatti)

*Статья поступила в редакцию 02.02.2011, принята к опубликованию 10.08.2011*

## ЭКОЛОГИЯ

УДК: 541.183+543.54

**Т.Г. Крупнова, А.М. Кострюкова, О.В. Ракова, Е.А. Григорьева**

### **ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ МЕДИ (2+) И НИКЕЛЯ (2+)**

*В настоящей работе определены механическая прочность и химическая стойкость глауконита и гранулированного материала ФГМ-7 (каолина), модифицированных пленкой из оксигидрата марганца. Изучена сорбция ионов меди (2+) и никеля (2+) в динамических условиях из индивидуальных растворов и при совместном присутствии. Показана возможность использования модифицированных алюмосиликатов в качестве загрузки в фильтрах доочистки сточных вод.*

Глауконит, каолин, алюмосиликатные сорбенты, доочистка сточных вод

**T.G. Krupnova, A.M. Kostryukova, O.V. Rakova, E.A. Grigorieva**

### **USING ALUMINOSILICATE SORBENTS FOR TERTIARY WASTEWATERS TREATMENT FROM ION COPPER (2+) AND NICKEL (2+)**

*In the present work a mechanical strength and reactivity of glauconite and granulated material FGM-7 (the kaolin) modified by manganese oxyhydrate covering have been determined. Sorption of ions of copper (2+) and nickel (2+) in dynamic condition from individual solutions and co-presence has been investigated. The opportunity of using modified aluminosilicates as a load in filters for the additional purifying of wastewaters treatment has been shown.*

Glauconite, kaolin, aluminosilicate sorbents, the additional purifying of wastewaters treatment

**Введение.** Традиционно, с конца шестидесятих годов прошлого столетия, для очистки сточных вод гальванических цехов применяли реагентный метод. В настоящее время, в связи с изменениями природоохранного законодательства [1, 2] и введением жестких нормативов допустимых сбросов в водные объекты, в частности, рыбохозяйственного значения [3, 4], реагентные методы не обеспечивают требуемое качество сточных вод. В сложившейся ситуации, в связи с экономическими трудностями, многие предприятия не имеют возможности полностью реконструировать уже имеющиеся очистные сооружения и перейти на новые, более эффективные технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов [5]. Для решения данной проблемы можно использовать доочистку сточных вод.

Под доочисткой подразумеваются методы и процессы, дополняющие традиционные технологические схемы очистки вод. Наиболее простым и эффективным методом доочистки воды является использование сорбционных технологий. Природные сорбенты обладают рядом преимуществ перед промышленными сорбционными материалами. К их достоинствам

можно отнести невысокую стоимость, радиационную устойчивость и экологическую безопасность [6, 7, 8].

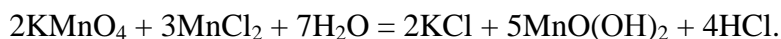
Как показано ранее [9], глауконит Багарякского месторождения является перспективным сорбционным материалом. Гранулированный материал на основе каолина – ФГМ-7, выпускаемый на Кыштымском каолино-керамическом комбинате «КСАНТА», является ионообменником, который можно использовать в качестве фильтрующей загрузки для очистки природных и сточных вод [10]. Данные сорбенты в естественном виде пригодны для использования в сорбционных технологиях, но при специфической модификации они приобретают ряд уникальных свойств, которые не только увеличивают их сорбционные характеристики, но и повышают механическую прочность [11, 12].

В предыдущих работах [10, 12] была показана возможность использования модифицированного каолина и природного глауконита для доочистки водопроводной воды от ионов жесткости, для снижения окисляемости и удаления ионов железа.

В данной работе показана расширенная возможность применения модифицированных алюмосиликатов, в частности для доочистки сточных вод цехов гальванических покрытий. Изучена возможность использования глауконита и каолина в качестве загрузки в фильтрах доочистки сточных вод от ионов меди (2+) и никеля (2+).

**Экспериментальная часть.** Модифицирование сорбентов проводили по разработанной в предыдущих работах методике [10, 12], которая состоит в следующем. Навеску глауконитового концентрата (90 %) выдерживали в 1 %-ном растворе соляной кислоты в течение суток для удаления глинистых включений. Затем промывали глауконит дистиллированной водой до нейтральной среды, для унификации сорбционных процессов перевели ионит в Na-форму, пропуская через колонку глауконита раствор хлорида натрия (1 Н) до нейтральной реакции, и наносили на поверхность зерен глауконита пленку из оксигидрата марганца (крептомелана)  $MnO(OH)_2 \cdot nH_2O$ .

Пленку получали восстановлением перманганата калия хлоридом марганца (II):



Для этого в ионообменную колонку диаметром 50 мм загружали взвешенный глауконит, смачивали водой и пропускали 1 %-ный раствор перманганата калия, а затем 15 %-ный раствор хлорида марганца (II).

Каолин загружали в реактор объемом 500 см<sup>3</sup>, смачивали водой и добавляли 1 %-ный раствор перманганата калия, а затем 15 %-ный раствор хлорида марганца (II) и выдерживали в течение суток.

Сорбенты, покрытые пленкой представленными выше способами, промывали водой до отрицательной реакции на ион марганца. Для этого использовали методику окисления марганца персульфатом аммония в азотнокислой среде [13].

Для определения механической прочности и химической стойкости материалов использовали стандартные методики [8].

При исследовании динамики сорбции пропускали через колонки с модифицированными сорбентами растворы, содержавшие ионы меди (2+) с начальной концентрацией 5 мг/л и ионы никеля (2+) с концентрацией 1 мг/л, и определяли концентрацию ионов меди (2+) и никеля (2+) на выходе из колонки через каждые 5 л.

Для определения меди использовали спектрофотометрический и экстракционно-фотометрический методы с диэтилдитиокарбаматом натрия и свинца соответственно. Никель определяли спектрофотометрически с диметилглиоксимом [13].

Все исследования проводили в трех параллельных экспериментах. В расчетах доверительный интервал вычисляли для доверительной вероятности 95 %.

**Результаты экспериментов и их обсуждение. Изучение механической прочности и химической стойкости сорбентов.** Были определены технологические параметры и

химическая стойкость модифицированных материалов, изучена возможность их регенерации.

В табл. 1 представлены следующие технологические параметры исследуемых материалов:  $\rho$  – плотность;  $\epsilon_{\min}$ ,  $\epsilon_{\max}$  – минимальная и максимальная пористость;  $\sigma$  – измельчаемость;  $\tau$  – истираемость.

Немодифицированный глауконит по основным показателям (истираемость, измельчаемость) не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сорбционным материалам. Тогда как модифицированный глауконит является механически прочным, его истираемость не превышает 0,5 %, а измельчаемость – 4 % [8]. Каолин, как в исходном, так и в модифицированном виде удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сорбционным материалам, и является механически прочным.

Таблица 1  
Технологические параметры сорбционных материалов

Материал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\epsilon_{\min}$	$\epsilon_{\max}$	$\sigma$ , масс. %	$\tau$ , масс. %
Естественный глауконит	1,80	0,13	0,25	31,00	69,00
Модифицированный глауконит	2,20	0,33	0,40	4,00	0,35
Немодифицированный каолин	1,30	0,34	0,44	3,50	1,50
Модифицированный каолин	2,15	0,61	0,67	2,80	0,08

Определение химической стойкости исследуемых материалов проводилось по ряду параметров (плотный остаток, окисляемость, концентрация кремневой кислоты и окислов трехвалентного железа), результаты представлены в табл. 2 для глауконита и табл. 3 для каолина.

Таблица 2  
Химическая стойкость глауконита

Название параметра	Экспериментальные данные							
	для естественного глауконита				для модифицированного глауконита			
	NaCl	NaOH	HCl	H <sub>2</sub> O	NaCl	NaOH	HCl	H <sub>2</sub> O
	Исходные растворы							
Окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	0,60	0,32	0,26	3,90	0,60	0,32	0,26	3,90
Концентрация кремневой кислоты, мг/л	0	0	0	0,03	0	0	0	0,03
Концентрация Fe <sub>общ</sub> , мг/л	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05
Отфильтрованные растворы								
Сухой остаток, мг/л	0,67	0,16	0,73	0,14	1,82	0,23	1,08	0,19
Окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	6,08	8,00	6,08	8,00	4,48	4,96	4,48	6,08
Концентрация кремневой кислоты, мг/л	4,20	8,10	4,00	2,70	9,50	21,20	9,90	10,00
Концентрация Fe <sub>общ</sub> , мг/л	0,5	2,17	0,10	0,45	0,95	11,10	1,55	0,45

Отметим, что удовлетворительным по химической стойкости сорбционным материалом является материал, дающий в результате испытаний в различных средах прирост сухого остатка не выше 20 мг/л, окисляемости – не выше 10 мгО<sub>2</sub>/л, кремневой кислоты – 10 мг/л [8].

Как видно из табл. 2, в нейтральной среде прирост показателей для модифицированного глауконита остается в пределах допустимых значений, а в щелочной

среде происходит растворение силикатов. Поэтому данный сорбент, как и большинство алюмосиликатов, не подлежит использованию в щелочных средах. После обработки кислотой химическая стойкость модифицированного глауконита несколько ухудшается из-за разрушения поверхности зерен минерала. Данное явление хорошо известно и лежит в основе модифицирования глауконита кислотной обработкой с целью предания ему более высоких сорбционных характеристик [9].

После модифицирования каолина химическая стойкость сорбента улучшилась (табл. 3), лишь в щелочной среде происходит его разрушение за счет растворения оксида кремния, поэтому материал, также как и глауконит, не рекомендуется использовать в щелочных средах.

Таблица 3

## Химическая стойкость каолина

Название параметра	Экспериментальные данные							
	для немодифицированного каолина				для модифицированного каолина			
	NaCl	NaOH	HCl	H <sub>2</sub> O	NaCl	NaOH	HCl	H <sub>2</sub> O
	Исходные растворы							
Окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	0,60	0,32	0,26	3,90	0,60	0,32	0,26	3,90
Концентрация кремневой кислоты, мг/л	0	0	0	0,03	0	0	0	0,03
Концентрация Fe <sub>общ</sub> , мг/л	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05
Отфильтрованные растворы								
Плотный остаток, мг/л	0,61	7,21	1,84	0,31	1,01	0,37	0,84	0,26
Окисляемость, мгО <sub>2</sub> /л	4,61	5,14	4,24	4,41	2,88	4,32	2,48	7,44
Концентрация кремневой кислоты, мг/л	7,20	16,40	6,50	10,50	7,00	14,5	8,20	4,5
Концентрация Fe <sub>общ</sub> , мг/л	0,20	1,10	0,70	1,90	0,5	1,2	0,2	0,1

Таким образом, установлено, что модификация оксигидратом марганца глауконита и каолина приводит к увеличению химической стойкости сорбентов. Полученные параметры позволяют использовать каолина и глауконита, модифицированных пленкой из оксигидратов марганца, в качестве фильтрующих загрузок.

**Анализ традиционной технологической очистки сточных вод гальванического цеха.** При проведении исследований была проанализирована технология очистки сточных вод цеха гальванических покрытий одного из предприятий г. Челябинска при использовании реагентной схемы, согласно которой производят разделение стоков на щелочные и кислые хромсодержащие. Хромсодержащие стоки обрабатывают бисульфитом натрия, при этом происходит восстановление бихромат-ионов до ионов Cr<sup>3+</sup>, а далее добавляют щелочной реагент – соду и производят осаждение ионов хрома в виде карбоната и гидроксида хрома. Щелочные стоки обрабатывают содой, при этом образуется шлам, представляющий собой, главным образом, основные карбонаты цветных и тяжелых металлов. Шлам отделяют от очищаемых вод отстаиванием. Были выявлены основные причины, обуславливающие неполноту осаждения ионов цветных и тяжелых металлов. Одна из причин – это непостоянство состава сточных вод из-за залповых сбросов. Другая – при обработке объединенных стоков для осаждения различных ионов металлов в виде гидроксидов требуются разные значения pH, а, следовательно, разные дозы щелочного реагента.

В табл. 4 приведена остаточная концентрация металлов в очищенной воде, если начальное содержание ионов металлов составляет 50–100 мг/л. Как видно из этой таблицы, все металлы осаждаются при различных значениях pH.

Кроме того, существуют кинетические трудности, заключающиеся в том, что часто для полного протекания химической реакции, а затем осаждения металлов требуется гораздо большее время, чем может обеспечить существующая установка по очистке воды.

Таблица 4

## рН осаждения гидроксидов металлов

Гидроксид	рН максимального выделения	Остаточная концентрация мг/л	Произведение растворимости
Ni(OH) <sub>2</sub>	9,3–10,0	0,25–0,75	$2,0 \cdot 10^{-15}$
Cu(OH) <sub>2</sub>	8,0–9,5	0,10–0,15	$2,2 \cdot 10^{-13}$
Cr(OH) <sub>3</sub>	8,8	0,03	$6,3 \cdot 10^{-21}$
Fe(OH) <sub>2</sub>	8,0–9,5	0,30–1,00	$5,1 \cdot 10^{-10}$
Zn(OH) <sub>2</sub>	8,0–10,5	0,05	$1,8 \cdot 10^{-13}$

Таким образом, традиционная схема очистки воды по ряду объективных причин не позволяет очищать воду до установленных допустимых концентраций. Максимальная концентрация меди после реагентных способов очистки составляет 5,0–5,5 мг/л, тогда как допустимая концентрация для сброса в водоем рыбохозяйственного значения (р. Миасс) – 0,003 мг/л. Максимальная концентрация ионов никеля после реагентной очистки составляет 0,9–1,0 мг/л при допустимой концентрации 0,1 мг/л.

**Исследование динамики сорбции ионов меди (2+) и никеля (2+).** На рис. 1а, б представлен график зависимости изменения концентрации меди в фильтрате от объема профильтрованной через глауконит воды. Динамическая обменная емкость по меди до проскока ионов меди (рис. 1б), равного допустимой концентрации (0,003 мг/л) с учетом плотности модифицированного глауконита  $2,2 \text{ г/см}^3$ , составляет  $3,05 \text{ кг/м}^3$  или  $22 \text{ ммоль/кг}$ . Полная обменная емкость при исходной концентрации ионов меди 5 мг/л –  $6,25 \text{ кг/м}^3$  или  $44 \text{ ммоль/кг}$  (рис. 1а).

Динамику сорбции ионов никеля (2+) на глауконите исследовали при исходной концентрации никеля (2+) – 1,0 мг/л (рис. 1в). Динамическая обменная емкость по ионам никеля –  $0,84 \text{ кг/м}^3$  или  $6 \text{ ммоль/кг}$ . Отметим также, что емкость до проскока ионов никеля, равного допустимой концентрации (0,1 мг/л) составляет  $0,94 \text{ кг/м}^3$ . Полная обменная емкость при исходной концентрации ионов никеля 1 мг/л –  $1,26 \text{ кг/м}^3$  или  $10 \text{ ммоль/кг}$ . Таким образом, емкость глауконита по ионам меди в 4,5 раз выше емкости по ионам никеля.

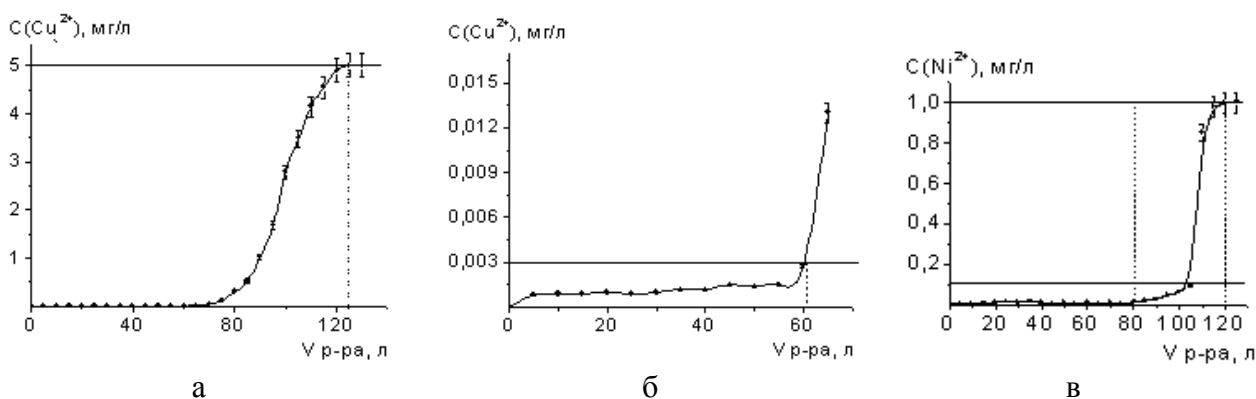


Рис. 1. Зависимость изменения концентрации ионов меди (а и б) и никеля (в) от объема профильтрованного раствора через глауконитовую загрузку:  
 а) при достижении полной обменной емкости;  
 б) при достижении допустимой концентрации ионов меди;  
 в) при достижении полной обменной емкости и допустимой концентрации ионов никеля

Далее была изучена сорбция металлов на модифицированном каолине (рис. 2).

Динамическая обменная емкость по меди до проскока ионов меди равна с учетом плотности модифицированного каолина  $2,15 \text{ г/см}^3 - 1,47 \text{ кг/м}^3$  или  $11 \text{ ммоль/кг}$  (рис. 2б). Полная обменная емкость при исходной концентрации ионов меди  $5 \text{ мг/л}$  составляет  $3,38 \text{ кг/м}^3$  или  $25 \text{ ммоль/кг}$  (рис. 2а).

Динамику сорбции ионов никеля (2+) на каолине исследовали при исходной концентрации никеля (2+) –  $1,0 \text{ мг/л}$  (рис. 2в). Динамическая обменная емкость по ионам никеля равна  $0,59 \text{ кг/м}^3$  или  $4,5 \text{ ммоль/кг}$ . Емкость до проскока ионов никеля –  $0,75 \text{ кг/м}^3$ . Полная обменная емкость при исходной концентрации ионов никеля  $1 \text{ мг/л}$  составляет  $0,84 \text{ кг/м}^3$  или  $7 \text{ ммоль/кг}$ . Таким образом, емкость каолина по ионам меди в 3,6 раз выше емкости по ионам никеля.

Емкость каолина по ионам меди и никеля примерно в 1,5 раза ниже, чем у глауконита.

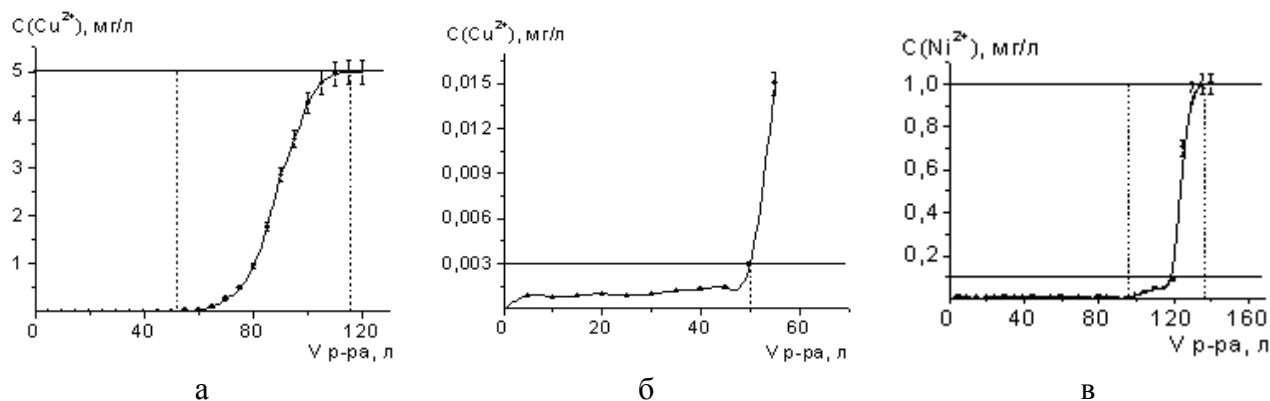


Рис. 2. Зависимость изменения концентрации ионов меди (а и б) и никеля (в) от объема профильтрованного раствора через каолиновую загрузку:  
а) при достижении полной обменной емкости;  
б) при достижении допустимой концентрации ионов меди;  
в) при достижении полной обменной емкости и допустимой концентрации ионов никеля

**Исследование сорбционной активности алюмосиликатов при совместном присутствии ионов меди (2+) и никеля (2+).** Была изучена сорбция ионов меди (2+) и никеля (2+) при их совместном содержании, как это имеет место в реальных сточных водах. Рабочий раствор (1 л), пропускаемый через загрузки глауконита и каолина, содержал  $5 \text{ мг}$  меди и  $1 \text{ мг}$  никеля. По результатам анализа раствора, пропущенного через глауконитовую загрузку, построены графики зависимости изменения концентрации меди и никеля от объема профильтрованной воды (рис. 3 и 4).

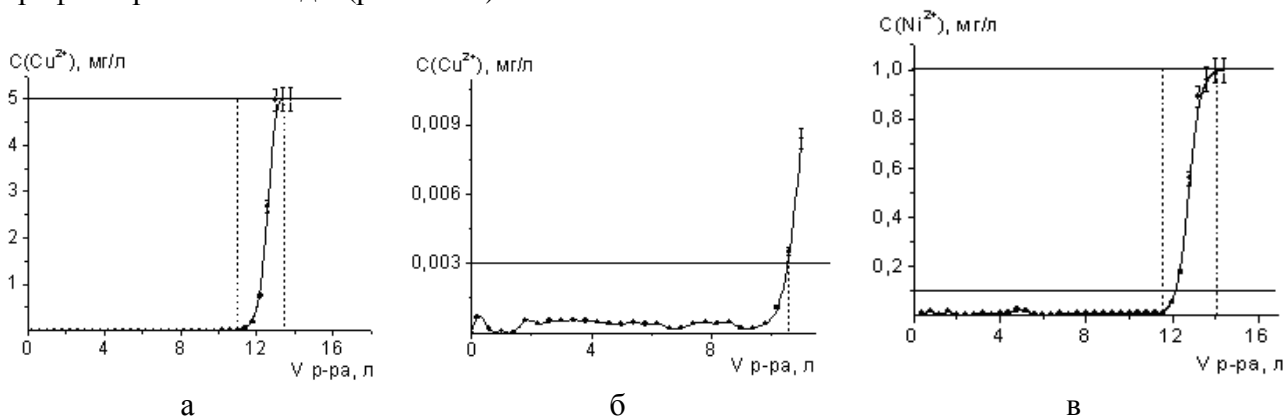


Рис. 3. Зависимость изменения концентрации ионов меди (а и б) и никеля (в) от объема профильтрованного раствора через глауконитовую загрузку:  
а) при достижении полной обменной емкости;  
б) при достижении допустимой концентрации ионов меди;  
в) при достижении полной обменной емкости и допустимой концентрации ионов никеля



В условиях совместного присутствия металлов сорбционная активность исследуемых алюмосиликатов значительно снижается, что видно из табл. 5, 6.

Таблица 5

Полная обменная емкость сорбентов, ммоль/кг

Сорбируемый ион	Каолин		Глауконит	
	индивидуально	совместное присутствие	индивидуально	совместное присутствие
$\text{Cu}^{2+}$	$25,0 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,1$	$44,0 \pm 0,3$	$5,6 \pm 0,1$
$\text{Ni}^{2+}$	$7,0 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$10,0 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$

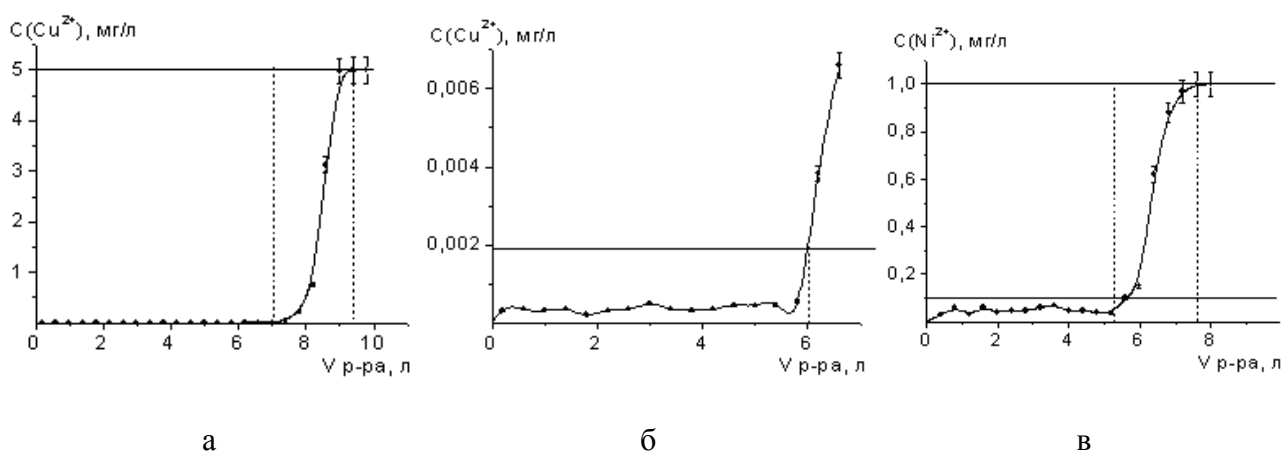


Рис. 4. Зависимость изменения концентрации ионов меди (а и б) и никеля (в) от объема профильтрованного раствора через каолиновую загрузку:  
 а) при достижении полной обменной емкости;  
 б) при достижении допустимой концентрации ионов меди;  
 в) при достижении полной обменной емкости и допустимой концентрации ионов никеля.

Таблица 6

Динамическая обменная емкость сорбентов, ммоль/кг

Сорбируемый ион	Каолин		Глауконит	
	индивидуально	совместное присутствие	индивидуально	совместное присутствие
$\text{Cu}^{2+}$	$11,0 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	$22,0 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,1$
$\text{Ni}^{2+}$	$4,5 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$	$6,0 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$

**Выводы.** В результате проделанной работы установлено, что модификация оксигидратом марганца способствует улучшению технологических параметров адсорбентов. Рекомендуется использование модифицированных каолина и глауконита в качестве загрузок для фильтров доочистки сточных вод от ионов меди (2+) и никеля (2+).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон № 7-ФЗ от 10 января 2002 г. «Об охране окружающей среды».
2. «Водный кодекс Российской Федерации» № 74-ФЗ от 03 июня 2006 г.
3. Приказ Федерального агентства по рыболовству № 20 от 18 января 2010 г. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».
4. Приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации № 333 от 17 декабря 2007 г. «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользования».
5. Запольский А.А., Образцов В.В. Комплексная переработка сточных вод гальванического производства. Киев: Тэхника, 1989. 199 с.
6. Казанцев Е.А., Ремез В.П. Сорбционные материалы на носителях в технологии обработки воды // Химия и технология воды. 1995. Т. 17. № 1. С. 50-60.
7. Тарасевич Ю.С. Применение природных дисперсных материалов в процессах предметранной очистки воды // Химия и технология воды. 1991. № 7. С. 632-671.
8. Аюкаев Р.И., Мельцер В.З. Производство и применение фильтрующих материалов для очистки воды. Л.: Стройиздат, 1985. 89 с.
9. Сухарев Ю.И., Кувыкина Е.А. Использование глауконита Уральского месторождения в процессах очистки воды от железа (II, III) // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. 2002. Вып. 1. С. 62-66.
10. Сухарев Ю.И., Крупнова Т.Г., Титова Е.Н. и др. Алюмосиликатные сорбционные материалы для бытовых фильтров доочистки питьевой воды // Доклады международной научно-практической конференции «Города России, проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии». Пенза: РИО ПГСХА, 2005. С. 78-81.
11. Степанов А.Н. и др. Химически модифицированные гранулированные сорбенты на основе природного глауконита для обезжелезивания воды // Сборник научных трудов Первой всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность – ТПБ-2011». 2011. С.57-59.
12. Сухарев Ю.И., Крупнова Т.Г., Антонова. Модифицированные алюмосиликатные материалы для бытовых фильтров доочистки питьевой воды // Вестник УГТУ–УПИ. Строительство и образование. 2005. Вып. 14. С. 356-357.
13. Лурье Ю.Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.
14. Тарасевич Ю.И., Марцин И.И. Влияние кислотной обработки на строение и адсорбционные свойства глауконита // Украинский химический журнал. 1982. Т. 48. № 5. С. 468-471.

**Крупнова Татьяна Георгиевна** – кандидат химических наук, доцент кафедры «Экология и природопользование» Южно-Уральского государственного университета

**Кострюкова Анастасия Михайловна** – кандидат химических наук, доцент кафедры «Экология и природопользование» Южно-Уральского государственного университета

**Krupnova Tatyana Georgievna** – Candidate of Sciences in Chemistry, Assistant Professor of the Department “Ecology and Nature Management”, South Ural State University

**Kostryukova Anastasia Mihailovna** – Candidate of Sciences in Chemistry, Assistant Professor of the Department “Ecology and Nature Management”, South Ural State University

**Ракова Ольга Викторовна** –  
кандидат химических наук, доцент кафедры  
«Неорганическая химия» Южно-Уральского  
государственного университета

**Rakova Olga Victorovna** –  
Candidate of Sciences in Chemistry,  
Assistant Professor of the Department  
“Inorganic Chemistry”, South Ural State  
University

**Григорьева Екатерина Алексеевна** –  
кандидат химических наук, доцент кафедры  
«Неорганическая химия» Южно-Уральского  
государственного университета

**Grigorieva Ecatherine Alexeevna** –  
Candidate of Sciences in Chemistry,  
Assistant Professor of the Department  
“Inorganic Chemistry”, South Ural State  
University

*Статья поступила в редакцию 08.02.2011 , принята к опубликованию 15.07.2011*

УДК 336.025: 330.322

**А.Н. Айриева**

## **РАЗВИТИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ БЮДЖЕТНЫХ ИНВЕСТИЦИЙ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ**

*Рассматриваются вопросы, связанные с поиском возможных направлений повышения эффективности процесса планирования и распределения бюджетных инвестиций на региональном уровне.*

Инвестиции, инвестиционная деятельность, финансы, государственное финансовое стимулирование инвестиционной деятельности, бюджетные инвестиции, планирование бюджетных инвестиций

**A.N. Ayrieva**

## **DEVELOPMENT PLANNING BUDGET INVESTMENTS AT THE REGIONAL LEVEL**

*This article discusses issues related to the search for possible ways of increasing the efficiency of the planning and allocation of budgetary investments at the regional level.*

Investments, investment, finance, government financial policy on economic, budgetary investment planning, budgetary investment

В экономической и нормативно-правовой литературе недостаточно четко дано определение бюджетных инвестиций, что не позволяет правильно определить задачи и принципы бюджетного инвестирования. Так, Лавров А.М. определяет бюджетные инвестиции как создание или увеличение за счет средств бюджета стоимости основных средств и иного имущества, находящихся в государственной собственности [2, С. 88], бюджетные инвестиции в объект государственной (муниципальной) собственности — как бюджетные расходы в форме капитальных вложений в основные средства государственных (муниципальных) учреждений или государственных (муниципальных) предприятий.

В новой редакции Бюджетного кодекса Российской Федерации, действующего с 1 января 2009 года, в статье 79 определяются бюджетные инвестиции в объекты государственной (муниципальной) собственности как бюджетные расходы в форме капитальных вложений в основные средства государственных (муниципальных) учреждений.

Содержательно речь идет о вложениях в строительство и модернизацию объектов государственной собственности, приобретении машин и оборудования всех видов и программного обеспечения.

Отметим, что в данное определение не входят затраты на капитальный ремонт, формирующие капитальные расходы в соответствии с действующей редакцией Бюджетного кодекса Российской Федерации. Очевидно, что в состав бюджетных инвестиций в основные средства не попадет большая часть затрат на государственную поддержку коммерческих инвестиций [2, С. 98-99].

Данная редакция бюджетных инвестиций исключает часть реальных инвестиций, а именно, капитальный ремонт и инновационные инвестиции (вложения денежных средств в

нематериальные активы), а также исключаются все финансовые инвестиции (вложения денежных средств в финансовые активы). Автор считает это существенным недостатком, как так бюджеты всех уровней должны получать инвестиционные доходы в виде неналоговых поступлений от участия в капитальном ремонте, инвестирования инноваций (в рамках частно-государственного партнерства в системе венчурных фондов), финансового инвестирования (в рамках операций с государственными, региональными и муниципальными ценными бумагами в порядке заимствования, а также от управления портфелями акций, принадлежащих государству).

Автором предлагается следующее определение бюджетных инвестиций. Бюджетные инвестиции - вложение всех видов имущественных и интеллектуальных ценностей за счет средств бюджетов всех уровней в объекты предпринимательской и других видов деятельности для создания или увеличения стоимости имущества (реальных и финансовых активов), получения инвестиционных доходов в виде неналоговых поступлений от участия в реальном и финансовом инвестировании.

Основная цель бюджетных инвестиций заключается в поддержании в надлежащем состоянии и расширении социальной инфраструктуры для максимально полного удовлетворения спроса на общественные блага в условиях ограниченных бюджетных ресурсов. Иными словами, объем общественных инвестиций определяется размером социальных обязательств государственного сектора экономики.

Следует отметить, что долгосрочные рискованные и капиталоемкие инвестиции требуют обязательного участия в них государства как инвестора. При этом бюджетные инвестиции выделяются для привлечения частных инвестиций в режиме софинансирования и соинвестирования.

Решение проблем повышения эффективности инвестиционной деятельности субъектов рынка будет зависеть и от региональных бюджетов как источника финансирования. В случае напряженности региональной экономики бюджетные инвестиции могут быть профинансированы за счет бюджетных субсидий или субвенций, а предоставление их реципиентам возможно осуществить в форме бюджетного кредита или на условиях безвозмездной финансовой помощи.

Современные принципы организации бюджетного процесса требуют единства управления расходами без разделения их на капитальные и на текущие расходы. Это не означает отсутствия необходимости выделения капитальных расходов в отчетности, а только принцип единства управления бюджетными ресурсами.

Процесс принятия решений и бюджетирования по капитальным и текущим расходам должен проводиться комплексно. Инвестиционные предложения должны оцениваться с точки зрения суммарного объема капитальных расходов и связанных текущих расходов.

В большинстве стран Центральной и Восточной Европы планирование текущих и капитальных расходов происходит отдельно, тогда как в странах Европейского союза капитальные и текущие расходы планируются в Министерстве финансов.

В странах Европейского союза каждое подразделение Министерства финансов, отвечающее за одного распорядителя бюджета, отвечает как за текущие, так и за капитальные расходы, поскольку только при таком подходе можно получить комплексный взгляд на каждое направление расходов в целом, включая наилучшее соотношение между капитальными и текущими расходами.

Причиной отказа от раздельного планирования является политическая угроза избыточных инвестиций, поскольку инвестиционные расходы могут казаться по своей природе полезными и приносящими отдачу, особенно если их рассматривать в отрыве от связанных текущих расходов.

Раздельное планирование также удваивает административную работу, поскольку усугубляет проблемы коммуникаций и политические трения между министерствами и министрами.

Раздельное планирование препятствует развитию среднесрочного планирования внутри распорядителей бюджета. Поскольку и текущие, и инвестиционные расходы бюджета направлены на достижение одних и тех же целей, раздельное планирование, помимо двойной работы сотрудников различных административных структур, приводит к потере эффективности управления расходами в целом, поскольку при рассмотрении возможных вариантов решения какой-либо задачи в качестве альтернативы инвестиционной программы не рассматриваются программы, в которых отсутствует инвестиционный компонент. Таким образом, раздельное планирование текущих и капитальных расходов приводит к неполному анализу и ограниченному выбору способов решения задачи из всех возможных вариантов.

Кроме того, в случае формирования и принятия двойного бюджета высок риск снижения контроля за общей величиной бюджетных расходов и выхода процесса лоббирования за пределы экономической целесообразности. Это может проявиться в распределении инвестиционных расходов бюджета вне логики достижения целей социально-экономического развития территории.

При этом одни функции органов публичной власти оказываются сверхобеспеченными финансовыми средствами, другие — недофинансированными. Поскольку процесс принятия решений о распределении инвестиционных ресурсов не в полной мере увязан с логикой достижения целей социально-экономического развития, то структура бюджетных инвестиций может быть подвержена сильным ежегодным колебаниям, затрудняя планирование и исполнение бюджетов в рамках среднесрочной перспективы. А так как большинство крупных инвестиционных проектов имеют многолетнюю фазу строительства, это приводит к финансовой неустойчивости инвестиционных программ и, как следствие, к потере их эффективности.

Двойное бюджетирование, по-видимому, является важнейшим виновником неудачных попыток интеграции планирования, стратегии и бюджетирования и неудовлетворительных результатов бюджетной политики, поскольку представление о двойном бюджетировании базируется на ложной предпосылке о том, что государственные инвестиции более продуктивны, чем текущие расходы.

Разделение бюджета развития и бюджета текущих расходов зачастую приводит к тому, что бюджет развития имеет более мягкие ограничения на увеличение расходов. В результате все распорядители бюджетных средств стараются представить свои расходы как инвестиционные так, чтобы они могли быть включены в бюджет развития. При этом расходы текущего бюджета не связываются с приоритетами государственной политики.

Принцип устойчивого финансирования означает, что общий объем капитальных вложений региона или муниципального образования должен удерживаться в границах долговой емкости их бюджетов, что обеспечивает стабильность их финансирования и реализацию инвестиционных проектов в установленные сроки. Наиболее точно и полно данный принцип нашел выражение в «Кодексе рационального финансирования капитальных расходов органами местного самоуправления» (далее — Кодекс), опубликованном в Великобритании в 2003 г. (The Prudential Code for Capital finance in Local Authorities. CIPFA, 2003) [3, С. 52-53].

Следует предположить, что основой экономической безопасности является такое состояние управления долгом и такой объем долга, который позволяет исполнять и долговые обязательства, и все иные принятые на себя бюджетные обязательства фактически вне зависимости от внешних обстоятельств.

Один из подходов к реализации такого принципа строится на том, что планирование вновь привлекаемых обязательств, а также планирование, обслуживание и погашение уже имеющихся обязательств, осуществляется исключительно за счет доходов бюджета с учетом источников финансирования дефицита и без необходимости привлечения финансовых ресурсов с рынков заимствования (исключая заимствования по финансированию дефицита бюджета). Технической реализацией этого принципа служит введение концепции долговой

емкости процедуры планирования и принятия решений, а также включение в принятие решений обязательств по просроченной кредиторской задолженности.

Несмотря на то, что определение долга в Бюджетном кодексе не включает эти обязательства, автором предлагается при принятии решений и в управленческом учете управления долгом расширить объекты, которые фактически являются объектами управления долгом. Для этого необходимо ввести понятие прямых и условных обязательств. В таком случае кредиторская задолженность включается в долговые обязательства на уровне прямых обязательств. А с другой стороны, такой вид условных обязательств, как гарантии, выводятся в разряд условных обязательств.

Необходимо также при планировании инвестиций учитывать полную стоимость инвестиционного проекта. Некорректный расчет стоимости проекта ведет к возникновению финансовых разрывов, что противоречит принципу благоразумного финансирования.

В Кодексе сформулированы следующие шесть основных условий, обеспечивающих реализацию данного принципа муниципальными органами власти:

- планы капитальных расходов должны соответствовать финансовым возможностям на протяжении всего периода реализации этих планов и последующего влияния этих инвестиций на бюджет;

- все заимствования и иные долгосрочные обязательства, необходимые для реализации планов капитальных расходов, должны осуществляться в рамках благоразумной и устойчивой долговой политики;

- инвестиционные планы формируются на основе анализа соотношения цены и качества, оценки эффективности и результативности капитальных расходов (в том числе оценки последствий отказа от решения задачи, осуществления процедур сравнения задач по определенным критериям, отбора проектов);

- инвестиционное планирование осуществляется в рамках общего планирования динамики и структуры активов;

- инвестиционные планы должны быть увязаны со стратегическими целями, выраженными в долгосрочных программах администрации;

- инвестиционные планы должны быть реалистичными [3, С. 55-57].

Кодекс перечисляет ряд важнейших вопросов (не исчерпывающих деятельность местной администрации), которые должны решаться в рамках реализации данного принципа: оценка ресурсов для финансирования капиталовложений, которые находятся в распоряжении администрации на данный момент (собственные текущие доходы, межбюджетные дотации, доходы от продажи активов); оценка последствий для бюджета планов капитальных вложений (возможна любая комбинация увеличения, сокращения расходов и доходов); оценка процентных выплат по долгу непроцентного дохода от финансовых инвестиций; оценка всей совокупности бюджетных обязательств, связанных с капиталовложениями, включая, в частности, обязательства по проектам частной финансовой инициативы, частно-государственного партнерства, лизинга, уровня резервов; оценка планируемых изменений в объемах доходов и расходов в связи с ростом или экономией средств; оценка возможности реализации иных будущих приоритетов бюджетной политики в условиях выполнения намеченных инвестиционных планов; оценка возможного покрытия финансовых затрат за счет межбюджетных трансфертов и иных грантов [3, С. 62-64].

Оценки должны осуществляться в рамках анализа рисков и стратегии управления рисками.

Кодекс устанавливает следующие индикаторы (критерии) соответствия планов капитальных вложений собственным финансовым возможностям (долговой емкости бюджета), которые должны отслеживаться местными органами власти [3, С. 75-77]:

*На предстоящие три года:* соотношение годового объема финансовых затрат (на обслуживание долга) к чистому бюджетному доходу; потребность в увеличении местного налога в связи с реализацией планов капиталовложений; потребность в увеличении арендной платы за жилье в связи с реализацией планов капиталовложений в жилищной сфере (если

ведется отдельный счет доходов жилищного хозяйства); оценка объема капитальных расходов; оценка потребности в финансовых средствах для инвестиционных целей (потребность в привлечении заемных средств для финансирования капиталовложений), установленный нормативно-правовыми актами (предел величины долга), операционная граница величины долга для целей управления долгом.

*После окончания года:* фактическое соотношение годового объема финансовых затрат (на обслуживание долга) к чистому бюджетному доходу; фактический объем капитальных расходов; фактическая потребность в финансовых средствах для инвестиционных целей (потребность в привлечении заемных средств для финансирования капиталовложений); фактическая величина долга.

Согласно Кодексу, установленные предельные величины долга и еще более жесткие операционные границы его роста должны соответствовать инвестиционным планам администрации и потребностям в финансировании, а также учетной политике и практике казначейского управления финансами.

Использование единой методологии и единого механизма бюджетного регулирования как во взаимоотношениях между Российской Федерацией и ее субъектами, так и во взаимоотношениях между субъектами РФ и муниципальными образованиями, не нарушает принципа самостоятельности бюджетов, а лишь способствует укреплению межбюджетных отношений на основе провозглашенных в Федеральном законе «О финансовых основах местного самоуправления в Российской Федерации» принципов [3, С. 81-82].

В Законе устанавливается и ряд других новых норм. В частности, право представительных органов местного самоуправления за счет собственных средств местного бюджета создавать муниципальную налоговую службу для сбора местных налогов, а также создавать муниципальные казначейства в целях управления местной казной и исполнения местного бюджета. Это право гарантировано ч.1 ст. 132 Конституции и нормами Закона о принципах организации местного самоуправления.

Наряду с этим органы местного самоуправления вправе заключать соглашения с Федеральным казначейством об обслуживании исполнения местных бюджетов. Данная норма не противоречит гражданскому законодательству (так как на основании ч. 1 ст. 124 Гражданского кодекса муниципальные образования выступают в отношениях, регулируемых гражданским законодательством, на равных началах с гражданами и юридическими лицами) [3, С. 99-101].

В Федеральном законе «О финансовых основах местного самоуправления в Российской Федерации» (гл. III) регламентируются правовые основы и некоторые основные нормы взаимоотношений органов местного самоуправления с финансово-кредитными организациями. Эта регламентация сознательно не детализирована; она и вводит лишь ряд ограничений на взаимоотношения с названными организациями, с тем, чтобы органы местного самоуправления не могли произвольно тратить бюджетные средства и заниматься предпринимательской деятельностью. В частности, органы местного самоуправления не вправе передавать средства местного бюджета и земельные участки, находящиеся в муниципальной собственности, в уставные фонды банков и других кредитных организаций.

Ограничен и выпуск эмиссионных ценных бумаг одним из их видов — муниципальными облигациями, которые выпускаются исключительно в целях реализации программ и проектов развития муниципального образования [1, С. 53-55].

Фонды регионального и муниципального развития представляют собой относительно новое и в настоящее время не окончательно сформулированное направление оказания финансовой помощи из федерального бюджета и бюджетов субъектов Российской Федерации региональным и местным властям соответственно.

Согласно Программе развития бюджетного федерализма в Российской Федерации на период до 2005 г., в фонде регионального развития должны быть объединены федеральные средства, направляемые субъектам федерации на поддержку инвестиций в региональную инфраструктуру. Общими принципами распределения средств фонда должны быть: целевая



поддержка капитальных вложений в общественную инфраструктуру в форме субсидий; софинансирование капитальных вложений из бюджетов субъектов Российской Федерации; соблюдение субъектами Российской Федерации требований федерального законодательства к организации инвестиционного процесса [3, С. 116-118].

Федеральный закон «О внесении изменений и дополнений в федеральный закон "Об общих принципах организации законодательных (представительных) и исполнительных органов государственной власти субъектов Российской Федерации" (4 июля 2003 г., № 95-ФЗ) (ст. 26.19), а также проект поправок в Бюджетный кодекс Российской Федерации, в части регулирования вопросов применения федерального фонда регионального развития, установили следующие особенности применения этого федерального фонда: средства фонда предоставляются в форме субсидий и используются для долевого финансирования инвестиционных программ и проектов; объектом финансирования является общественная инфраструктура регионального значения; средства фонда могут быть источниками формирования фондов муниципального развития; фонд регионального развития формируется в составе федерального бюджета, и распределение субсидий из этого фонда между субъектами Российской Федерации утверждается федеральным законом о федеральном бюджете на соответствующий год [3, С. 121-122].

В Федеральном законе «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» от 6 октября 2003 г. № 131-ФЗ (ст. 62) в основном повторяются положения о федеральном фонде регионального развития применительно к региональному фонду муниципального развития. Они включают следующие основные моменты: региональный фонд муниципального развития формируется и утверждается ежегодно в составе бюджета субъекта Российской Федерации; помощь муниципальным образованиям предоставляется в форме субсидий для долевого финансирования инвестиционных программ и проектов; средства поддержки направляются на инвестирование объектов муниципальной общественной инфраструктуры; органы власти разрабатывают порядок отбора муниципальных образований и инвестиционных программ и проектов, которым предоставляются указанные субсидии, и утверждают этот порядок законами субъектов Российской Федерации в соответствии с требованиями Бюджетного кодекса Российской Федерации; распределение субсидий из фонда муниципального развития между муниципальными образованиями утверждается законом субъекта Российской Федерации о бюджете субъекта Российской Федерации на очередной финансовый год [3, С. 123-124].

Таким образом, федеральное законодательство регулирует только общие вопросы формирования и использования средств фондов развития и фактически не дает ответов на вопросы, касающиеся методики и порядка распределения средств фондов развития, финансового планирования и финансирования, мониторинга и контроля использования средств этих фондов.

Предполагается, что средства фонда регионального развития должны распределяться между субъектами федерации на основании единой методики, предполагающей конкурсное распределение средств в соответствии с заявками регионов на получение софинансирования из федерального бюджета на осуществление инвестиционных проектов.

Однако на практике Фонд регионального развития на протяжении последних лет формируется в результате механического объединения нескольких программ развития регионов.

Например, в законе о федеральном бюджете на 2003 г., средства, предусмотренные для финансирования из Фонда регионального развития (общим объемом 24,4 млрд. руб.), главным образом, направляются на финансирование двух федеральных целевых программ, реализация которых носит скорее политический характер: целевая программа «Социально-экономического развития Республики Татарстан до 2006 г.» (11,3 млрд. руб.) и целевая программа «Социально-экономического развития Республики Башкортостан до 2006 г.» (7,4 млрд. руб.) [3, С. 131-132].

В рамках программы «Сокращение различий в социально-экономическом развитии регионов Российской Федерации» было выделено всего 2,5 млрд. руб. Только в рамках этой программы используются единые подходы к распределению средств фонда, но методика носит недостаточно прозрачный характер и нуждается в значительном совершенствовании [2, С. 49-50].

Как показывает практика межбюджетных отношений последних лет, опыт оказания федеральной бюджетной помощи регионам находит успешное применение в построении межбюджетных отношений внутри субъектов федерации. Поэтому предложения Минэкономразвития России по методике распределения финансовых средств из фонда регионального развития, одобренные на заседании Правительства Российской Федерации весной 2003 г., заслуживают пристального внимания на предмет возможного заимствования для разработки механизма использования аналогичного фонда на субфедеральном уровне.

Суть этих предложений сводится к следующим моментам. В соответствии с федеральным законодательством фонд предоставляет субсидии для софинансирования инвестиционных проектов по объектам, находящимся в собственности субъектов Российской Федерации либо муниципальных образований. Общим правилом является конкурс и заявительный принцип участия в нем субъектов Российской Федерации. Конкурс носит двухэтапный характер. Первый этап — отбор субъектов федерации, получающих допуск к участию в конкурсе проектов. Второй этап — собственно конкурс проектов.

Успешно прошедшими первый этап признаются субъекты Российской Федерации, показатели которых соответствуют установленным критериям нуждаемости в федеральной финансовой помощи и критериям качества управления региональными финансами. Оценка нуждаемости определяется на основе интегрального показателя уровня развития субъекта федерации.

Интегральный показатель уровня развития субъекта рассчитывается как средняя арифметическая из индикаторов, характеризующих относительное положение субъекта в федерации по следующим базовым показателям социально-экономического развития, качества жизни населения и степени развитости инфраструктуры: валовой региональный продукт на душу населения; объем инвестиций в основной капитал на душу населения; объем внешнеторгового оборота на душу населения; бюджетно-финансовая обеспеченность региона на душу населения; доля среднесписочной численности работников, занятых на малых предприятиях, в общей среднесписочной численности работников, занятых на предприятиях и организациях (в %); уровень зарегистрированной безработицы (в % к экономически активному населению); соотношение среднедушевых денежных доходов и величины прожиточного минимума; доля населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума (в %) в общей численности населения; суммарный оборот розничной торговли, общественного питания и платных услуг в расчете на душу населения; основные фонды отраслей экономики (по остаточной балансовой стоимости в среднегодовом исчислении полной балансовой стоимости, с учетом степени удорожания капитальных затрат) на душу населения (в тыс. рублей); коэффициент плотности автомобильных дорог (коэффициент Энгеля); сводный показатель обеспеченности населения субъекта Российской Федерации объектами социальной инфраструктуры, рассчитываемой на основе четырех первичных индикаторов: а) обеспеченность дошкольными образовательными учреждениями, мест на 1 000 детей дошкольного возраста; б) выпуск специалистов высшими и государственными средними учебными заведениями, чел. на 10 тыс. чел. населения; в) обеспеченность врачами и средним медицинским персоналом, чел. на 10 тыс. чел. населения (в %); г) обеспеченность населения амбулаторно-поликлиническими учреждениями, посещений в смену на 10 тыс. чел. населения; д) сводный показатель обеспеченности населения субъекта Российской Федерации объектами инженерной инфраструктуры (в %) [2, С. 65-66].

Все субъекты федерации распределяются на группы, в зависимости от величины их интегрального показателя развития: группа с уровнем развития выше среднего; группа со

средним уровнем; группа с уровнем ниже среднего; группа с низким уровнем; группа с крайне низким уровнем [2, С. 71-72].

Субъекты Российской Федерации с интегральным показателем развития ниже среднего уровня признаются нуждающимися в федеральной инвестиционной поддержке. Но для окончательного успешного прохождения первого отборочного этапа эти субъекты должны пройти мониторинг кредитоспособности и качества управления бюджетами субъектов и получить минимальную проходную оценку эффективности их инвестиционной политики и качества управления региональными финансами, определяемую по методике Минфина России (утверждена Приказом Минфина России 18 февраля 2003 г., № 41 «О порядке оценки кредитоспособности и качества управления бюджетами субъектов Российской Федерации и муниципальными образованиями») [2, С. 88-89].

Конкурс проектов проводит конкурсная комиссия Минэкономразвития России, в которую включаются представители Минфина России и субъектов Российской Федерации. В ходе конкурса экспертно оцениваются достоинства и недостатки каждого проекта.

Прошедшие первый этап отбора субъекты Российской Федерации допускаются к конкурсу проектов, который проводится в рамках соответствующих групп регионов: группа регионов с уровнем развития ниже среднего; группа с низким уровнем; группа с крайне низким уровнем. При этом в конкурсе участвуют проекты разной отраслевой принадлежности.

Для каждого субъекта Российской Федерации, допущенного к конкурсу проектов, рассчитывается максимально возможный объем получаемой им финансовой помощи. Он определяется, исходя из общего объема средств, предназначенного для субсидирования, умноженного на коэффициент, учитывающий отклонение интегрального показателя развития данного субъекта Российской Федерации от среднероссийского уровня и численность населения. Таким образом, величина субсидии для каждого субъекта федерации пропорциональна численности его населения и пропорциональна отклонению его интегрального показателя уровня развития от среднероссийского.

Набор индикаторов для оценки проекта включает группу показателей, характеризующих сам проект, и группу показателей, описывающих регион-участник конкурса проектов [2, С. 90-91].

Сравнительная значимость каждого показателя устанавливается в виде различий в предельном количестве баллов, которое может получить проект при оценке по тому или иному критерию.

По итогам суммарной балльной оценки проектов всеми экспертами определяется ранжированный ряд поданных на конкурс проектов по каждой группе участников. Проекты, набравшие определенные размеры баллов, считаются прошедшими конкурс. Степень софинансирования этих проектов из федерального бюджета определяется в зависимости от того, в какой группе по уровню развития находится субъект Российской Федерации. Для субъектов с уровнем развития ниже среднего уровня доля софинансирования из федерального бюджета устанавливается не выше 50 %, для субъектов с низким и крайне низким уровнем — 70 % [2, С. 97-98].

Рассмотренные основные подходы к методике распределения финансовых средств федерального фонда регионального развития, разработанные в рамках Минэкономразвития России, несомненно, могут быть полезны субъектам федерации, реализующим задачу формализации собственной инвестиционной поддержки муниципальных образований.

Согласно ст. 63 Федерального закона «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации», региональный фонд компенсаций создается для предоставления органам местного самоуправления субвенций на осуществление переданных им Российской Федерацией и субъектом федерации государственных полномочий [2, С. 102-103].

В соответствии со ст. 19 указанного федерального закона, передаваемыми государственными полномочиями являются полномочия органов местного самоуправления,

установленные федеральными законами и законами субъектов федерации по вопросам, не отнесенным к вопросам местного значения. Из регионального фонда компенсаций должны предоставляться средства, необходимые для реализации муниципальными органами власти переданных им государственных полномочий по вопросам, не отнесенным к вопросам местного значения.

В результате можно сделать следующие выводы и рекомендации по развитию процесса планирования бюджетных инвестиций на региональном уровне:

1. Предлагается ввести специальное подразделение Министерства финансов, которое отвечало бы как за текущие, так и за капитальные расходы бюджетного распорядителя, поскольку только при таком подходе можно получить комплексный взгляд на каждое направление расходов в целом, включая наилучшее соотношение между капитальными и текущими расходами

2. Разделение бюджета развития и бюджета текущих расходов зачастую приводит к тому, что бюджет развития имеет более мягкие ограничения на увеличение расходов. В результате все распорядители бюджетных средств стараются представить свои расходы как инвестиционные так, чтобы они могли быть включены в бюджет развития. При этом расходы текущего бюджета не связываются с приоритетами государственной политики. Автором предлагается использовать принцип устойчивого финансирования, который означает, что общий объем капитальных вложений региона или муниципального образования должен удерживаться в границах долговой емкости их бюджетов, что обеспечивает стабильность их финансирования и реализацию инвестиционных проектов в установленные сроки.

3. Для каждого субъекта Российской Федерации, допущенного к конкурсу инвестиционных проектов, должен рассчитываться максимально возможный объем получаемой им финансовой помощи. Он должен определяться, исходя из общего объема средств, предназначенного для субсидирования, умноженного на коэффициент, учитывающий отклонение интегрального показателя развития данного субъекта Российской Федерации от среднероссийского уровня и численность населения.

Таким образом, величина субсидии для каждого субъекта федерации будет пропорциональна численности его населения и пропорциональна отклонению его интегрального показателя уровня развития от среднероссийского.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляков И.В., Никифоров С.М., Григоров В.Э.. Исследования местного самоуправления в России. Фонд «Институт экономики города».  
<http://www.urbanecomomics.ru/>

2. Реформирование межбюджетных отношений. / Под ред. А.М. Лаврова. М.: Общественные финансы, 2004. 265 с.

3. Руководство по управлению региональными и муниципальными финансами. / Под ред. Лаврова А.М. Том 2. М.: ЛЕНАД, 2007. 352 с.

**Айриева Арига Нердовна** –  
ассистент кафедры «Финансы и кредит»,  
Саратовский государственный университет  
им. Н.Г.Чернышевского

**Ayrieva Ariga Nerdovna** –  
Assistant of the Department “Finance and  
credit”, Saratov State University on name N.G.  
Chernnyshevsky

*Статья поступила в редакцию 08.02.2011, принята к опубликованию 25.08.2011*

УДК 658.8; 642.5

**Е.О. Калугина**

## **ОБЩЕСТВЕННОЕ ПИТАНИЕ КАК СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ ЛОГИСТИКИ**

*В статье рассматриваются теоретико-методологические подходы к определению понятия логистика в сфере общественного питания на примере ВУЗов г. Саратова. Проведён анализ статистических данных розничной торговли и общественного питания г. Саратова. Сфера общественного питания рассматривается с точки зрения применения к ней логистики.*

Логистика, общественное питание, статистика

**E.O. Kalugina**

## **CATERING AS A SCOPE OF APPLICATION OF LOGISTICS**

*The article deals with theoretical and methodological approaches to the definition of logistics in the field of catering for example, the university city of Saratov. The article analyzes the statistics of retail trade and catering in Saratov. The scope of catering is considered from the viewpoint of application to it of logistics.*

Logistics, catering, statistics

Формирование в России рыночной экономики сопровождается изменениями в деятельности всех хозяйствующих субъектов потребительского рынка, в том числе в общественном питании, укреплении финансовой самостоятельности предприятий, совершенствованием методов хозяйствования. Деятельность предприятий общественного питания способствует решению как экономических, так и социальных задач по удовлетворению потребностей населения в организации внедомашнего питания и досуга.

Рыночные преобразования в экономике России создали условия для развития конкуренции в сфере общественного питания, изменения структуры и характера услуг, предлагаемых населению, повысили роль предприятий общественного питания в развитии экономики страны и удовлетворении индивидуальных потребностей человека и, наконец, обусловили повышение качества жизни населения.

Становление рыночных отношений и усиление конкуренции объективно требуют особого внимания ученых и практических работников к проблемам развития прогрессивных форм и методов обслуживания, новых видов услуг, к оценке эффективности субъектов хозяйствования в общественном питании.

В соответствии с ГОСТ Р 50647 – 94 «Общественное питание. Термины и определения», предприятие общественного питания – это предприятие, предназначенное для производства кулинарной продукции, мучных кондитерских и булочных изделий, их реализации и организации потребления. А общественное питание - совокупность предприятий различных организационно-правовых форм и граждан - предпринимателей, занимающихся производством, реализацией и организацией потребления кулинарной продукции предприятий [1].

Термин «общественное питание» определяется и как «методы приготовления большого количества пищи, выполняемые без предварительной договоренности с потребителем», и как любые «виды питания, организованного вне дома» [4].

И.Н. Смагина и Д.А. Смагин приводят следующее определение: «Общественное питание – это специфическая отрасль народного хозяйства и разновидность торговой деятельности, поскольку предмет деятельности из сферы производства переходит в сферу обращения и потребления» [3].

Г.Е. Чернов понимает под системой общественного питания «совокупность предприятий общественного питания, а также инфраструктурных организаций, непосредственно обеспечивающих работу последних, связанных либо достаточно стандартизированной технологической цепочкой предоставления услуг, либо единством владения или общностью системы управления, либо скоординированной работой на едином рыночном сегменте».

Интеграционные процессы, происходящие в сфере торговли и общественного питания, изменили облик предприятий общественного питания и отношение населения к этой деятельности. Как видно на (рис. 1, 2), оборот розничной торговли с 2000 по 2009 год вырос в 5 раз, а оборот общественного питания вырос в 12 раз. Оборот общественного питания по г. Саратову (рис. 3) за этот же период вырос в 16 раз. Следовательно, отмечаются высокие темпы роста товарооборота общественного питания, превышающие в процентном соотношении товарооборот предприятий розничной торговли.

Ежегодный прирост оборота розничной торговли в Саратовской области составляет порядка 10 млн. руб. с 2000 по 2005 гг., а с 2006 по 2008 год примерно по 30 млн. руб. С 2000 по 2010 год оборот розничной торговли увеличился примерно в 5 раз, оборот общественного питания по Саратовской области в 11 раз, а оборот общественного питания по г. Саратову примерно в 16 раз. Следовательно, отмечаются высокие темпы роста товарооборота общественного питания, превышающие товарооборот предприятий розничной торговли.

Факторы, влияющие на наращивание товарооборота на предприятиях общественного питания:

- увеличение количества предприятий общественного питания;
- рост цен (в том числе за счет инфляции);
- увеличение спроса на услуги предприятий общественного питания в связи с ростом доходов населения [2].

Научные исследования в области общественного питания, в основном, ориентированы на изучение технологии производства продукции и организации обслуживания населения на предприятиях отрасли. Вместе с тем остаются мало изученными вопросы оценки эффективности предприятий общественного питания; в отрасли назрела необходимость пересмотра существующей нормативной документации.

Исследование проблем и перспектив развития общественного питания актуально и в плане понимания его роли в социальной и экономической жизни общества, и в плане определения основных направлений развития отрасли.

Становление рыночных отношений в России в настоящее время связано с освоением всего богатства экономической теории и хозяйственной практики различных школ и направлений. Это относится к такой отрасли знаний, как логистика. Логистика в качестве инструмента эффективного хозяйствования признана мировым экономическим сообществом с середины XX века. Её влияние на хозяйственную деятельность продолжает расти, и резервы этого влияния всё больше проявляются в начале XXI века. Популярность логистики выражается и в попытках применить эти специфические знания к самым разнообразным сферам деятельности, провести «повсеместную логистизацию».

Логистика – новая, сложная область хозяйственной деятельности, которую активно осваивает отечественная наука. Цель статьи – обсудить ряд проблем, решение которых могло бы способствовать логистизации сферы общественного питания, в частности, такой его части, как общественное питание в высших учебных заведениях г. Саратова.

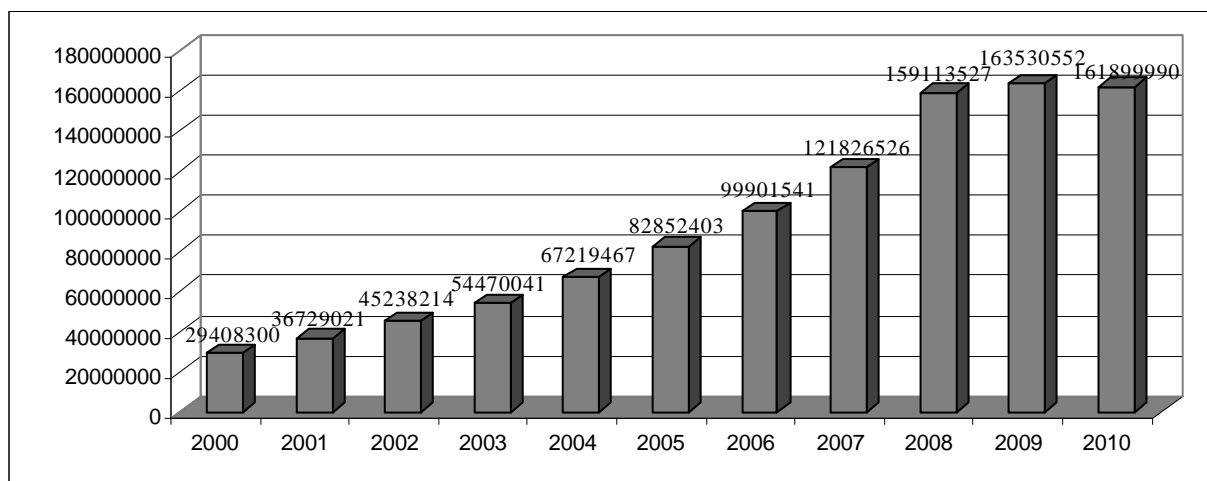


Рис. 1. Оборот розничной торговли по Саратовской области

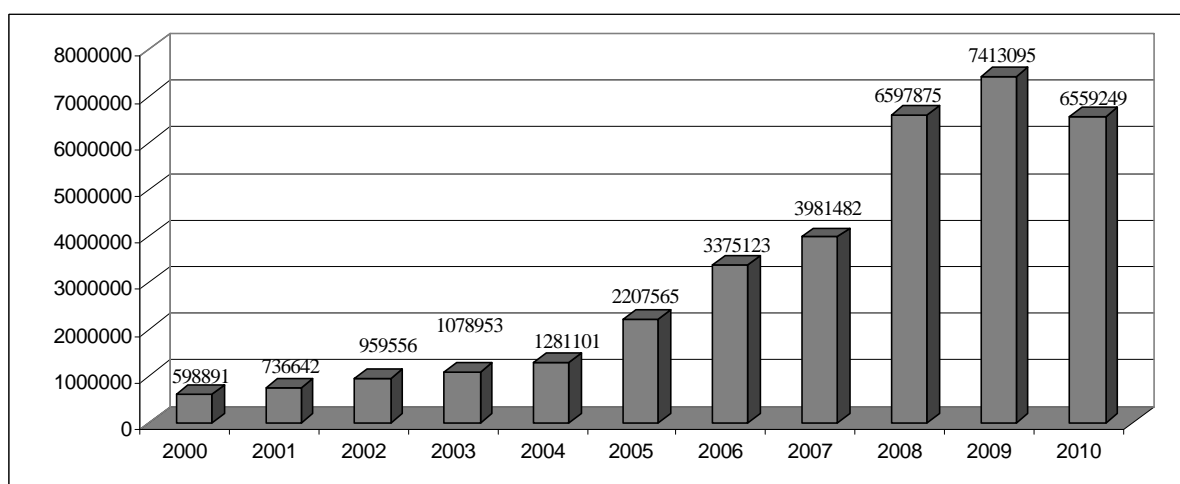


Рис. 2. Оборот общественного питания по Саратовской области

В основу настоящего исследования легли результаты зарубежных учёных: Т. Хилла, П. Паттерсона, Р. Миллера, А. Генри, К. Гренрооса, Т. Кларкова, Ф. Котлера, Р. Малери. Тем не менее, использование зарубежного опыта в практике работы отечественных предприятий общественного питания в настоящее время сильно затруднено в силу специфики их функционирования и тенденций развития рыночных отношений в экономике России.

Исследования современных отечественных экономистов: К.С. Коровина, А. М. Менделевича, Л.И. Кравченко, И.Г. Бережного, О.П. Ефимова, К.А. Раицкого, В.Л. Алексунина, В.П. Борисовой, Э.А. Батраевой, В.Д. Марковой, Н.В. Мироновой в этой области характеризуются отсутствием единых методологических подходов к анализу деятельности предприятий общественного питания и не затрагивают логистические принципы.

Отечественные учёные в оценке услуг предприятий общественного питания не учитывают специфику их функционирования при учебных заведениях (в том числе при ВУЗах), которая не находит отражения в социально-экономических показателях. Также не ведётся статистика по предприятиям общественного питания при ВУЗах, из-за того, что формирование сведений в разрезе типов организаций общественного питания не предусмотрено действующей официальной статистической методологией.

Общественное питание не рассматривается современными отечественными и зарубежными учёными с точки зрения применения к данной сфере знаний логистики. Тем не менее, общественное питание - отрасль народного хозяйства, которая была, есть и будет

самой рыночной сферой деятельности, поэтому необходимо разработать комплекс мероприятий, в рамках которых применялись бы логистические знания для повышения эффективности работы предприятий общественного питания.

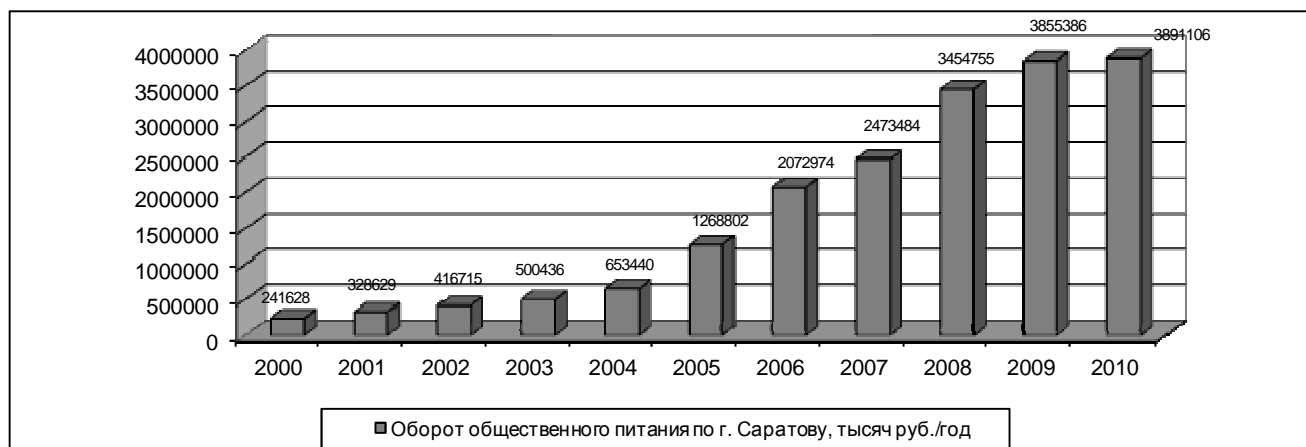


Рис. 3. Оборот общественного питания по г. Саратову

Изучение современного состояния и динамики сферы общественного питания наталкивается на серьезные препятствия. Они связаны, главным образом, с отсутствием объективной информации о функционировании этой отрасли. Информацию о ее деятельности можно получить, используя три источника.

1. **Официальные статистические данные.** Основанные на отчетах организаций, эти данные не вызывают сомнений в их недостоверности: широкомасштабная теневая деятельность искажает практически всю отчетность предприятий. Кроме того, объемы производства предприятий общественного питания, как правило, относительно невелики, и зачастую их деятельность вообще не входит в круг статистического наблюдения. Недостатком статистической информации следует считать также агрегирование показателей, при котором деятельность сферы общественного питания показывается только в сумме с отраслями торговли. И вычлнить значение того или иного показателя из общей суммы чрезвычайно сложно.

2. **Научные исследования.** В дореформенный период научной разработкой экономических проблем общественного питания занималась главным образом академическая и отраслевая наука. Академическая наука широко использовала в своих изысканиях не только официальные данные статистики, но и отраслевую информацию, а также проводила собственные исследования. Признанными авторитетами этого направления были А.И. Кочерга, М.А. Огородник, И.С. Подвиженко. Основное внимание отраслевой науки, находившейся в научно-исследовательских институтах и подразделениях министерства торговли, было сосредоточено на обосновании различных нормативов и параметров функционирования предприятий общественного питания. Публиковавшиеся работы содержали результаты исследований, по которым можно было составить достаточно объективное представление об отрасли. На сегодняшний день результаты научных исследований – это наименее ценные источники информации об экономическом состоянии отрасли.

3. **Периодические деловые издания.** В таких изданиях можно найти достаточно надежную информацию об условиях работы заведений общественного питания, показатели состояния отдельных сегментов рынка предоставляемых услуг, мнения и экспертные оценки, результаты маркетинговых исследований. Особенно достоверны в этом отношении журналы «Forbes», «Эксперт», «Питание и общество», а также деловая газета «Ведомости». Приводимые в них сведения исходят, как правило, от людей, непосредственно работающих в заведениях общественного питания или в специализированных маркетинговых службах. По



этой причине приводимые сведения не вызывают больших сомнений. Кроме того, эти издания содержат разнообразный эмпирический материал, который может быть использован для статистического анализа отрасли. Вместе с тем, данный источник информации является довольно ограниченным. Практически вся информация представлена на уровне отдельных предприятий или крупных сетей. Попытки макроэкономического анализа хотя и предпринимаются, но назвать их успешными нельзя. В большинстве случаев исследования отрасли производятся монографическим методом, т.е. рассматривается крупное успешное заведение общепита. Но, как известно, самое удачное предприятие – это не самый представительный объект наблюдения.

Анализ современного состояния сферы общественного питания показывает, что количество предприятий данной сферы снижается. Так, по данным Федеральной службы государственной статистики, количество предприятий общественного питания, а именно столовых и закусочных на территории г. Саратова в 2004 году составило 260 объектов, что на 193 объекта больше, чем в 2011 году (рис. 4).

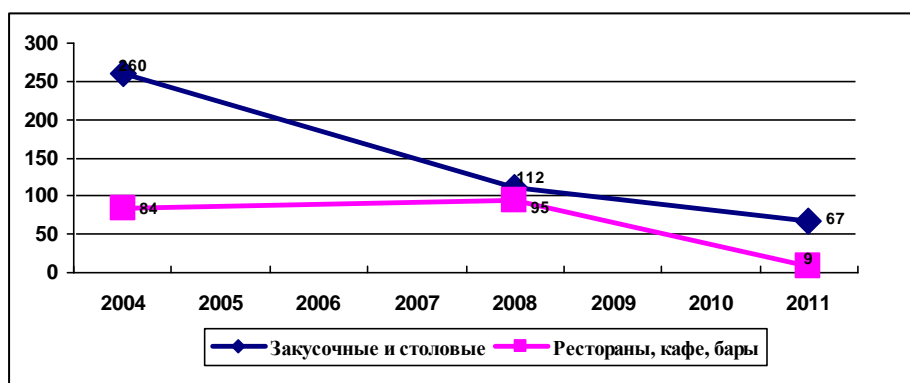


Рис. 4. Количество предприятий общественного питания в крупных и средних организациях розничной торговли и общественного питания в г. Саратове

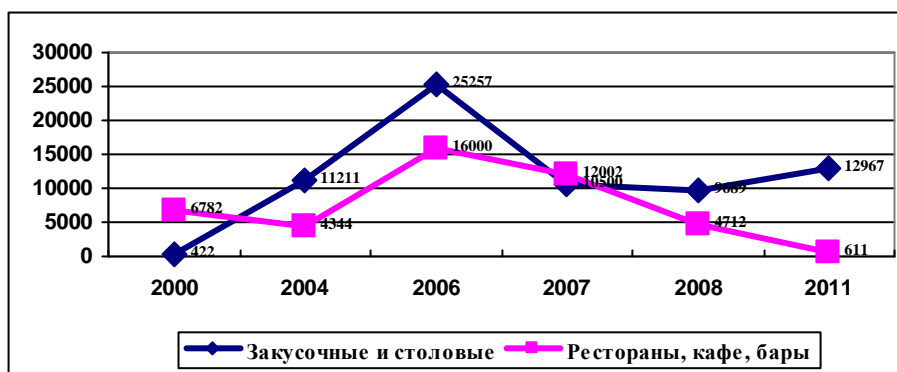


Рис. 5. Число мест на предприятиях общественного питания в крупных и средних организациях розничной торговли и общественного питания в г. Саратове

Соответственно и резко сократилось количество посадочных мест в 2011 году по сравнению к 2006 году, производственные площади и площади зала обслуживания (рис. 5, 6). В современных общественно-экономических условиях перехода к рынку изменились структура, характер и качество услуг общественного питания; изменилось также и отношение к потребителю, так как конкурентоспособность предприятий зависит от качества продукции и услуг, их разнообразия, привлекательности для потребителя. В настоящее время потребители имеют возможность сравнивать одну услугу с другой, что подталкивает конкурентов к предоставлению населению постоянно расширяющейся номенклатуры услуг при обеспечении их качества.

Наибольшим сокращениям подверглись столовые и закусочные г. Саратова. Их общее количество сократилось на 85 % всего за три года в период с 2008 по 2011 г. Уменьшение

количества столовых и закусочных происходит за счет прихода на рынок г. Саратова предприятий быстрого питания, так называемого «Fast Food».



Рис. 6. Площадь зала обслуживания посетителей в объектах общественного питания по г. Саратову, руб.

Как правило, предприятия быстрого питания представляют собой сети недорогих предприятий общественного питания с едиными стандартами обслуживания. Данный тип предприятий является привлекательным за счет относительно небольшого объема инвестиций и быстрого срока окупаемости. Снижение доли столовых в структуре сети предприятий общественного питания г. Саратова происходит за счет закрытия заводских столовых.

На сегодняшний день сложилась такая ситуация, когда предприятия, входящие в сложную логистическую систему, функционируют обособленно и не заинтересованы в достижении общего эффекта системы общественного питания в целом. Особенно актуальным являются разработка методологии оптимизации потоковых процессов и методики оптимизации потоковых процессов в коммерческой деятельности предприятий общественного питания г. Саратова.

Таким образом, основной задачей организации логистики на предприятия является обеспечение высокой степени согласованности действий по управлению материальными потоками между службами снабжения и службами производства и сбыта. Следовательно, для эффективного планирования, контроля и организации всех видов деятельности по перемещению материального потока в сфере современного общественного питания применение логистики становится необходимым.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50764-95. Услуги общественного питания. Общие требования. М.: Госстандарт России, 1995. С. 2.
2. Николаева Т.И. Организация общественного питания: резервы и оценка эффективности: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2008. С. 125.
3. Смагина И.Н., Смагин Д.А. Организация коммерческой деятельности в общественном питании. М.: Изд-во Эксмо, 2005. С. 9.
4. Усов В.В. Организация производства и обслуживания на предприятиях общественного питания: учеб. пособие. М.: 2002. С. 5.

**Калугина Екатерина Олеговна** – аспирант кафедры «Экономика и Управление на транспорте», Саратовский государственный технический университет

**Kalugina Ekaterina Olegovna** – Post-graduate student of the Department “Economics and Management on Transport”, Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 01.03.2011, принята к опубликованию 19.08.2011*

УДК 001.895

**Л.А. Подсумкова**

**К ВОПРОСУ О РАЗВИТИИ МОЛОДЕЖНОГО  
ИННОВАЦИОННОГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА**

*Рассматриваются вопросы развития инновационного предпринимательства в России. Инновационная направленность развития российской экономики заставляет искать новые формы, методы организации инновационной деятельности. Описано новое направление предпринимательской деятельности - молодежное инновационное предпринимательство.*

Инновационная экономика, предпринимательство, инновационное предпринимательство, малое предприятие, молодежное инновационное предпринимательство

**L.A. Podsumkova**

**ABOUT QUESTION OF DEVELOPMENT OF YOUNG PEOPLE'S INNOVATIVE  
ENTREPRENEURIAL ACTIVITY**

*The article deals with specific questions about development of innovative entrepreneurial activity in Russia. Innovative development of Russian economy forces to research new forms, methods of innovative activity. A new form of innovative activity is produced there – young people's innovative activity.*

Innovative economy, entrepreneurial activity, innovative business, small-scale enterprise, young people's innovative entrepreneurial activity

Динамичное социально-экономическое развитие страны основывается в значительной степени на инновациях, принявших стратегически важный характер. Накопленный в мире опыт позволяет с уверенностью говорить, во-первых, о наибольшей восприимчивости к инновациям предприятий малого и среднего бизнеса и, во-вторых, о ключевой роли государства в формировании эффективной инновационной среды в малом и среднем бизнесе.

Формирование инновационной экономики в России становится необходимым условием реформирования, модернизации и развития конкурентоспособного отечественного производства. В нашей стране на ближайшие 20 лет формирование инновационной экономики должно стать стратегическим направлением развития инновационного предпринимательства. Главными задачами процесса формирования инновационной экономики на государственном уровне являются комплексная поддержка инновационного предпринимательства, возрождение системы НИОКР и целенаправленное реформирование научных и образовательных структур на потребности инновационной экономики России.

Остановимся на первой задаче более подробно. Говоря об инновационном предпринимательстве, необходимо уточнить его содержание. Следует отметить, что не любая предпринимательская деятельность является инновационной, а только та, которая использует:

- поиск новых идей (создание нового продукта (услуги), новых методов организации и управления) и их оценки;
- поиск новых ресурсов или вариантов их сочетания, при которых можно получить новые результаты;
- возможность извлечения предпринимательского дохода от коммерциализации инновационной деятельности и ее результатов.

По мнению известного американского специалиста в области менеджмента П. Друкера, «подтолкнуть» предпринимателя к активному поиску инновационной идеи способны следующие факторы:

- неожиданное событие – успех, неудача, неожиданное внешнее событие;
- неконгруэнтность – несоответствие между реальностью, какая она есть на самом деле, и нашими представлениями о ней («такая, какой она должна быть»);
- нововведения, направленные на потребности процесса (под потребностью процесса следует иметь в виду те его недостатки, которые должны быть устранены);
- внезапные изменения в структуре отрасли или рынка;
- демографические изменения;
- изменения в восприятии, настроениях или ценностных установках людей;
- появление новых знаний, как научных, так и ненаучных [3].

Однако приходится признать, что в полемике о путях развития предпринимательства в России, о методах и формах его поддержки незаслуженно мало внимания уделяется проблеме формирования и развития сектора инновационного предпринимательства, т.е. предпринимательства, основанного на коммерческом использовании новейших достижений отечественной научной мысли, открытий и изобретений. Действительно, это особый и еще слабо развитый в контексте рыночных преобразований России бизнес в нашей стране. Особенности этого бизнеса являются: 1) высокий риск; 2) большой период времени от генерации идеи до ее практической реализации в виде коммерческого продукта или услуги; 3) низкая выживаемость малых инновационных предприятий; 4) зачаточное состояние российского рынка инноваций и высоких технологий; 5) невосприимчивость промышленностью инноваций в настоящее время [4]. Действительно, в дни проведения салона инноваций научно-производственная команда Oreol Group провела анкетирование участников выставочного мероприятия на VIII Московском международном салоне инноваций и инвестиций, результаты которого в полной мере отражают в практической плоскости все указанные выше особенности инновационного предпринимательства в России.

На анкету согласились ответить только 25% от ожидаемого объема из числа участников выставочного мероприятия. Формулировки отказов были таковыми: «Нам это не надо», «В этом нет смысла».

Вывод 1: Большинство опрошенных специалистов (3/4) не готово быть бизнесменами, поскольку они не могут оценить свои управленческие способности и не владеют необходимыми навыками и знаниями.

Вывод 2: Около 1/3 опрошенных оказались пассивными участниками выставочного мероприятия. Не все специалисты проявили заинтересованность и выказали мотивированность в использовании предоставленных организаторами выставочного мероприятия возможностей по популяризации инновационных разработок.

Вывод 3. Тот факт, что отдельные изобретатели сами продвигают свои новации, говорит об их активной позиции. Но инновационный потенциал только на таких специалистах не разовьешь, поскольку их интересы не распространяются дальше их собственных разработок. Поэтому в рамках новой инновационной политики потребуется приложить огромные усилия, чтобы запустить малый инновационный бизнес.

Вывод 4. К серьезному диалогу в области инновационной политики готовы 58% опрошенных.

Вывод 5. Из общего числа опрошенных на выставочном мероприятии специалистов только 12% можно объединить в малые инновационные команды под единовременное решение одного проекта. Более сложные бизнес-структуры малого предпринимательства, которые были бы способны взять решение инновационных задач на поток, собрать не удастся [2].

Между тем, многие ученые признают лидерство в инновационном предпринимательстве малых инновационных команд. Действительно, важная функция инновационных предприятий – осуществление посреднической роли между научно-технической и производственной сферами, обеспечение почти автоматического экономического обмена между ними без всяких сбоев в конкурентных условиях. Инновационные предприятия позволяют ликвидировать некоторые из затрат и сократить издержки производства, т. е. они выступают институциональной формой, обеспечивающей эффективное взаимодействие научно-технических институтов и частных хозяйствующих субъектов в рамках рыночных отношений. Сами инновационные предприятия выделяются как самостоятельные хозяйствующие субъекты, если их функционирование позволяет сократить затраты, которые вынуждены нести научно-технические институты и хозяйствующие субъекты, связанные с созданием инновационного продукта или доведением научно-технических новшеств до возможности их коммерческого использования.

С подписанием в августе 2009 года Президентом РФ Федерального закона № 217 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам создания бюджетными научными и образовательными учреждениями хозяйственных обществ в целях практического применения (внедрения) результатов интеллектуальной деятельности», бюджетным научным и образовательным учреждениям теперь разрешено создавать хозяйственные общества в целях практического применения результатов интеллектуальной деятельности. В этом видятся огромные возможности для студентов и молодых ученых технических вузов реализовывать себя в родных университетах, создавая инновационные предприятия при вузах, где проходит их обучение. Используя и реализуя получаемые в учебном процессе знания, возможно формирование инновационных молодежных предприятий, способных быстро, дешево и эффективно выполнять функции по созданию инновационного продукта или доведению научно-технических новшеств до коммерческого использования.

В качестве молодых инновационных предпринимателей могут выступать физические и юридические лица, осуществляющие следующие виды инициативной деятельности, связанные с воспроизводственным циклом инновационного продукта:

- создание инновационного продукта (собственно инновационное предпринимательство);
- выполнение посреднических функций (оказание услуг, связанных с продвижением инновационного продукта и его передачей от непосредственного создателя его потребителю);
- осуществление функций в финансовой сфере для обеспечения инновационной деятельности.

Будучи относительно самостоятельными, данные виды предпринимательской деятельности в инновационной сфере дополняют друг друга, хотя и могут существенно различаться по организационно-правовой форме, по содержанию операций и способам их осуществления. Выбор формы инновационного предприятия зависит от личных пристрастий, сферы деятельности, наличия денежных средств.

Как свидетельствует зарубежный и небольшой отечественный опыт, молодежные инновационные предприятия следует отнести к малому предпринимательству в инновационной сфере, с полным совпадением для них всех характеристик и особенностей его осуществления. Малое предпринимательство в инновационной сфере – первая по массовости и наиболее динамичная структурная составляющая рыночного инновационного потенциала. Действительно, основу инновационного предпринимательства составляют

малые инновационные фирмы (эксперименты) – технологические лидеры в зарождающихся отраслях экономики, открывающие новые сегменты рынка, развивающие новые производства, повышающие наукоемкость и конкурентоспособность производства и тем самым способствующие формированию новых технологических укладов.

К сильным сторонам малых и молодежных инновационных предприятий относятся следующие:

- оперативное принятие управленческих решений, позволяющее сократить длительность инновационного цикла;
- низкий уровень накладных расходов, благодаря прямым и персональным контактам с ними;
- отсутствие бюрократических процедур в организации ввиду минимальной управленческой иерархии предприятий.

Трудности в деятельности таких предприятий связаны с низким профессиональным уровнем менеджмента, ограниченными возможностями внешнего финансирования, низкой специализацией рабочих мест. Из-за отсутствия множества структурных подразделений, что связано с незначительной степенью разделения труда, малые инновационные предприятия не получают синергетический эффект.

Учредителям малых инновационных предприятий свойственна высокая мотивация предпринимательской деятельности, несмотря на персональную ответственность за ее успех в условиях коммерческого риска. К мотивам молодежного инновационного предпринимательства можно отнести:

- возможность реализации собственных творческих проектов;
- высокая степень самостоятельности и свободы в принятии решений;
- утверждение высокого имиджа и творческое признание успеха в инновационной сфере и др.

Повышенной инновационной активности малого и молодежного предпринимательства способствуют свобода поисков, отсутствие бюрократизма, быстрая апробация новшеств и то, что инновационная деятельность – это единственная возможность для предпринимателя, хозяйствующего в небольшой фирме, повысить свой статус, создать более масштабную организацию. Из-за ограниченности всех видов ресурсов малый бизнес заинтересован в ускоренной разработке и использовании новых технологий, производстве новых продуктов, доведении до стадии промышленного образца нововведений, которые передаются на коммерческой основе для использования крупным предприятиям.

Думаю, справедливо и своевременно государство обратило внимание на инновационный потенциал молодежи, что дало возможность будущим специалистам реализовывать свои знания. Ведь если вспомнить, то первые инновационные предприятия на территории России существовали в таких организационных формах как центры научно-технического творчества молодежи, союзы изобретателей и рационализаторов, научно-технические общества, научно-технические кооперативы, которые использовали материально-техническую базу, научный задел и кадровый потенциал государственных ВУЗов, НИИ и ПКБ. Вследствие ухудшения экономической ситуации и снижения инновационного спроса многие из перечисленных выше организационных форм прекратили свою деятельность или изменили ее направление, однако интерес молодежи к предпринимательской деятельности в научной сфере остается.

Инновационное предпринимательство – многогранный вид экономической деятельности. Студенты и молодые ученые технических вузов желают реализовать себя в родных университетах, создавая инновационные предприятия при вузах, где проходят обучение, формируют инновационные молодежные предприятия. Как молодежь может включиться в работу вуза, получив при этом не только благодарность, но и материальное вознаграждение? Например, в связи с подписанием ФЗ-№ 217 руководством СГТУ четко расставлены акценты: необходимо создавать малые инновационные предприятия (хозяйственные общества) при техническом университете. Это позволит осуществлять

трансфер разработок СГТУ из исследовательской среды в производство. Для этого в СГТУ открыты молодежные инновационные структуры, входящие в состав Центра трансфера технологий и коммерциализации объектов интеллектуальной собственности: Молодежный бизнес-центр (МБЦ), Студенческое конструкторское бюро и Школьный технопарк [1]. Эти структуры предназначены для реализации потенциала молодых ученых, привлечения студентов СГТУ к научной работе, организации инновационной деятельности и построении молодежного бизнеса. И многое уже сделано: победителей по программе «У.М.Н.И.К.» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в СГТУ уже более 50 человек, проводится конкурс «Инноваторы», направленный на поддержку денежными средствами университета инновационных проектов молодых ученых вуза. В одном из проектов технического университета уже проявило заинтересованность предприятие ОАО «Саратовский электроприборостроительный завод им. Серго Орджоникидзе», и это уже можно рассматривать как результат соединения научной и практической составляющих разработок молодых специалистов СГТУ.

Таким образом, следует отметить, что создание на базе технических вузов малых молодежных инновационных предприятий, признание и поддержка таких предприятий на государственном уровне являются важным фактором реализации полученного молодежью образования в производственной сфере, развития российского промышленного потенциала и инновационной экономики в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарев С.А. Молодежная инновационная деятельность Саратовского государственного технического университета // Инновационная деятельность. 2009. №4 (9). С. 51-54.
2. Бочаров Н.В. Новация как предмет для формирования малого инновационного предпринимательства // Инновации, 2008. №4 (114). С. 59- 62.
3. Друкер П. Бизнес и инновации. Пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 144 с.
4. Путинцев В.В. Малое инновационное предпринимательство в зеркале радикальных преобразований в России // Вестник ТГУ. 2006. №4 (44). С. 290-293.

**Подсумкова Людмила Алексеевна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика и управление в машиностроении» Саратовского государственного технического университета

**Podsumkova Ludmila Alekseevna** – Candidate of Economic Sciences, Assistant Professor of the Department “Economy and Machine Building”, Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 03.03.2011 , принята к опубликованию 19.08.2011*

УДК 004.4:331.108

**Л.С. Верещагина**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТРОЛЛИНГА  
В МЕХАНИЗМЕ УПРАВЛЕНИЯ РЕЗЕРВАМИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
РЕАЛИЗАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*В статье обосновывается возможность использования механизма контроллинга для управления резервами совершенствования реализационной деятельности промышленных предприятий, рассматриваются этапы проектирования системы контроллинга: предпроектная подготовка, проектирование, внедрение, особенности функционирования стратегической и оперативной подсистем, программное обеспечение контроллинга.*

Механизм контроллинга, резервы, совершенствование реализационной деятельности промышленных предприятий

**L.S. Vereschagina**

**THE CONTROLLING OF THE IMPROVING OPPORTUNITIES  
OF THE SALES SYSTEMS IN THE INDUSTRIAL ENTERPRISES**

*In this article we try to analyze the controlling mechanism of the improving opportunities of the sales systems in the industrial enterprises. The article shows the stages of the realization of controlling system: pre-design, design, realization, the work of the strategic and operational systems, the software of the controlling.*

The controlling mechanism, the improving opportunities, the improving of the sales systems

Контроллинг должен стать организационной, методологической и, в первую очередь, информационной основой механизма управления резервами совершенствования реализационной деятельности промышленных предприятий.

В механизме управления резервами совершенствования реализационной деятельности промышленных предприятий контроллинг выполняет методологическую, координирующую, аккумулирующую, регулирующую, консультационную, навигационную (адекватная оценка и анализ отклонений, оценка их влияния на систему контрольных показателей) функции.

Для оценки актуальности и целесообразности внедрения системы контроллинга резервов совершенствования реализационной деятельности на обойном предприятии разработана анкета и проведен опрос руководителей предприятий указанной отрасли промышленности: ОАО «Саратовские обои», АО «Гомельобой» Республика Белоруссия, ЗАО «Московская обойная фабрика», ООО «Эрисман», ООО КОФ «Палитра». По результатам опроса на российских предприятиях отсутствует система контроллинга, но в анкетах опрашиваемые руководители указали на необходимость такой комплексной системы планирования, контроля, анализа, координации и т.п. На передовом белорусском



предприятию АО «Гомельобои» есть система контроллинга, которая доказала свою необходимость и эффективность.

Проектирование системы контроллинга на промышленном предприятии предполагает прохождение трех этапов: предпроектный этап, проектирование, реализация (рис. 1). Большие преимущества заключаются в создании линейного отдела контроллинга с матричной группой специалистов в подразделениях предприятия.

Опросы указанных выше руководителей обойных предприятий показали, что на белорусском обойном предприятии контроллинг осуществляется управлением продаж. Опрошенные топ-менеджеры отечественных обойных фабрик полагают, что целесообразнее выделить группу или сотрудника в планово-экономическом отделе. Полагаем, что на предприятии обойной отрасли промышленности, как правило среднем, главным контроллером является коммерческий директор, контроллинг резервов совершенствования реализационной деятельности осуществляется линейным подразделением – отделом контроллинга и анализа, подчиняющегося коммерческому директору с матричной группой специалистов центров ответственности и подразделений.

К сожалению, опросы оптовых и розничных покупателей данной продукции показали, что цена является наиболее привлекательным для них фактором при покупке отечественных обоев, в отличие от импортных. Риски в случае реализации данной стратегии могут быть связаны с инфляцией издержек, сужающих возможности фирм по поддержанию разности в ценах, необходимой для преодоления опасности со стороны марок импортной продукции и пр., а также с насыщением рынка высококачественными товарами и снижением спроса на обои при уменьшении цены как на «низший товар».

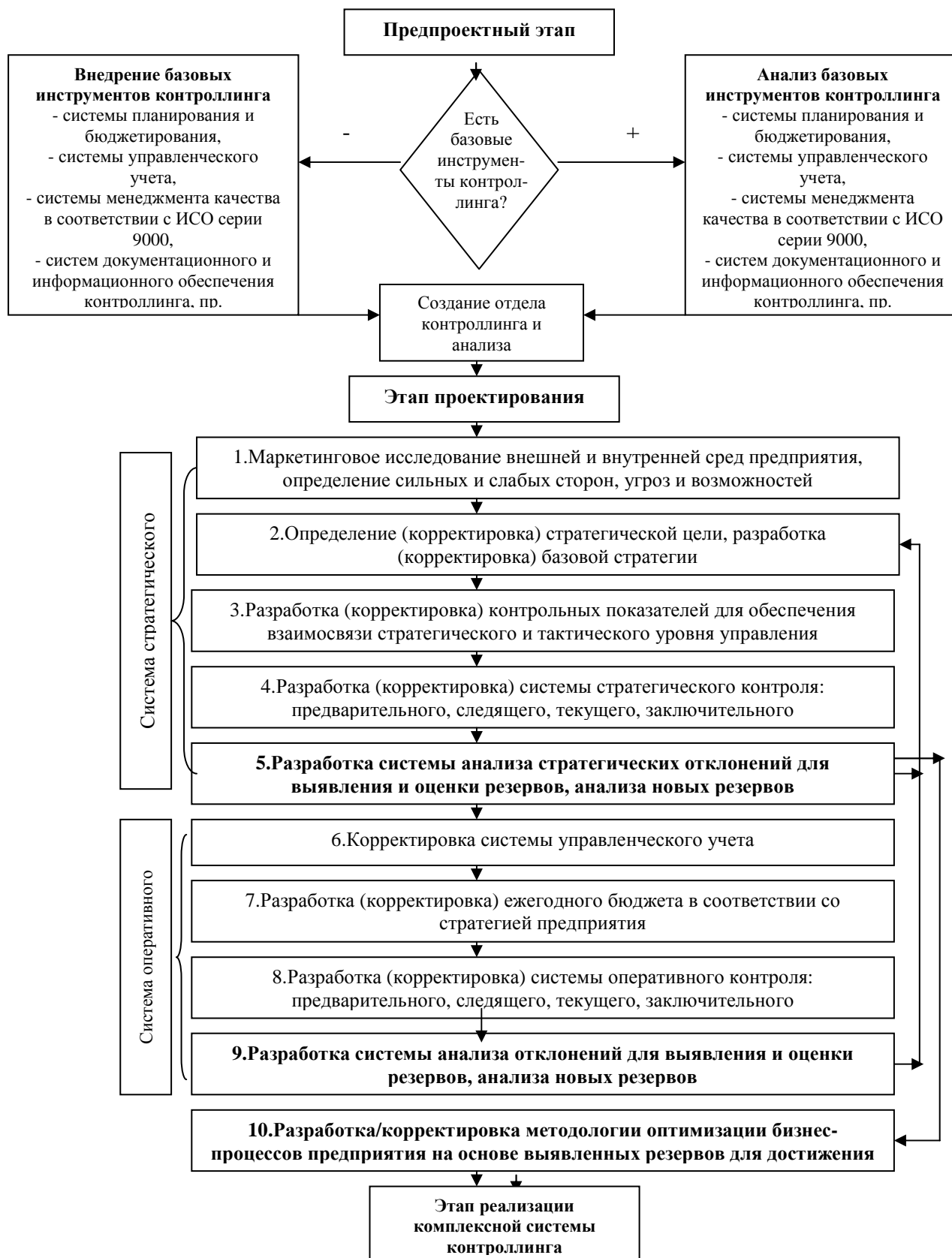


Рис. 1. Формирование системы контроллинга резервов совершенствования реализационной деятельности на предприятии обойной отрасли промышленности

Предприятия обоевой отрасли промышленности находятся на стадии жизненного цикла «зрелость». Согласно классическим правилам, стратегия предприятия должна предполагать рассмотрение возможностей диверсификации производства, в соответствии с которой задачей оперативного уровня контроллинга становится обновление продуктовой линии с учетом неценовой конкуренции. Так как товарный ряд в основном попадает в «квадрант» «дойных коров» [1], необходимо оценить, проанализировать возможные варианты инвестирования либо в существующее производство, либо в осуществление связанной или конгломератной диверсификации.

В рамках стратегии интенсивного роста следует использовать возможности увеличить объем продаж имеющихся видов продукции на существующих рынках за счет охвата большего количества групп пользователей, привлечения новых потребителей, побуждения покупателей к более частому использованию, увеличения доли рынка обоев определенной марки за счет снижения цен, использованию разнообразных мероприятий по стимулированию сбыта, повышению интенсивности товародвижения, вытеснения с определенных сегментов рынка конкурентов, улучшения продукции, расширения товарного ряда, обновления ассортимента в рамках одной товарной позиции. В плане развития рынков следует реализовывать стратегию выхода на рынки тех субъектов федерации, где данная продукция еще не была представлена, на рынки стран ближнего зарубежья, стран Центральной Европы (Венгрии, Болгарии, Югославии и пр.).

Большие возможности для обоевых предприятий все же заключены в совершенствовании товарной стратегии. Следует усовершенствовать обоевую продукцию в плане придания новых потребительских свойств или повышения уровня существующих (светостойкости, восстанавливаемости, плотности и пр.), учет тенденций моды, вкусов и запросов, демографических характеристик и психо-эмоционального состояния покупателей в рисунке, фактуре, цвете обоев, повышение разнообразия рисунков и расцветок обоев, повышение экологичности и безопасности стеновых покрытий, внедрить на обоевых предприятиях страны международные стандарты ИСО серии 9000, избавиться от низкорентабельных, неликвидных товаров, осуществлять привлечение иностранных инвестиций или создание совместных предприятий.

Оперативный контроллинг координирует процессы оперативного планирования, контроля, учета и отчетности в механизме управления резервами совершенствования реализационной деятельности промышленного предприятия. В оперативном контроллинге резервов совершенствования реализационной деятельности обоевого предприятия должен вестись учет текущих и инвестиционных затрат, в разрезе предприятия и по подразделениям, по видам продуктов, по каждой ассортиментной позиции. Выявление резервов совершенствования реализационной деятельности должно производиться на основе данных нормативного и фактического учета затрат в себестоимости, использования метода «стандартность» для учета фактических прямых затрат, «директ-костинг» - для учета постоянных и переменных затрат в себестоимости, определения точки безубыточности, маржинального дохода, прибыли, планирования оптимального объема производства номенклатуры продукции с наименьшими переменными затратами на единицу изделия и пр.

Повышение эффективности контроллинга резервов совершенствования реализационной деятельности основано на использовании автоматизированных систем управления и автоматизированных систем управления предприятием. Анализ теоретических источников и опрос IT-специалистов промышленных предприятий, в том числе обоевых, показал, что для контроллинга резервов совершенствования реализационной деятельности возможно использовать следующие автоматизированные корпоративные информационные системы (ИС): системы класса ERP, CSRP; системы класса workflow; приложения собственной разработки. Помимо указанных корпоративных информационных систем для бюджетирования может использоваться программа Microsoft Excel, а также представленные на отечественном рынке разнообразные автоматизированные системы бюджетирования. Наибольшее распространение на российских промышленных предприятиях получили

информационные системы класса ERP, а также более современные системы управления взаимоотношениями с клиентами CSRP, завоевывают популярность системы контроллинга бизнес-процессов, построенные по принципу workflow.

Основным критерием отбора ИС является ее возможность обеспечить рост доходности реализационной деятельности. Также важным критерием является ее пригодность для выявления потерь (отклонений) по важнейшим факторам (бизнес-процессам) предприятия, влияющим на реализационную деятельность, на основе повышения результативности планирования и исполнения бюджетов предприятия. Еще одним важным показателем является возможность снижения затрат на контроллинг после внедрения информационной системы по сравнению с затратами на контроллинг до использования комплексной автоматизированной информационной системы. Дополнительно при выборе комплексной информационной системы контроллинга необходимо учитывать такие факторы, как необходимость переподготовки персонала для работы с АИС, возможное сопротивление сотрудников автоматизации, пригодность АИС для предприятий обойной отрасли промышленности (с учетом интересов поставщиков и покупателей продукции, широкой номенклатуры изделий, массового типа производства, того, что обойные предприятия в основном являются средними или малыми по численности промышленно-производственного персонала).

По вопросу методики оценки эффективности внедрения автоматизированных информационных систем (в том числе со встроенными модулями контроллинга) в теоретических исследованиях и публикациях в специализированных периодических изданиях отсутствует единая точка зрения.

Критический анализ различных методических подходов позволил сделать вывод, что наиболее часто для оценки эффективности внедрения ИТ-технологий используются различные показатели, разработанные на базе ROI (Return of Investment).

$$ROI = \frac{\text{Выгоды от внедрения} - TCO}{TCO} \times 100\%, \quad (1)$$

где TCO – затраты на внедрение и эксплуатацию АИС.

При этом рекомендуется анализировать эффективность работы системы контроллинга после внедрения АИС и до внедрения АИС, при неизменности всех прочих факторов. В показателе возврата инвестиций достаточно сложно определить количественную величину эффекта от автоматизации системы контроллинга резервов, как и при использовании инструментов оценки эффективности инвестиционных проектов. Директор департамента информационных технологий компании «СВ-Техносила» г. Москвы отмечает сложности прогнозирования совокупного эффекта (чистой прибыли) от внедрения АИС для расчета ROI. Поэтому будущую прибыль от эксплуатации АИС в данной компании определяли экспертным путем [2], а также с использованием эконометрических методов, которые не учитывают флуктуационных воздействий на результаты деятельности предприятия факторов внешней среды (например, финансово-экономического кризиса).

ИТ-компании, осуществляющие разработку и внедрение рассматриваемых решений, предлагают выгоды от внедрения рассчитывать не на основе прогноза доходов, а на основе снижения возможных потерь в случае внедрения объекта [1]. Такой подход представляется более точным, а выгоды от внедрения информационных продуктов - количественно измеримыми. Выгоды от внедрения АИС будут количественно равны величине снижения потери (отклонения) по чистой прибыли фактического уровня от желаемого/нормативного/планового уровня.

Вслед за внедрением автоматизированной информационной системы необходимо оценить эффективность внедрения системы контроллинга резервов совершенствования реализационной деятельности обойного предприятия и эффективность функционирования данной системы.

Подход к системе контроллинга резервов как к неиспользованной до настоящего времени возможности совершенствования реализационной деятельности, предусматривает возможности использования двух групп показателей эффективности: во-первых, методик оценки эффективности инвестиционных проектов (формулы расчета чистого дисконтированного дохода и прочих показателей эффективности инвестиционного проекта для предприятия в момент времени после внедрения системы контроллинга и величина дохода в период времени до внедрения системы контроллинга (возможно определение чистого дисконтированного дохода у двух предприятий: внедрившего систему контроллинга и работающего без системы контроллинга)), во-вторых, показателя (1) и его модификаций.

На наш взгляд, полученные дисконтированные оценки эффекта (уменьшенные на величину текущих и капитальных затрат), основаны на прогнозировании будущих денежных потоков, что не исключает ошибок, так как экстраполируется прошлая тенденция и при использовании экономико-статистических методов сложно учесть динамику экономической конъюнктуры, особенности поведения предприятия на различных стадиях жизненного цикла. Что касается второй группы методов – методов оценки эффективности внедрения ERP-систем, то их нецелесообразно использовать для оценки всей системы контроллинга.

Автор предлагает оценивать эффективность формирования системы контроллинга методом совокупной стоимости владения (ТСО), т.к. он использует фактические показатели затрат на внедрение и эксплуатацию. Автор предлагает, проведя полный расчет затрат на внедрение, предоставить собственникам самим принять решение о рациональности осуществления данных затрат. С этим нельзя в полной мере согласиться, так как отсутствие данных о возможном эффекте внедрения системы контроллинга не позволяет сделать вывод о выгодности или отсутствии каких-либо количественных преимуществ от внедрения данной системы. Думается, следует использовать регрессионный анализ на ряде однородных предприятий с функционирующей системой контроллинга, установить математическую зависимость затрат на формирование контроллинга и прироста дохода данных предприятий, а затем эту зависимость перенести на предприятие, на котором предстоит внедрить контроллинг.

На наш взгляд, эффект от внедрения системы контроллинга можно определить как устраненную величину потерь выручки от реализации / прибыли в результате внедрения системы контроллинга:

$$P \uparrow BP = |\Delta BP_{max} - \Delta BP_{\kappa}| = BP_{o/пл} - BP_{\phi} - BP_{o/пл} - BP_{\kappa} = |BP_{\phi} - BP_{\kappa}|, \quad (2)$$

$$P \uparrow \Pi = |\Delta \Pi_{max} - \Delta \Pi_{\kappa}| = |\Pi_{o/пл} - \Pi_{\phi} - \Pi_{o/пл} - \Pi_{\kappa}| = |\Pi_{\phi} - \Pi_{\kappa}|. \quad (3)$$

А также как устраненную величину потерь рентабельности продаж:

$$P \uparrow P_n = \frac{|\Pi_{\phi} - \Pi_{\kappa}|}{|BP_{\phi} - BP_{\kappa}|} \quad (4)$$

где  $BP_{o/пл}, BP_{\phi}, BP_{\kappa}$  - выручка от реализации оптимального/планового уровня, фактического уровня, нового уровня после внедрения системы контроллинга,  
 $\Pi_{o/пл}, \Pi_{\phi}, \Pi_{\kappa}$  - чистая прибыль оптимального/планового уровня, фактического уровня, нового уровня после внедрения системы контроллинга.

Динамическую эффективность системы контроллинга резервов определим через показатель  $NPV_{\kappa}$ :

$$NPV_k = \sum_{t=1}^n \frac{P \uparrow BP_t - Z_{mt} \times (1-T) + D_t \times T}{(1+i)^t} - I_k \quad (5)$$

где  $Z_{mt}$  – текущие затраты в связи с функционированием системы контроллинга резервов в год  $t$ ,

$I_k$  – капиталовложения в создание системы контроллинга резервов,

$n$  – срок службы системы контроллинга,

$T$  – ставка налогообложения прибыли,

$D_t$  – амортизационные отчисления  $t$ -го года.

На наш взгляд, стоимость любых контрольных процедур на предприятии не должна быть выше, чем эффект/потери, которые могут быть предотвращены в результате реализации указанных процедур.

Долгосрочный эффект от внедрения системы контроллинга резервов можно рассчитать через показатель приведенной рентабельности реализационной деятельности:

$$P_{n_{кр}} = \frac{\sum_{t=1}^n | \Pi_{\phi} - \Pi_{\kappa} |}{\sum_{t=1}^n | BP_{\phi} - BP_{\kappa} |} \times (1+i)^{-t} \quad (6)$$

В [1] предлагается следующая методика оценки эффективности системы контроллинга. Совет директоров, утверждая совокупность целевых показателей на будущий год, присваивает им определенный балл значимости в достижении принятой стратегии в сумме, равной 10 баллам (если целевых показателей много, то 100 баллов). Каждому плановому значению на год присваивается максимальный балл – 10. По результатам планового периода фактические значения путем простой пропорции пересчитываются в баллы. Балл каждого целевого показателя перемножается на балл его значимости для достижения стратегии. Сумма полученных балльных оценок целевых показателей будет отражать степень достижения предприятием в отчетном периоде общей стратегической цели. Оптимальным будет значение 100 баллов, которое будет показывать, что в данном периоде предприятие достигло всех поставленных целей. Для того чтобы оценить эффективность системы контроллинга не статично, а за ряд временных периодов, автор предлагает присваивать балл показателю в интервале от минимального значения в прошлом периоде до планового значения в данном периоде.

На наш взгляд, недостатком данной методики является ее пригодность для оценки результативности, а не эффективности системы контроллинга в связи с отсутствием оценки соотношения достигнутого результата с затратами на функционирование системы контроллинга.

Скорее всего, данная методика призвана оценивать результативность планирования, поскольку показывает не прирост дохода/прибыли/рентабельности вследствие осуществления текущих расходов на функционирование системы контроллинга, а степень выполнения текущих планов по основным технико-экономическим показателям. Показатель совокупного выполнения плана может свидетельствовать не о проблемах в производственно-коммерческой деятельности, а о чрезмерной напряженности плановых заданий.

Помимо вышесказанного, данная методика не позволяет определить, вместе с эффективностью устранения потерь, эффективность использования новых резервов, например, через сравнение уровня контрольных показателей после внедрения системы контроллинга не только с плановым и оптимальным, а также с фактическим уровнем основных показателей производства и реализации предприятия, но и с лучшими и среднеотраслевыми показателями в обойной отрасли промышленности.

Эту задачу можно успешно решить через показатели, предложенные автором выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королева Л.П. Оценка эффективности контроллинга // Управленческий учет. 2007. №1. С. 37-40.
2. Терехов А. Как оценить эффективность внедрения ERP-системы // Финансовый директор. 2003. №1. [www.fd.ru](http://www.fd.ru)

**Верещагина Людмила Сергеевна** –  
кандидат экономических наук, доцент кафедры  
экономики труда и управления персоналом  
Саратовского государственного социально-  
экономического университета

**Vereschagina Liudmila Sergeevna** –  
Ph.D. of Economic Sciences, Associate  
Professor of the Department “Labor  
Economics и Personnel Management”, Saratov  
State Social and Economics University

*Статья поступила в редакцию 09.03.2011 , принята к опубликованию 12.08.2011*

**Л.С. Верещагина**

**ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РЕАЛИЗАЦИОННЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА**

*В статье представлены методические рекомендации по осуществлению функционально-стоимостного анализа для выявления и отбора направлений использования резервов повышения эффективности деятельности реализационных подразделений промышленных предприятий. Представлены результаты использования функционально-стоимостного анализа для поиска резервов в реализационных подразделениях ОАО «Саратовские обои», ЗАО «Московская обойная фабрика».*

Функционально-стоимостной анализ, реализационные подразделения, резервы

**L.S. Vereschagina**

**THE ANALYZE OF THE IMPROVING OPPORTUNITIES OF THE SALES SYSTEMS IN THE INDUSTRIAL ENTERPRISES USING ACTIVITY BASED COSTING**

*In this article we try to systematize the methodology of the Activity Based Costing for the analysis, estimation and selection improving opportunities of the sales systems in the industrial enterprises. The author shows the results of the using the Activity Based Costing in the sales systems OJSC «Saratov wallpaper», CJSC «Moscow wallpaper factory».*

Activity based costing, sales systems, opportunities

Функционально-стоимостной анализ (ФСА) является эффективным методом выявления и оценки резервов повышения эффективности деятельности реализационных подразделений промышленных предприятий. ФСА уместен для выявления сбоев в работе реализационных подразделений предприятия, некачественного выполнения функций, нерационального осуществления функций, рутинными методами, без использования технических средств и пр.

ФСА управления реализационным подразделением предприятия – это метод технико-экономического исследования функций реализации продукции, направленной на поиск путей совершенствования управления и резервов снижения затрат на него на основе выбора экономичных способов осуществления функций в целях повышения эффективности реализационной деятельности предприятия [4]. Функционально-стоимостной анализ реализационных подразделений промышленного предприятия (на примере предприятий обойной отрасли промышленности страны) предполагает следующие этапы.

1. Подготовительный этап. На подготовительном этапе следует определить объект функционально-стоимостного анализа, выработать конкретные задачи его проведения, разработать план проведения ФСА, создать исследовательскую (экспертную) рабочую группу.

2. На информационном этапе ФСА осуществляется сбор, систематизация и изучение данных, характеризующих реализационное подразделение предприятия, данных по



аналогичным подразделениям. На основе указанных данных создается функционально-структурная модель реализационных подразделений предприятия.

3. Аналитический этап. На данном этапе функционально-структурная модель реализационных подразделений предприятия преобразуется в структурно-элементную модель подсистемы управления сбытовой деятельностью. Осуществляется формулировка и классификация функций управления в табличной форме. Для наглядности классификации функций строятся функциональные диаграммы FAST, функции управления сбытом подвергаются декомпозиции. Строятся оперограммы осуществления процедур наиболее трудоемких функций, что позволяет выявлять излишние операции, процедуры, затраты на осуществление которых являются чрезмерно высокими [3]. По каждой функции рассчитывается уровень качества осуществления ( $K_{к.ф.у.}$ ) по формулам (2). Используются экспертные оценки для определения степени значимости функций реализационных подразделений. Степень значимости функций определяют в баллах при помощи матрицы попарных сравнений. Степень и причины несоответствия значимости функций уровню затрат и качества их осуществления определяется с помощью совмещенных диаграмм, а далее выявляются резервы совершенствования реализационных подразделений предприятия и сокращения затрат на функционирование данных подразделений.

4. Творческий этап включает в себя выдвижение различных способов реализации выявленных резервов, формулирование на их основе вариантов осуществления реализационных функций, предварительную оценку и отбор наиболее целесообразных и реальных способов.

5. На исследовательском этапе осуществляется: эскизная проработка отобранных вариантов, предполагающая детальное изложение каждого способа с применением схем, графиков, моделей, оперограмм, функциональных диаграмм, положений о подразделениях, сравнительная технико-экономическая оценка вариантов совершенствования управления, отбор рациональных для реализации вариантов и прочее.

6. На рекомендательном этапе осуществляется рассмотрение и утверждение проекта совершенствования управления реализационным подразделением и принимается решение о порядке его внедрения.

7. На этапе внедрения результатов ФСА осуществляется социально-психологическая, профессиональная, материально-техническая подготовка работников аппарата управления, имеющих отношение к объекту анализа. Разрабатывается система материального стимулирования внедрения проекта и дается оценка фактической экономической эффективности от внедрения результатов ФСА в реализационные подразделения предприятия.

Функционирование реализационного подразделения предприятия можно оценить показателем эффективности выполнения функций реализационными подразделениями предприятия ( $\mathcal{E}_{\text{вып. функций}}$ ) по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{вып. функций}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{к.ф.у.}}{\sum_{j=1}^m Z_{ф.у.}}, \quad (1)$$

где  $K_{к.ф.у.}$  – уровень качества осуществления функции управления сбытом;  
 $Z_{ф.у.}$  – удельные затраты на осуществления функций по реализации в год.

Величина резервов ( $P_{pn}$ ) совершенствования реализационных подразделений промышленного предприятия определяется по следующей формуле:

$$P_{pn} = P_i - \sum_{t=t_h}^{t_k} K_t \alpha_t. \quad (2)$$

$$P_i = \sum_{t=t_h}^{t_k} P_{yt} * \alpha_t, \quad (3)$$

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_p - t}, \quad (4)$$

где  $P_i$  – величина экономии в реализационных подразделениях предприятия,  
 $P_{yt}$  – экономия текущих расходов на реализационные подразделения в t-м году расчетного периода осуществления мероприятий в реализационных подразделениях,  
 $\alpha_t$  – коэффициент приведения единовременных затрат и результатов к расчетному году,

$E_n$  – норматив приведения единовременных затрат и результатов ( $E_n = 0$ ),

$t_p$  – расчетный год, t – год, затраты и результаты которого приводятся к расчетному.

Эффективность использования резервов совершенствования реализационных подразделений промышленного предприятия ( $\mathcal{E}_p$ ) можно определить по формуле:

$$\mathcal{E}_p = \frac{\Delta\Pi}{\Delta K}, \quad (5)$$

где  $\Delta\Pi$  – прирост прибыли от реализации резервов совершенствования реализационных подразделений,

$\Delta K$  – капитальные вложения в связи с реализацией резервов совершенствования реализационных подразделений промышленных предприятий.

Выше указанные методические рекомендации использованы для проведения функционально-стоимостного анализа и выявления резервов реализационных подразделений предприятий ОАО «Саратовские обои», ЗАО «Московская обойная фабрика». Функции по реализации на предприятиях обойной отрасли промышленности выполняют отдел маркетинга, отдел сбыта (продаж). На рис. 1, 2 представлены совмещенные диаграммы значимости реализационных функций и затрат на их осуществление на ОАО «Саратовские обои», ЗАО «Московская обойная фабрика».

Из рис. 1 видно, что затраты на многие реализационные функции на предприятии ОАО «Саратовские обои» не сбалансированы со степенью их значимости, затраты очевидно завышены. Чрезмерно высокие затраты на осуществление функции ранг 30 - «Разрабатывать и организовывать проведение выставочных, рекламных и пропагандистских кампаний», ранг 34 «Обеспечивать использование информационной базы о покупателях», ранг 23 «Обеспечивать хранение и учет готовой продукции в разряде счетов на отгрузку», ранг 24 «Организовывать прием готовой продукции от ЦСПП», ранг 14 «Осуществлять розничную торговлю готовой продукцией».

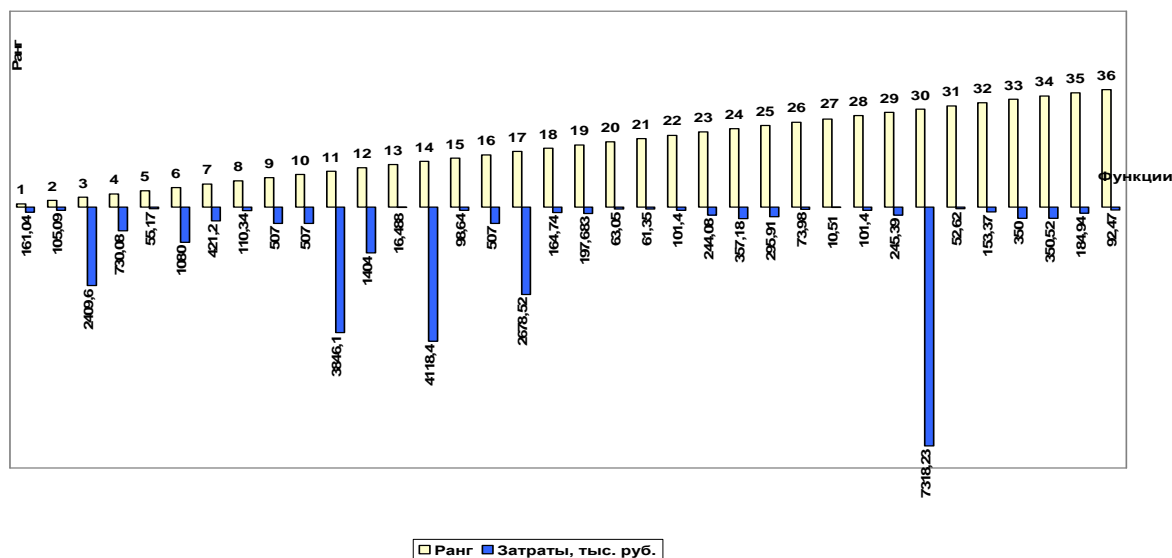


Рис. 1. Диаграмма значимости реализационных функций и затрат на их осуществление на ОАО «Саратовские обои»

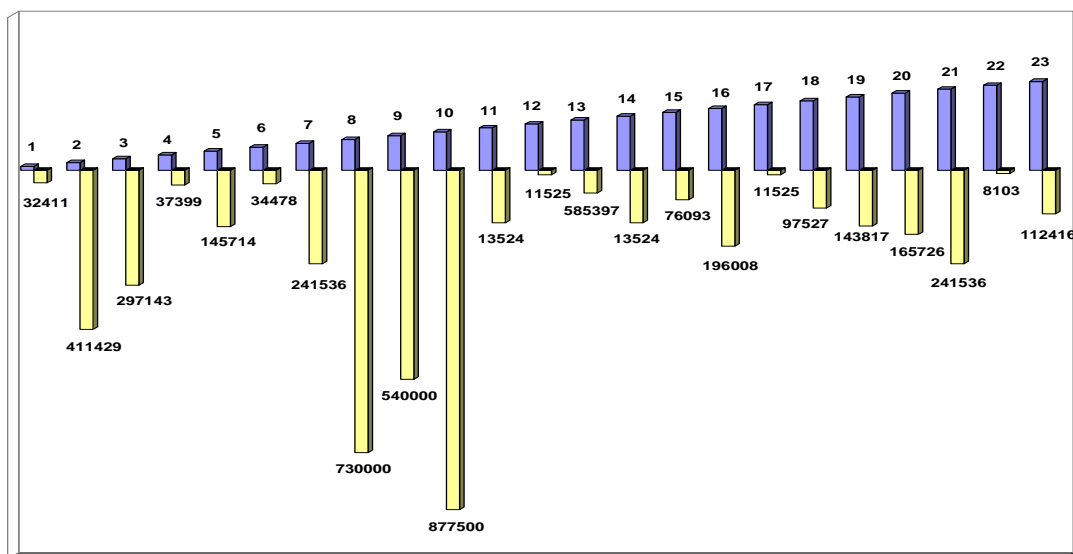


Рис. 2. Диаграмма значимости реализационных функций и затрат на их осуществление на ЗАО «Московская обойная фабрика»

Затраты на многие реализационные функции на ЗАО «Московская обойная фабрика» также очевидно завышены (рис. 2). Чрезмерно высокие затраты на осуществление функции ранг 10 - «Организовывать отгрузки готовой продукции», ранг 8 «Участвовать в выставках и ярмарках», ранг 21 «Изучать общую конъюнктуру отрасли».

Проведенный анализ и расчеты свидетельствуют о крайне низком уровне качества осуществления реализационных функций на обойных предприятиях.

Таким, образом, анализ реализационных функций предприятий ОАО «Саратовские обои», ЗАО «Московская обойная фабрика» выявил следующие недостатки: наличие дублирующих функций в сфере информационно-аналитической деятельности и оперативно сбытовой работе, нереализуемость большинства информационно-аналитических функций, высокая трудоемкость осуществления перемещений и работ по хранению готовой продукции на соответствующих складах, низкий уровень механизации данных работ. По саратовскому предприятию также – высокие затраты на осуществление функции «Обеспечивать проведение инвентаризации с составлением отчетов» во всех складских помещениях, низкий уровень качества осуществления данной функции, несоответствие степени значимости и затрат на осуществление функций, связанных с хранением и реализацией готовой продукции через магазин розничной торговли. По ЗАО «Московская обойная фабрика» - непрописанность большинства видов деятельности в организационно-распорядительной документации складского хозяйства, отсутствие функции «Обеспечивать проведение инвентаризации с составлением отчетов», избыточная численность работников в группе маркетинга и группе сбыта отдела продаж.

Важнейшими задачами совершенствования реализационной деятельности предприятия ОАО «Саратовские обои» являются: исключение дублирования в выполнении ряда функций отдела маркетинга и складского хозяйства, сокращение затрат на осуществление функций «Осуществлять отгрузку готовой продукции покупателям», «Осуществлять розничную продажу продукции», повысить уровень качества осуществления реализационных функций (развитие нормирования операций в сфере обращения, повышение эффективности использования технических средств, разработка нормативно-методической документации для

исследования рынка и осуществления продаж продукции, повышение уровня качества работы складского хозяйства).

По формуле (1) определено среднее значение коэффициента эффективности реализационных подразделений в 2008 году: по ОАО «Саратовские обои» - 116,48, по ЗАО «Московская обойная фабрика» - 63,60.

На последующих этапах ФСА определены наиболее актуальные направления реализации выявленных резервов в сбытовых подразделениях саратовского и московского обойных предприятий. По ОАО «Саратовские обои» отобраны для реализации такие резервы как – повышение эффективности информационно-аналитической деятельности (за счет увеличения штатной численности отдела маркетинга на 1 ед.), снижение затрат на функции по: планированию производства и сбыта, согласованию планов производства и сбыта, получению заказов от покупателей на поставку продукции, осуществлению хранения и внутренней транспортировки продукции, проведению инвентаризации, розничной торговле готовой продукцией (уменьшить численность фирменного магазина-салона на двух продавцов) и прочее.

Общая экономия, в результате использования указанных резервов в деятельности реализационных подразделений на ОАО «Саратовские обои», составит 555 658 руб. за год. Дополнительные единовременные капиталовложения, которые возникают в связи с реализацией резервов, равны 440 000 руб. Эти капиталовложения необходимы для компьютеризации системы документационного обеспечения продаж, закупки электропогрузчиков и терминалов для оперативного учета товаров в системе складского хозяйства в ходе инвентаризации, обучения персонала реализационных структур и прочее. Поэтому, в первый год реализации резервов суммарная годовая экономия составит 115 658 руб. Показатель среднего значения эффективности реализационной деятельности ОАО «Саратовские обои» увеличится со 116,48 до 119,54 (величина резерва – 3,06).

По ЗАО «Московская обойная фабрика» необходимо использовать следующие резервы: исключение дублирующих функций в отделе продаж, сокращение штатной численности работников реализационных подразделений и прочее. Общая экономия в результате реализации указанных резервов повышения эффективности деятельности реализационных подразделений ЗАО «Московская обойная фабрика» составит 1 662 068 руб. Дополнительные единовременные капиталовложения, которые возникают в связи с реализацией резервов, равны 247 000 руб. и предназначены для механизации погрузочно-разгрузочных работ, автоматизации процесса инвентаризации, обучения персонала реализационных структур, совершенствования документационного обеспечения сбытовой деятельности. Показатель среднего значения эффективности реализационной деятельности увеличится с 63,00 до 75,70 (резерв – 12,70).

Исследование теоретических положений по функционально-стоимостному анализу, применение методики ФСА для выявления и использования резервов повышения эффективности деятельности реализационных структур предприятий обойной отрасли промышленности показало, что очевидными достоинствами функционально-стоимостного анализа являются: глубокий комплексный анализ всех подсистем системы реализации продукции, существующих взаимосвязей между ними, выявление неэффективных связей и коммуникаций, дублирующихся, неэффективно осуществляющихся функций в каждой подсистеме, возможность соотнесения степени значимости сбытовых функций с затратами и уровнем качества их осуществления, интеграция различных методов выработки вариантов совершенствования реализационных подразделений предприятия, привлечение компетентных специалистов – руководителей реализационных структур, менеджеров, сбытовых посредников и прочее.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карпунин М.Г., Майданчик Б.И. Функционально-стоимостной анализ в отраслевом управлении эффективностью. М.: Экономика, 1983. 174 с.

2. Кибанов А.Я. Управление машиностроительным предприятием на основе функционально-стоимостного анализа. М.: Машиностроение, 1991. 231 с.
3. Майданчик Б.И. Функционально-стоимостной анализ издержек производства. М.: Экономика, 1985. 112 с.
4. Управление персоналом организации. Практикум: Учеб. Пособие. / Под ред. А.Я. Кибанова. М.: ИНФРА-М, 2002. 364 с.

**Верещагина Людмила Сергеевна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики труда и управления персоналом Саратовского государственного социально-экономического университета

**Vereschagina Liudmila Sergeevna** – Ph.D. of Economic Sciences, Associate Professor of the Department “Labor Economics и Personnel Management”, Saratov State Social and Economics University

*Статья поступила в редакцию 10.02.2011, принята к опубликованию 20.08.2011*

УДК 33.338

**А. И. Семенов**

### **РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ ИННОВАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

*В статье рассматриваются методологические подходы по изучению проблем формирования национальной инновационной системы.*

Инновация, национальная инновационная система, функциональный подход, субъектно-ориентированный подход, институциональный подход, системный подход, синергетический подход, системно-кибернетический подход

**A.I. Semenov**

### **DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL TOOLKIT IN RESEARCH NATIONAL INNOVATIVE SYSTEM**

*In article methodological approaches on studying of problems of formation of national innovative system are considered.*

An innovation, national innovative system, the functional approach, the subject-focused approach, the institutional approach, the system approach, the synergetic approach, the system-cybernetic approach

В процессе эволюционного развития научных взглядов сформировались несколько методологических подходов, применяемых при изучении инновационных процессов. Наиболее распространенные среди них - это функциональный подход, субъектно-ориентированный подход, системный подход, а также синергетический и системно-кибернетический.

Исторически первым среди них был взят на вооружение функциональный подход. Еще в 1912 году Й. Шумпетер сделал вывод о роли нововведений в развитии экономики, изучая научно-исследовательскую деятельность корпораций. При этом им подчеркивалось,

что в ходе конкуренции между фирмами главной доминантой становится творчество человека, новатора-предпринимателя, воплощающего новые идеи в эффективные экономические решения [20].

С того времени функциональный подход не утратил своего значения для углубленного изучения таких аспектов исследований, как «Каким образом генерируются инновации?» или «Что следует делать для организации инновационного развития?». Уже после Второй мировой войны американский экономист Р. Солоу обнаружил в экономике США определенную зависимость: прирост продукции в компаниях на 87,5% обеспечивался совершенствованием технологий и только на 12,5% увеличением инвестиций [17, 24]. Вслед за ним целый ряд исследователей, как экономистов, так и специалистов, изучающих развитие техники, пришли к пониманию того, что основа промышленного роста – нововведения. В связи с этим в научных, деловых, профессиональных кругах стали изучаться знания, информация, нововведения, инновации с позиции их роли в развитии экономики. Накопленный объем исследований позволил в дальнейшем сформировать парадигму «экономики информации», автором которой явился представитель неоклассического направления Дж. Стиглер. Им было предложено понятие «информация для агента». Умозаключение ученого выстраивалось по логической цепочке: прогресс – инновации – информация (поскольку экономическое развитие зависит от нововведений, а те, в свою очередь, базируются на информации). Чуть позже знание, понимаемое как совокупность представлений о состоянии среды, было определено первичным по отношению к информации. Поэтому понятие «экономика информации» трансформировалась в «экономике, основанную на знаниях».

Функциональный подход Дж. Стиглера к инновациям получил дальнейшее развитие в научной среде. Формируется концепция «рассеянного знания» Ф. Хайека, с помощью которой он пытался дать ответы на ряд вопросов функционирования инновационной системы. Масштабность проблем, поднятых Ф. Хайеком, позволили присвоить концепции новое более точное название – «инновационная экономика», которая получила развитие во многих работах отечественных и зарубежных экономистов: П. Н. Завлина, Л. А. Жоленца, польского исследователя Я. Муйжеля, венгерского исследователя Б. Санто и др. Система экономики знаний, её структура, инфраструктура и анализ продуктов её деятельности нашли отражение в трудах А. И. Татаркина, А. Е. Когута, Н. Л. Фроловой, В. Ж. Келле.

Отечественный экономист П. Н. Завлин отмечает, что нововведение как продукт экономики, основанной на знаниях, может приобретать форму услуги, способа производства, а также форму организации, финансовой, научно-исследовательской деятельности [3]. Близкие к этому представления содержатся в работах польского исследователя Я. Муйжель [25]. Л. А. Жоленц под нововведением как результатом приложения знания понимает «процесс доведения научной идеи или технического изобретения до стадии практического использования». Аналогичные суждения имеет венгерский исследователь Б. Санто [15].

В многочисленных дискуссиях российских учёных о современной трактовке понятия экономики, основанной на знаниях, следует отметить точку зрения В. Ж. Келле. Он считает, что её основой является применение науки к разработке, производству и последующему широкому распространению новых технологий, новых продуктов [6]. Данный подход у него применяется к трансформационной российской экономике и является отличительным видовым признаком её современной модернизации как процесса созидания общества, опирающегося на «экономике, основанную на знаниях».

В условиях экономики, основанной на знаниях, создаётся так называемая «инновация», которая, по мнению А. И. Татаркина, представляет собой новый продукт (вид изделия, технологию, организационную форму и т. п.), являющийся результатом практического приложения научных и научно-технических знаний, использование которого приводит к экономическим и/или социальным эффектам [18]. Кроме этого, А. И. Татаркин отмечает, что более предпочтительным представляется широкое понимание «инноваций» как новых технологий и других новых продуктов, получаемых и применяемых не только в сфере материального

производства, но также и практически в любой сфере духовной деятельности. Учитывая множество различных критериев, А. И. Татаркин предлагает свою классификацию «инноваций». Он различает их в зависимости от области распространения и использования, по форме воплощения, по степени новизны, в зависимости от границ распространения и т. д.

Как нетрудно заметить, функциональный подход в своем развитии вывел исследователей от познания инноваций на уровне факторов производства и конкуренции на уровень инновационной системы в масштабе национально-государственного образования. Круг дискуссий стал охватывать в целом все факторы экономической системы.

Однако функциональный подход оказался не в состоянии дать ответы на вопросы субъектного характера, которые особенно актуальны для современной российской экономической жизни:

- «Кто, зачем и для чего будет осуществлять инновационное развитие?»
- «Кто и что является субъектом инновационного развития?»
- «Кто, как и зачем будут кооперироваться в интегральные субъекты?»
- «Какие механизмы идентификации позволят формировать целостные субъекты инновационного развития?»
- «Кто и как будет создавать пространства коммуникации и доверия?»
- «Кто и как будет оценивать социальные последствия инноваций?»
- «Какова структура национальной инновационной системы» и др.

Не имея ясных ответов на эти вопросы, нельзя выбрать правильное направление совершенствования национальной инновационной системы, а для России сформировать ее на уровне, отвечающем вызову времени. Для ответа на эти вопросы стал применяться субъектно-ориентированный подход, который предоставляет исследователю избирательно «ориентироваться» на конкретные «субъекты» в инновационной системе: физических лиц, институциональные элементы и т.д.

В отечественной научной деятельности по этому направлению заслуживают внимания взгляды В.Е. Лепского [8], который, рассматривая линейную модель инновационного процесса (рис. 1) и «модель множественных источников инноваций» (рис. 2), особо подчеркнул, что поскольку инновации являются результатом интеллектуальной деятельности, возрастает значение физических субъектов инновационной системы.

В своих работах В.Е. Лепский основное внимание сосредоточил на разрешении проблемы неосознаваемого конфликта двух парадигм: «поддержки инноваций и поддержки конкретных субъектов инновационной деятельности». Суть конфликта — вопрос о субъектах инновационного развития, готовых определять образ будущего, взять на себя бремя и ответственность за осуществление намечаемых целей и задач. Имеется в виду наличие и реальное состояние тех профессиональных (научных, предпринимательских и др.), общественных и политических субъектов (или претендентов на статус таковых), которые не только выражают желание, но и обладают волей, чтобы осуществить проект на практике. В сложившейся в настоящее время национальной инновационной системе России зачастую, если даже инновация признается, то инноватор игнорируется системой, как нежелательный элемент.

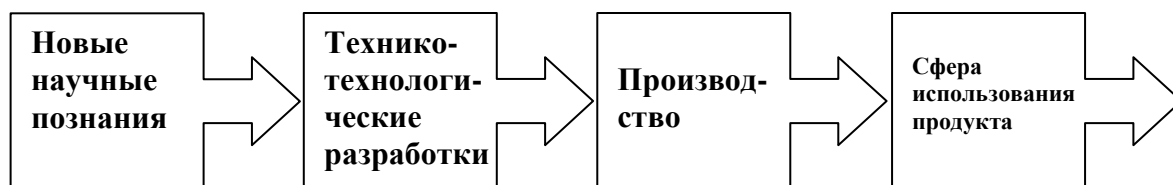


Рис.1. Линейная модель инновационного процесса

По мнению В.Е. Лепского, эти парадигмы не следует рассматривать как альтернативные, они должны дополнять друг друга. Это возможно при расширении «пространства проблематизации» и перехода к парадигме, включающей в себя одновременно и «поддержку инноваций, и поддержку субъектов инновационной деятельности». Одной из его принципиальных особенностей должна стать смена объектов исследования, проектирования и управления, которыми становятся как системы деятельности в целом, так и их субъекты, активно участвующие в развитии своей деятельности.

Субъектно-ориентированный подход применяется в исследовании проблем национальной инновационной системы активнее, чем функциональный подход. Это объясняется его возможностью углубленно сосредоточиваться («ориентироваться») на отдельных элементах самой системы.

В составе субъектно-ориентированного подхода четко прослеживается институциональная линия исследования. Этому аспекту большое внимание уделили за рубежом Д. Норт [11] и М. Портер [13], а среди отечественных исследователей - Л.С. Аганина [1], Н.В. Бекетов [2] и др. Среди этого круга экономистов преобладает мнение о том, что существенное изменение институциональной структуры национальной инновационной системы должно обеспечить инновационный прорыв экономики.

Так, в настоящее время идет оживленная дискуссия о выборе направления совершенствования инфраструктуры инновационной системы России. Факт ее неудовлетворительного состояния отмечается руководителями государства, предпринимателями и аналитиками. Институциональный подход выступает в данном случае подходящим инструментом для исследователей. Причем из области полемики эта работа уже перешла в плоскость практических экспериментов, создания реальных моделей для апробации теоретических предложений.

Так, в 1994 г. создан Федеральный фонд содействия развитию малых форм инновационных организаций. В 1998 г. принята программа "Активизация инновационной деятельности в России», к которой присоединились регионы, заинтересованные в сотрудничестве по развитию и использованию своего научно-технологического потенциала. В программу входит создание и поддержка инновационно-технологических центров (ИТЦ) с технопарками, бизнес-инкубаторами и другими организационными структурами инновационного бизнеса.

Чуть позже сформировались ОАО «Российская венчурная компания», национальное содружество бизнес-ангелов СБАР и т.д. Активно исполняется распоряжение Президента России о создании иннограда в Сколково.

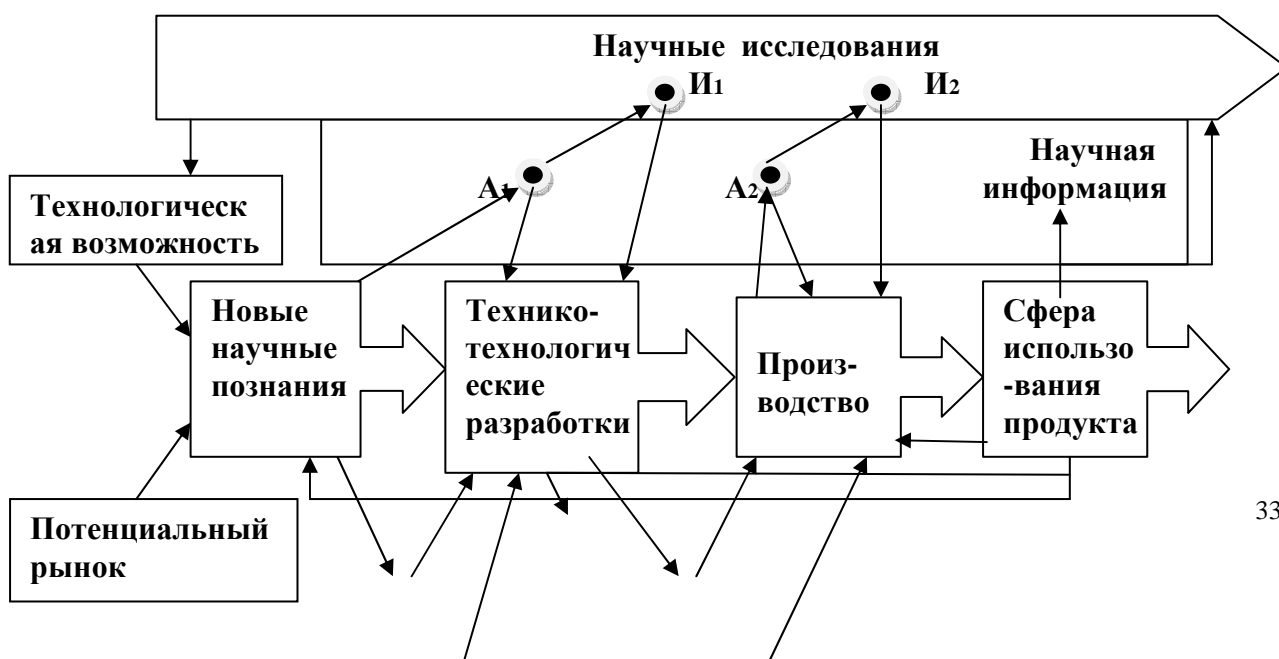






Рис. 2. Модель множественных источников инноваций (инновации могут возникать в любой части инновационной системы),  
 где: А1, А2 и т.д. – области анализа и обмена научной информацией;  
 И1, И2 и т.д. – области научных исследований;  
 К1, К2 и т.д. – опыт конкурентов;  
 П1, П2 и т.д. – возникающие потребности рынка продуктов и услуг;

Безусловно, не все из перечисленных элементов инфраструктуры в жизни оправдывают теоретические представления о них, но важен даже отрицательный результат, который дает основание для уточнения дальнейшего развития национальной инновационной системы в условиях российской специфики.

С накоплением знаний стало понятно, что функциональный и субъектно-ориентированный подходы не в состоянии дать ответ на возникающий вопрос: почему в таких странах, как Россия, обладающая высокой научной базой и квалифицированными кадрами, генерирующая новые знания и технологии, не произошел переход на новый высокий технологический уклад, как это отмечается в США и Западной Европе? В ходе исследований было замечено, что активность генерации и диффузии инноваций зависят не только от наличия адекватных формальных элементов (инноваторов, передовых фирм, научных институтов и т.д.), но также и от того, как они взаимодействуют друг с другом в составе общей для них системы, и от их соответствия другим общественным институтам (ценностям, нормам, законодательным актам и т.п.). Так был поставлен вопрос о необходимости применения системного подхода в изучении инновационного процесса развития вообще и национальной инновационной системы в частности.

Одними из первых (по данному направлению) системный подход стали применять американские экономисты. Первоначально они были полностью сосредоточены на проблемах внедрения того или иного нововведения. При такой постановке задачи проблема источника новшества отступала в «тень». Но, расширив горизонт исследования, обнаружилось, что развитие производства зависит также от того, как, кем, когда, почему и при каких условиях создаются инновации. Пришло понимание, что в высокотехнологичной экономике динамика производственных нововведений в значительной степени обеспечивается развитой системой научных знаний. С этого момента (50-е годы XX века) в оборот вошли и закрепились уже привычные для нашего времени термины «инновационная деятельность», «инновационный процесс», «инновационное развитие», а сама внедренческая деятельность стала совершенно верно рассматриваться составной частью инновационного процесса. Кроме того, было подмечено различие между первичным внедрением инновации на отдельной фирме-инноваторе (превращении опытного образца в серийный продукт) и вторичном внедрении (распространении инновации по широкому кругу предприятий). Стало понятным, что на превращении инновации в ординарный продукт или услугу огромное значение оказывают сложившиеся в экономике связи и отношения.

В качестве пионера использования системного подхода в концепции национальных инновационных систем следует отметить Д. Норта. Отличительная черта его анализа — особое внимание к взаимодействию институциональных структур и технологий, их совместной роли в экономическом и социальном развитии. Главная идея, по его мнению, заключается

в том, что институты прямо и косвенно влияют и на знания, и на технологии. Д. Норт показывает, что в ходе эволюции институциональных систем в развитых странах созданы разветвлённые формальные отношения и механизмы, обеспечивающие более низкие транзакционные издержки, чем в странах «третьего мира» [11]. На этом этапе системный подход ограничивался рамками высокоразвитой американской экономики.

Но в дальнейшем он перешагнул национальные границы. В работах М. Портера (1980 г.) уже изучаются, кроме кластеров отраслей в национальной экономике, также кластеры международных корпораций, консорциумов и холдингов [13].

Актуальность применения системного подхода особенно возросла в 70-80 гг. В этот период было уже отмечено, что между разными странами существуют и продолжают углубляться заметные различия в темпах экономического роста, структурных изменений, активности на мировых рынках. Одним из первых, обративших внимание на эти явления, был Ф. Махлуп [9]. Его выводы затем подтвердили своими работами К. Фримен [23], Дж. Доси [22]. Ими же высказывалось предположение, что ответ кроется в потенциалах структурных элементов системы: объеме высокотехнологичных компаний, научных учреждений и квалифицированных кадрах.

Но дальнейшее развитие событий в мировой экономике продемонстрировало, что ответ кроется в более сложной системе взаимосвязанных факторов. Страны Восточной Европы (включая Россию), несмотря на развитость научно-исследовательских и образовательных учреждений, сопоставимость с западными аналогами передовых предприятий, не смогли в целом перейти на более высокую ступень экономического развития. Одновременно исследователями отмечен прорывной характер инновационного типа в Бразилии, Индии, Китае, Финляндии, Южной Корее и целого ряда других государств. Системный подход исследования национальных инновационных систем в данном аспекте оказывался недостаточным. Но во второй половине XX века в теории систем было сделано несколько важных открытий, которые касались динамики сложных систем.

Национальная инновационная система относится к типу сложных систем (по внутренней структуре, характеру взаимосвязей между элементами и подсистемами, интегрированности во внешнюю среду и т.д.). Для такого уровня объектов исследования разработаны особые методологии, которые получили название синергетический и системно-кибернетический подходы. Указанные теоретические инструменты исследования в определенной мере уже применяются для раскрытия условий, связанных с трансформацией национальных инновационных систем при переходе их на более высокий уровень становления. К примеру, синергетические методы: использованы Соловьевым В.П. [16] к области инновационной политики государства; Осипов Ю.М. и Шургалова И.Н. проанализировали причинно-следственные связи в экономике [12]; Касти Д. представил собственное видение на роль кризисов при переходе на более высокий уровень развития экономики [5], и другие.

Представители синергетических взглядов утверждают, что самоорганизация системы есть результат самостоятельной кооперации ее элементов и подсистем. В процессе развития возникают противоречия между системой и ее составными элементами, которые нарастают до определенного предела. И если сложившаяся система тормозит динамическое развитие ее составных элементов, то происходит ее слом (кризис) и система переходит в новое, устойчивое состояние. В области экономических отношений подразумевается, что новое состояние системы представляет собой более совершенное качество, чем предшествующее (прогресс).

Одновременно, синергетический подход анализа процессов в национальной инновационной системе, на наш взгляд, не лишен некоторых недостатков.

Во-первых, излишне «технократически» рассматриваются процессы конструирования новой национальной инновационной системы и недооцениваются роль и особенности человека как базового элемента.

Однако современный человек – главный источник инновационного процесса – результат, прежде всего, эволюционного развития. С усложнением общества сложнее становится и человек. Чем дальше, тем отрицательнее его отношение к административным формам управления (сопоставьте естественность восприятия авторитаризма в средневековом обществе с современным его отрицанием). И тем сильнее он ощущает потребность в творческой самоорганизации и саморазвитии.

Особенность человека в качестве базового «элемента» национальной инновационной системы состоит также и в том, что он входит одновременно в состав как подсистемы управления, так и управляемой подсистемы. Через человека реализуется активная часть отношений системы, которая выступает генератором развития. Другая часть – пассивная – приходится на технические связи в системе, не обладающие самостоятельной креативной составляющей.

И, наконец, нельзя не учитывать того, что подчас разработка, выбор и реализация решений человеком не поддается описанию на основе логики (его поступки нередко алогичны или строятся на одной лишь интуиции).

Во-вторых, синергетический подход не в состоянии объяснить имитационный характер национальной инновационной системы современной России [14] по сравнению с прежней, советского периода. После кризиса система обязана была перейти в устойчивое состояние более высокого уровня. Но ее формирование пошло с использованием административных, а не рыночных методов. Главным считается сохранить устойчивость. Но в развивающейся системе это означает консервацию прежних экономических отношений, что явно противоречит сущности инновационного процесса. В результате сегодня в России существует некая национальная инновационная модель, внутри которой сложились отношения, и они даже в определенной мере действуют. Но интегративного качества не отмечается. Есть имитация инновационного движения. Поэтому говорить о сложившейся адекватно современным требованиям глобального экономического развития национальной инновационной системе не приходится.

В-третьих, при синергетическом подходе принято отмечать открытость национальной инновационной системы в качестве положительной характеристики. В действительности каждая сложная развивающаяся система, и национальная инновационная система в том числе, обладают свойством дуализма: открытости и закрытости. Принципиальным моментом здесь является отношение с внешней средой. Внешняя среда по отношению к системе может способствовать ее развитию, но может также проявлять агрессивность. В связи с этим система, в процессе своего развития, реализует принцип адаптации на основе как свойства открытости, так и закрытости.

Национальная инновационная система – это открытая система (открытость делает ее эффективнее закрытой системы: она имеет возможность адаптировать инновации, разработанные за рубежом; принимать квалифицированные трудовые ресурсы; реализовывать с выгодой для себя собственные инновации; осуществлять обмен опытом и т.д.). Но она обязана также обладать механизмом защиты от агрессивных действий внешней среды (например, препятствовать движению инновационных продуктов, наносящих ущерб национальной безопасности; нарушающих экологию и т.д.), т.е. иметь элементы закрытой системы. Так, в качестве примера можно привести принявшую для России угрожающий характер утечку квалифицированных кадров за рубеж [10]. В настоящее время более 900 000 российских ученых и научных специалистов на постоянной основе работают в США, 150 000 — в Израиле, 100 000 — в Канаде, 80 000 — в Германии, 35 000 — в Великобритании, около 3000 — в Японии и около 25 000 — в Китае [19]. Научных кадров в России относительно много, но, без сомнения, креативно мыслящих всегда дефицит. Если за границу на лучшие условия работы и жизни выедут все они, страна окажется без главного «элемента» развития национальной инновационной системы.

И, в-четвертых, синергетическая парадигма никак не объясняет неравномерность динамики инновационного развития между государствами. Почему в одних экономических

системах противоречия нарастают быстрее, чем в других? И вследствие каких причин трансформация национальной инновационной системы в некоторых странах сопровождается катастрофическими явлениями, а в других нет?

Представители системно-кибернетического подхода – следующего инструмента исследования сложных систем – придерживаются взглядов, что любая система имеет заранее определенную цель (в синергетическом подходе цель формируется в процессе кооперации элементов системы), и к ней система стремится, самоорганизуясь вокруг нее. Таким образом, в данной методологии значительное внимание уделяется управляющему параметру. В этом состоит принципиальное отличие от синергетического подхода. Кроме того, целеполагание не может обойтись без обратной связи. Без нее невозможно определить цель и корректировать ее при динамичном развитии системы. При правильно поставленной цели система эффективно функционирует и, сообразуясь с сигналами, поступающими по каналам обратной связи, гарантированно трансформируется, адекватно реагируя на функции элементов и адаптируясь к внешней среде.

Рассматривая с точки зрения системно-кибернетического подхода развитие экономической системы России, составной частью которой является национальная инновационная система, за последние двадцать лет, необходимо отметить ее стремление к максимальному упрощению. Объясняется это намерением управляющей подсистемы (государственных органов управления), в смутное время 90-х и первого десятилетия 2000 годов, обеспечить гомеостазис страны, сотрясаемой системным кризисом.

Закономерное следствие подобной трансформации – монополии (и государство-супермонополист в том числе) как главные субъекты экономической системы. Их сущностная характеристика – отсутствие заинтересованности в инновационном развитии: зачем совершенствоваться (заниматься инновациями и участвовать в формировании инновационной системы), если основная цель предпринимательской деятельности – максимизация прибыли – достигается без кардинальных изменений элементарным повышением цен (тарифов). Отсутствие инновационной мотивации распространено в бизнесе в качестве ординарного поведения и на макроэкономическом, и на корпоративном уровне.

По этой причине развитие экономической системы России, и национальной инновационной системы в том числе, пошло точно в соответствии с действующим принципом необходимого разнообразия (открытого Эшби У.) [21], который формулируется: *чтобы эффективно управлять, субъект управления должен обладать не меньшим разнообразием, чем объект управления.* Процессы, протекавшие в российской экономике того периода, были чрезвычайно сложны для понимания, и управляющая подсистема начала упрощать управляемую подсистему под свое представление необходимого уровня разнообразия, чтобы сохранить ее от разрушения. Цель была достигнута – система стала управляемой, но плата за это – ее монополизация и практическое отсутствие рыночной конкуренции.

Насколько эффективно правильное целеполагание, видно из примера Бразилии, которая на исходе XX века имела схожие с Россией проблемы по формированию национальной инновационной системы. С 1990 года по 2009 год в России, которая выбрала путь огосударствления нефтегазового комплекса, добыча нефти уменьшилась на 7,4%, а в Бразилии, осуществившей разгосударствление национальной Petrobras на 50 нефтегазовых компаний, возросло в 3,1 раза! Латиноамериканская страна за это время совершила инновационный прорыв, став вторым в мире производителем биодизеля и крупнейшим в мире его экспортером. К августу 2009 года 94% всех производимых в Бразилии автомобилей стали приспособлены для работы на нем [4]. В это время нефтегазовый комплекс России шел другим путем – он почти втрое увеличил цены на сырую нефть и газ, эксплуатируя прежнее оборудование, технологии и не стремясь к разработке инновационных продуктов и услуг.

Таким образом, точное целеполагание представляет собой чрезвычайно важный фактор в системно-кибернетическом подходе. Обеспечить его возможно только на условиях оптимально реализуемого принципа обратной связи.

В современной экономической системе России одна из главных проблем торможения инновационного процесса кроется в неэффективности учета органами управления сигналов обратной связи. Функция управления реализуется на устарелых принципах авторитарности. В результате инновационные решения запаздывают, отличаются неадекватностью и не находят опору среди субъектов национальной инновационной системы.

Кроме того, важно отметить, что системно-кибернетический подход имеет недостаток. Данный методологический инструмент рассматривает проблемы формирования национальной инновационной системы с позиции упорядочения, оптимизации и поддержания гомеостаза системы. Но инновации – это акты постоянной генерации энтропии. А это уже отрицание гомеостаза. В силу этого невозможно применение системно-кибернетического подхода в качестве универсального методологического инструмента в исследовании проблем трансформации национальной инновационной системы на более высокую степень развития.

На наш взгляд, в национальной инновационной системе, представляющей собой сложную развивающуюся подсистему экономической системы страны, адаптация к изменению условий и развитие являются одновременно результатом согласованного действия двух механизмов - управления и самоорганизации, первый из которых подчиняется законам кибернетики, второй - синергетики. И, следовательно, две теоретические парадигмы обязаны гармонично рассредоточиться по сферам применения, поскольку национальная инновационная система представляет собой развивающуюся целостность, имеющую собственную функциональную структуру, но, одновременно, включенную в функциональное взаимодействие со своей гиперсистемой.

Кибернетический подход оптимально соответствует для описания текущего и перспективного состояния управляющей подсистемы управления (и в гиперсистеме, и внутри национальной инновационной системы). Поскольку подсистеме управления присуще формулирование целей (в виде разработки, выбора и принятия управленческих решений), а в дальнейшем также их корректировка при учете информации по каналам обратной связи.

А синергетический подход оптимально соответствует для самоорганизации управляемой подсистемы под цели, сформулированные управляющей подсистемой. Кооперационные связи между ее элементами в результате эволюционного развития выстроят структуру и создадут интегративное качество более разнообразное и эффективное, чем по административным командам управляющей подсистемы. Задача последней по каналам обратной связи оперативно отслеживать совершенствование самоорганизации национальной инновационной системы и адекватно увеличивать собственное разнообразие, повышая собственное качество.

К сожалению, в настоящее время система управления в государстве не отслеживает потребности инновационной предпринимательской среды. Сотни бизнес-ассоциаций персонифицируются властью в качестве лоббистов, а если и привлекаются к разработке решений, то в качестве «пожарных команд» [7].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аганина Л.С. Методы реализации государственной инновационной политики // Материалы научной конференции «Ломоносовские чтения – 2003». М.: ТЕИС, 2003. С. 133-134.
2. Бекетов Н.В. Проблемы национальной инновационной системы России // Проблемы современной экономики. 2009, №4 (12). С. 34-38.

3. Завлин П. Н. Инновация в рыночной экономике // Гуманитарные науки. 1997. № 3. С. 3.
4. Иноземцев В.Л., Красильщиков В.А. Modernizatsya.ru: Ordem vs. Progresso // Ведомости. 2010. №49 (2567). С. 6.
5. Касти Д. Большие системы: связность, сложность, катастрофы. М.: Мир, 1982. 216 с.
6. Келле В. Ж. Инновационная система Россия: формирование и функционирование. М.: Едито риал, ИРСС, 2003. С. 52.
7. Кувшинова О.А. Бессвязная экономика // Ведомости. 2011. № 19 (2785). С. 6.
8. Лепский В.Е. Субъектно-ориентированный подход к инновационному развитию. М.: Изд-во «Когито-Центр», Гриф ИФ РАН. 2009. 208 с.
9. Махлуп Ф. Производство и распространение знаний в США. М.: Прогресс, 1966. 462 с.
10. Моисеев А. Как перейти в режим быстрого роста экономики // Forbs Russia. 2010. <http://www.forbes.ru/ekonomika-column/finansy/61506-kak-pereiti-v-rezhim-bystrogo-rosta-ekonomiki>
11. Норт Д. Институты, институциональные изменения и функционирование экономики. М.: ФЭК «Начала», 1997. 180 с.
12. Переходы и катастрофы: опыт социально-экономического развития. / Под ред. Осипова Ю. М. и Шургиалиной И.Н. М.: Экономика, 2004. 192 с.
13. Портер М. Международная конкуренция. М.: Международные отношения, 1993. 896 с.
14. Проект «Инновационная Россия – 2020» (Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года). Минэкономразвития России, 2010 год. [http://www.vedomosti.ru/newspaper/article/252844/opyat\\_udvoenie](http://www.vedomosti.ru/newspaper/article/252844/opyat_udvoenie)
15. Санто Б. Инновация как средство экономического развития. Пер. с венг. М.: Прогресс, 1990. С. 13.
16. Соловьев В.П. Инновационная деятельность как системный процесс в конкурентной экономике (Синергетические эффекты инноваций). Киев: Феникс, 2006. 560 с.
17. Солоу Р. Экономическая теория ресурсов или ресурсы экономической теории / В кн. «Рынки факторов производства». СПб.: 1999. 114 с.
18. Татаркин А. И. Ключи к мировому рынку: инновационное предпринимательство и его возможности. М.: Экономика, 2002. С. 11–12.
19. Ускова О. Утечка мозгов: Брейн-хантеры. // Ведомости. 2010. №240 (2758) С. 11.
20. Шумпетер Й. Теория экономического развития. М.: Прогресс, 1982. 401 с.
21. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М.: Иностранная литература, 1959. 432 с.
22. Dosi G. Technical Change and Economic Theory. London: Pinter, 1988.
23. Freeman C. and Soete L. New Explorations in the Economics of Technological Change. London: Pinter, 1990.
24. L'economie expliquée par Robert Solow // Problemes econ. P., 2003. N 2808.
25. Muizel J. Ekonomiczny mechanizm procesow innowacyjnych. Warszawa. 1975. С. 10.

**Семенов Александр Иванович** – кандидат экономических наук, доцент кафедры «Менеджмента, маркетинга и логистики» Института развития бизнеса и стратегий Саратовского государственного технического университета

**Semenov Alexander Ivanovich** – Candidate of Economic Sciences, Assistant Professor of the Department “Management and Logistic”, Institute Development of Business and Strategy of Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 02.02.2011, принята к опубликованию 25.08.2011*

**А.П. Плотников, А.Е. Власова**

### **ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ТОРГОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Оценка уровня инновационной активности торговых предприятий предполагает четкость понятийного аппарата в данной сфере. Между тем, в настоящее время существуют различные подходы к определению понятия «инновационная активность» и различные методики ее оценки. В статье предлагается авторский подход к трактовке указанного понятия и оценочный показатель.*

Инновационная активность, оценка, торговые предприятия, подходы к оценке инновационной активности, индикатор инновационной активности

**A.P. Plotnikov, A.E. Vlasova**

### **PROBLEMS OF THE ESTIMATION OF INNOVATIVE ACTIVITY OF TRADE ENTERPRISES**

*Assessment of the level of innovative activity of enterprises trading involves the conceptual clarity in this area. Meanwhile, at the present time there are different approaches to the definition of "innovative activity" and different methods to assess it. The paper presents the author's approach to the interpretation of this concept and performance indicators.*

Innovative activity, evaluation, commercial enterprises, innovative approaches to the assessment activity, an indicator of innovative activity

Несмотря на достаточно большое количество исследований, посвященных вопросам методологии и методики оценки инновационной активности организаций, в данной области, особенно в сфере торговли, остается нерешенным ряд проблем. В первую очередь это касается понятийного аппарата. Существуют различные подходы к определению рассматриваемого понятия. Так, с точки зрения официальной статистики, инновационно-активными считаются организации, реализующие в период обследования мероприятия, направленные на создание инноваций, вне зависимости от того, привели ли эти мероприятия к реальному появлению инновации [1]. Такое толкование позволяет органам статистики выявлять организации, осуществляющие затраты на инновации на основе формы № 4 статистического наблюдения.

С точки зрения конкретного предприятия (особенно торгового) такой подход не совсем приемлем. Это обуславливается следующим. Де-факто торговля является одной из наиболее инновационно-активных сфер экономики и наглядно демонстрирует новые подходы к организации торговой деятельности, методы продаж и обслуживания покупателей, новые товары и т.д. Между тем, согласно официальной статистике, инновационная активность торговых предприятий невысока, при этом рассматривается преимущественно оптовая торговля. Это связано, в том числе и с тем, что значительную часть хозяйствующих субъектов торговой сферы составляют малые предприятия, которые не ведут статистической отчетности и не заполняют вышеуказанную форму. Поэтому потребность в осознанном управлении инновационной деятельностью торговых предприятий требует иного подхода.



Проанализируем теперь наиболее известные трактовки понятия «инновационная активность организаций», предложенные различными исследователями. Так, в работе [2] под инновационной активностью понимается комплексная характеристика инновационной деятельности фирмы, включающая степень интенсивности осуществляемых действий и их своевременность, способность мобилизовать потенциал необходимого количества и качества. Из данного определения можно сделать вывод, что инновационная активность характеризуется интенсивностью, т.е. степенью распространения одного явления в среде другого явления. В общем случае такие показатели отражают объем количественного показателя деятельности организации по отношению к величине имеющихся в распоряжении организации ресурсов. Так, например можно рассчитать отношение полученного полезного эффекта к объему ресурсов, использованных для получения этого эффекта, или к размеру затрат, понесенных организацией для получения этого эффекта. Кроме того, в определении говорится о влиянии инновационной активности на эффективность использования инновационного потенциала.

Несколько иной подход предлагает М.Н. Нечепуренко в исследовании [3]. По его мнению, инновационная активность характеризуется темпом осуществления инноваций и количественно определяется как произведение относительных частных индексов, которые в свою очередь представляют отношение частных показателей текущего (планового) периода к базовому (за прошлый отчетный период). В частности, к таковым отнесены: индекс инновационной затратоемкости (отношение объема инновационных затрат к объему продаж); индекс обновления (доля новых изделий в общем объеме выпуска); индекс новизны новых продуктов (средневзвешенная степень новизны всех новых продуктов). В данном случае рассматриваются лишь темпы изменения затратных показателей, что методически не совсем верно.

Никитина О.В. полагает, что инновационная активность предприятия характеризуется эффективностью и регулярностью инноваций, динамикой действий по созданию и практической реализации новшеств. Оценив уровень инновационной активности субъекта (государства, отрасли, предприятия), можно судить об уровне его конкурентоспособности, и как результат, развития в целом [4]. Чем выше инновационная активность предприятия, тем интенсивнее его инновационная деятельность, и, следовательно, целесообразнее его функционирование и существование. Таким образом, инновационная активность как мера интенсивности осуществления инноваций на предприятии – это современная стратегическая характеристика его эффективности [4]. Инновационно-активными следует считать те предприятия, которые осуществляют как внедрение технологических и продуктовых новшеств собственного авторства, так и приобретенные на основе покупки патента или лицензии, в виде новых продуктов и технологий (продуктовые и процессные инновации), их широкое распространение и получение значительного коммерческого результата. При этом инновации определяются не только изобретениями, техническими решениями, но и социальными изменениями. Например, инновационно-активными следует считать и те предприятия, которые занимаются реинжинирингом, вводят прогрессивные системы работы с персоналом, новые технологии продвижения товаров на рынок и т.п. При этом социальные инновации по полезному эффекту могут быть вполне соизмеримы с технологическими инновациями. Такой подход в полной мере применим к сфере торговли, где значительная часть инноваций связана не с проведением НИОКР, а с маркетингом, управлением продажами, персоналом и т.д.

На основе обобщения и уточнения рассмотренных определений, авторы статьи предлагают следующее: инновационная активность торгового предприятия представляет собой динамическую характеристику инновационной деятельности, отражающую соотношение темпов изменения результирующих показателей предприятия по различным аспектам и темпов изменения затрат различных ресурсов на инновационную деятельность. Такая дефиниция позволяет оценить и интенсивность и, в определенной степени, результативность использования инновационного потенциала.

Рассматривая методику оценки инновационной активности организаций, отметим следующее. Обобщение подходов, представленных в работах [4,5,6] показывает, что на практике количественная оценка инновационной активности предприятий осуществляется на основе трех основных подходов: функционального, результатного и факторно-результатного.

Функциональный подход отличается той основной особенностью, что в его рамках для оценки инновационной активности предприятия используются не характеристики конечных результатов его инновационной деятельности, а показатели интенсивности осуществления предприятием тех или иных видов или компонентов такой деятельности, в частности:

- а) реализация предприятием отдельных видов и стадий НИОКР;
- б) приобретение овеществленных новых технологий (различных видов нового технологического оборудования и оснастки);
- в) приобретение неовеществленных новых технологий (различных видов объектов интеллектуальной собственности);
- г) обучение и переподготовка персонала;
- д) осуществление элементов комплекса маркетинга для новых видов продукции.

Оценка каждого из перечисленных видов деятельности в рамках функционального подхода осуществляется с помощью натуральных и стоимостных (затратных) показателей.

Основные достоинства функционального подхода состоят в его простоте, универсальности и возможности применения при наличии минимального количества исходных данных. Вместе с тем, данный подход является весьма упрощенным и страдает двумя основными недостатками:

- не учитывает конечные результаты инновационной деятельности предприятия и, следовательно, — не позволяет оценивать ее эффективность;

- не учитывает возможности того, что отдельные учитываемые виды деятельности (например, обучение персонала) в реальности могут быть не связаны с инновационными разработками, а могут представлять собой один из видов рутинных деловых процессов.

Из-за наличия данных недостатков функциональный подход принято использовать только в качестве предварительного инструмента оценки.

Результатный подход основывается на получении оценки инновационной активности предприятия с помощью показателей, характеризующих различные аспекты конечных результатов его инновационной деятельности. В зависимости от характера таких аспектов, данный подход подразделяется на три более частных подхода: динамический, эффективностный и смешанный динамико-эффективностный.

Динамический подход предполагает проведение оценки инновационной активности предприятия с помощью показателей, характеризующих интенсивность реализуемых предприятием инновационных разработок. Наиболее распространенными из таких показателей являются показатель средней скорости разработки и внедрения предприятием различного рода новшеств, а также показатель числа инновационных разработок, осуществленных предприятием за определенный промежуток времени.

Эффективностный подход основывается на оценке инновационной активности предприятия с помощью показателей, выражающих степень достижения этим предприятием тех конечных целей его функционирования, на которые преимущественно ориентирована его инновационная деятельность. В зависимости от характера таких целей, в рамках данного подхода используются различные оценочные характеристики.

Смешанный динамико-эффективностный подход является наиболее развитым подходом результатной группы, поскольку дает возможность оценивать инновационную активность предприятия с помощью комплексных показателей, интегрирующих в себе как оценки динамики реализуемых предприятием инновационных разработок, так и оценки эффективности таких разработок. Благодаря этому в рамках данного подхода устраняются основные недостатки двух предыдущих подходов, каковыми являются:

- а) для динамического подхода — отсутствие учета экономических результатов

инновационной деятельности;

б) для эффективного подхода — отсутствие учета параметров скорости осуществления инновационных разработок.

Результатный подход в целом отличается тем основным достоинством, что он позволяет оценивать инновационную деятельность предприятия по ее конечным результатам. Благодаря этому данный подход, во-первых, обеспечивает условия для осуществления функции контроля за эффективностью инновационной деятельности предприятия, а во-вторых, делает возможным детализированный сравнительный анализ инновационной активности нескольких различных предприятий. Основным недостатком данного подхода заключается в том, что он позволяет только фиксировать тот или иной уровень инновационной активности предприятия, однако не дает возможности выявить причинно-следственные связи, определяющие динамику такого уровня. Вследствие наличия данного недостатка, результатный подход в своем чистом виде преимущественно используется для целей внешнего сравнительного анализа, а в сфере внутрифирменного управления выступает в качестве компонента более комплексного факторно-результатного подхода.

Факторно-результатный подход к оценке инновационной активности предприятия отличается тем, что его рамках подобная оценка осуществляется на основе совмещения факторных и результатных характеристик инновационной деятельности. Для оценки факторных параметров инновационной активности (в рамках данного подхода) в общем случае обычно используется комплекс таких критериев, как: объем затрат предприятия на осуществление НИОКР, приобретение объектов интеллектуальной собственности (ОИС) и финансирование межфирменных исследовательских проектов; показатели состава и числа сотрудников, временных групп, подразделений и межфирменных объединений, занятых в осуществлении НИОКР; объем новых технологий, приобретенных предприятием в рамках систем технологического трансфера; масштабы и качественный уровень материальной базы научно-исследовательской деятельности предприятия и др. В качестве критериев оценки результатных характеристик инновационной активности (в рамках данного подхода) используются как показатели обычного результатного подхода, так и ряд специфических показателей, в частности: показатели длительности отдельных стадий инновационных разработок; показатели динамики обновления портфеля продукции предприятия; объем новых технологий, переданных предприятием в рамках систем технологического трансфера; объемы экспортируемой предприятием новой продукции; число внедренных за период новых технологий и видов продукции и т.д.

В качестве основных инструментов оценки взаимосвязи между факторными и результатными характеристиками инновационной активности предприятия обычно принято использовать различные методы статистического анализа, в частности, методы ранговой статистики, корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализа.

Основным достоинством факторно-результатного подхода является возможность выявления с его помощью причинно-следственных связей, определяющих эффективность инновационной деятельности предприятия. В связи с этим, данный подход имеет наибольшее распространение в системах внутрифирменного управления и применяется для выработки и обоснования управленческих решений, направленных на оптимизацию инновационной политики предприятий.

Таким образом, факторно-результатный подход после определенной модификации, учитывающей специфику торговой деятельности, вполне может быть применен в исследуемой сфере.

Доводя данный подход до конкретных показателей, хотелось бы отметить следующее. В монографии [7], где рассматриваются проблемы комплексной оценки эффективности инновационного развития производственных организаций, Плотниковым А.П. и Суязовым В.Н. приведен обобщающий показатель эффективности такого развития – индикатор интенсивности, отражающий отношение результативных показателей инновационной

деятельности (темп изменения производительности труда работников, занятых инновационной деятельностью, темп изменения отдачи нематериальных активов, используемых в инновационной деятельности организации, темп изменения фондоотдачи основных средств, занятых в инновационной деятельности) к затратам на ее осуществление (темп изменения расходов на оплату труда работников, занятых инновационной деятельностью, темп изменения среднегодовой стоимости нематериальных активов, используемых в инновационной деятельности организации, темп изменения среднегодовой стоимости основных средств, занятых в инновационной деятельности) в динамике. Данный показатель как раз и характеризует инновационную активность предприятия с позиций факторно-результатного подхода.

Однако в торговле его применить достаточно сложно, поскольку торговым предприятиям (в отличие от производственных) трудно, а зачастую и невозможно выделить работников и оборудование, задействованных в инновационной деятельности. В тоже время, на основе анализа и экспертных оценок можно определить изменение выручки и прибыли от инновационной деятельности, текущие затраты на инновационную деятельность.

Поэтому авторы статьи модифицировали указанный показатель, и он принял следующий вид:

$$T_{\text{инт}} = (T_{\text{то}} \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_{\text{рто}}) / (T_{\text{и}} \cdot T_{\text{инн}} \cdot T_{\text{з}}) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $T_{\text{инт}}$  – темп изменения инновационной активности торгового предприятия, %;

$T_{\text{то}}$  – темп изменения товарооборота торгового предприятия в результате инновационной деятельности, %;

$T_{\text{пр}}$  – темп изменения прибыли от инновационной деятельности торгового предприятия, %;

$T_{\text{рто}}$  – темп изменения рентабельности товарооборота, %;

$T_{\text{и}}$  – темп изменения общей издержкостности товарооборота (отношение суммы текущих затрат к объему товарооборота), %;

$T_{\text{инн}}$  – темп изменения инновационной издержкостности товарооборота (отношение суммы текущих затрат на инновационную деятельность к объему товарооборота), %;

$T_{\text{з}}$  – темп изменения затрат на инновационную деятельность, %.

Инновационная активность предприятия считается достаточной, если значение показателя больше 100 %. Достоинством данного подхода является комплексность и учет не только затрат, но и результатов инновационной деятельности предприятий торговли. Состав рассматриваемых показателей можно расширить, но это потребует действенной системы управленческого учета инновационной деятельности, которая пока отсутствует на отечественных предприятиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наука России в цифрах: 2009. Стат. Сб. М.: ЦИСН, 2009. 198 с.
2. Поляков В.В. Мониторинг инновационных процессов в научно-технической сфере // Инновации. 2003. №5. 79 с.
3. Нечепуренко М.Н. Организационно – экономический механизм управления устойчивым развитием предприятия на основе инновационной активности // Автореферат на соискание ученой степени д.э.н. М.: 2007. 40 с.
4. Трифилова А.А. Управление инновационным развитием предприятия. М.: Финансы и статистика, 2003. 173 с.
5. Никитина О.В. Методы оценки инновационной активности промышленных предприятий // Автореферат на соискание ученой степени к.э.н. СПб.: 2007. 24 с.
6. Управление инновационной активностью предприятия: учеб. пособие / сост. А.И. Попов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 124 с.
7. Плотников А.П., Суязов В. Н. Оценка эффективности инновационного развития производственных организаций: монография. М.: Восход, 2010. 128 с.

**Плотников Аркадий Петрович** –  
доктор экономических наук, доцент,  
заведующий кафедрой менеджмента,  
коммерции и права Саратовского  
государственного технического университета,  
Саратовский институт (филиал) РГТЭУ

**Plotnikov Arkady Petrovich** –  
Doctor of Economical Sciences, Associate  
Professor, Head of Department «Management,  
Commerce and Law», Saratov State Technical  
University, Saratov Institute (branch) RSTEU

**Власова Анна Евгеньевна** –  
аспирант Саратовского института (филиала)  
РГТЭУ

**Vlasova Anna Evgenevna** –  
Post-Graduate Student, Saratov Institute  
(branch) RSTEU

*Статья поступила в редакцию 02.02.2011, принята к опубликованию 25.08.2011*

**А.В. Арсланов**

### **ФОРМИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЦИОННЫМ ОБЪЕДИНЕНИЕМ**

*В статье представлены основные компоненты концепции формирования эффективной системы управления интеграционным объединением как экономической системой. Обоснована необходимость применения системного подхода к осуществлению процесса управления вертикально-интегрированной Компанией ОАО «Татнефть». Систематизированы научные подходы в управлении такими структурами, как стратегический, инновационный, ресурсный, маркетинговый и логистический. Определены основные ключевые направления поиска резервов достижения стратегической цели и обеспечения конкурентоспособности Компании.*

Топливо-энергетический комплекс, интеграционное объединение, конкурентоспособность

**A.V. Arslanov**

### **BUILDING OF THE EFFICIENT CORPORATION MANAGEMENT SYSTEM**

*The author writes about the conception of building of the efficient corporation management system. The reasonable necessity of application of system approach to operation of vertical-integrated Joint-Stock Company «Tat-Oil» sets out in this article. Strategies, innovation, resource, marketing and logistic are the principal components of a corporative management. The key ways of search the resources of the strategy goal achievement and the receipt of competitive strength are described in detail.*

A fuel and energy complex, vertical-integrated company, competitiveness

Развитие топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России в современных условиях всё в большей степени зависит от обеспечения устойчивой восполняемости топливно-энергетических запасов. Решение такой стратегической задачи возможно на основе системного подхода в управлении не только комплексом в целом, но и интеграционными объединениями, входящими в топливно-энергетический комплекс страны, регионов.

ОАО «Татнефть» – одна из крупнейших отечественных нефтяных компаний, осуществляющая деятельность в статусе вертикально-интегрированной группы. В состав ОАО «Татнефть» входят: нефтегазодобывающие, нефтегазоперерабатывающие, нефтехимические производства; предприятия по реализации нефти, газа, нефтегазопродуктов и нефтехимии; блок сервисных структур.

Основная территория деятельности Компании – Российская Федерация. Компания считает своей стратегической целью обеспечение устойчивой восполняемости топливно-энергетических запасов страны и региона. По оценке независимой международной консалтинговой компании «Miller&Lents», доказанные разрабатываемые и неразрабатываемые запасы ОАО «Татнефть» на начало 2009 года составили 878,2 млн. тонн нефти. «Татнефть» владеет большей частью лицензий на разведку и добычу нефти на территории Республики Татарстан и расширяет ресурсную базу на основе освоения

месторождений на других территориях. Наряду с укреплением ресурсной базы и повышением объёмов добычи, к приоритетным задачам Компании относятся: развитие нефтегазоперерабатывающих мощностей; расширение рынков сбыта нефти, газа и нефтехимической продукции; рост сети АЗС под корпоративным брэндом. Однако разразившийся финансовый кризис в последние годы ухудшил положение дел в Компании.

Анализ показал, что поставка нефти на экспорт (дальнее зарубежье) составляет 14641,4 тыс. тонн. Поставка нефти на экспорт (ближнее зарубежье) – 1 560,4 тыс. тонн. Поставки на внутренний рынок – 8 232,1 тыс. тонн. Т.е. поставки на внутренний рынок меньше, чем экспорт нефти. Общий объём реализации нефтепродуктов на рынках России и Украины составляет всего 1,803 млн. тонн. Поставки нефти на внутреннем рынке в основном распределяются на НПЗ ОАО «ТАИФ-НК» и ОАО «Московский НПЗ». Для обеспечения нефтепродуктами рознично-сбытовой сети ОАО «Татнефть» (Татнефть-АЗС-Центр, Татнефть-АЗС-Запад, Татнефть-АЗС-Юг и Татнефть-АЗС-Сибирь) закупки осуществлялись на Московском, Уфимских, Самарских НПЗ, НПЗ ОАО «ТАИФ-НК» и других заводах, а также осуществлялись поставки собственных нефтепродуктов с ЕНПУ НГДУ «Елховнефть» (табл. 1).

Как показывает анализ данных табл. 1, в целом за период 2007-2008 гг. поставка ресурсов ОАО «Татнефть» по основным направлениям снижается. Такая тенденция сохраняется и в текущем периоде. Проведённый автором анализ позволил сделать вывод о том, что в целях обеспечения устойчивого развития Компании необходимо формирование наиболее эффективной системы управления таким объединением на основе применения современных научных подходов.

Прежде всего, следует отметить, что особенности системы управления интеграционными образованиями на современном этапе тесно связаны с изменением стратегических ориентиров в их деятельности. Основными экономическими целями таких объединений являются повышение эффективности производства, доходность, завоевание новых рынков, обеспечение безопасности и удовлетворение потребностей коллектива

Таблица 1

Поставка ресурсов ОАО «Татнефть» по следующим основным направлениям  
(тыс. т)

НАИМЕНОВАНИЕ	2007	2008	+/-	%
Экспорт ДЗ	11 615,8	14 641,4	3 025,6	126,0
Экспорт БЗ	5 211,4	5 211,4	-3 651,0	29,9
НПЗ России:	8 410,3	8 232,1	-178,2	97,9
<i>в том числе:</i>				
НПЗ ОАО «ТАИФ-НК»	6 532,3	6 294,6	-237,7	96,4
ОАО «Московский НПЗ»	1 783,5	1 789,7	6,2	100,3
ОАО «НОРСИ»	-	82,9	82,9	-
Прочие поставки	94,5	64,9	-29,6	68,7

Однако многие предприятия утратили практику плановой работы - стратегических проработок на срок более полугода, а новые коммерческие структуры не имеют опыта подобного рода. При этом почти каждое предприятие и объединение сегодня, в условиях кризиса, имеет набор достаточно типичных проблем: падение объёмов и рентабельности поставок; потеря традиционных рынков сбыта продукции и затруднения в поиске новых; недостаточная согласованность в действиях высшего звена управления; отсутствие чётко выраженных направлений развития; недостаточность заделов новой продукции, новых технологий.

Компания «Татнефть» реализует стратегию эффективного наращивания запасов и расширения территории своего присутствия за пределами как Республики Татарстан, так и

Российской Федерации. В рамках стратегии развития Компании проводится реструктуризация, направленная на повышение эффективности управления производством, обеспечение прозрачности затрат, оптимизации трудовых, материальных и финансовых ресурсов. Производственная деятельность Компании отвечает высоким стандартам экологической и промышленной безопасности. Компания «Татнефть» проводит социально ориентированную политику и вносит весомый вклад в развитие национальных программ по здравоохранению, образованию, спорту, поддержке малого и среднего бизнеса.

В соответствии с переходом формирования госбюджета на трёхлетний цикл и в рамках совершенствования корпоративного бизнес-планирования, в Компании разработан стандарт «Система сценарного планирования финансово-хозяйственной деятельности ОАО «Татнефть» на трёхлетний период». Стандарт определяет порядок формирования, на основе стратегии развития Компании, трёхлетнего прогноза финансово-хозяйственной деятельности ОАО «Татнефть» в зависимости от конъюнктуры цен на нефтяном рынке. Основные цели стандарта: формирование прогноза финансово-хозяйственной деятельности, инвестиционной программы и бюджета ОАО «Татнефть» на три года и обеспечение предсказуемости развития Компании на среднесрочную перспективу; повышение точности прогнозирования за счёт разработки сценарных вариантов развития экономической ситуации; регламентация механизма сбалансированности затрат в зависимости от предполагаемых доходов и приоритетов социально-экономической политики Компании на планируемый период. Базовые условия трёхлетнего планирования ОАО «Татнефть» формируются на основе:

1. макроэкономических параметров развития экономики на планируемый период, принятых Министерством экономического развития РФ и Министерством финансов РТ;
2. программы стабилизации добычи нефти.

Сценарное планирование сохраняет действующие в Компании инструменты планирования – фонд экономии затрат и внутренний возвратный источник. В основе системы сценарного планирования находится формирование базового прогноза финансово-хозяйственной деятельности, разрабатываемого на принципах консервативного подхода в выборе исходных макроэкономических условий (неблагоприятных) и минимизации корпоративных затрат.

Однако приостановка финансового кризиса делает чрезвычайно актуальной проблему стратегического подхода в управлении развитием ОАО «Татнефть», включая видение и миссию, анализ стратегических факторов, стратегическое планирование, выбор стратегии, проблемы формирования эффективной системы управления реализацией выбранной стратегии. Следует учитывать, что только при наличии чётко отработанных вариантов стратегии Компании в целом, её подразделения могут формировать систему взаимосвязанных маркетинговых, производственных, финансовых и научно-технических стратегий, а также разрабатывать механизмы реализации этой стратегии. При этом если предоставить руководителю достаточно простые процедуры формирования стратегии и обсудить расстановку приоритетов, можно разработать стратегическую программу развития, реализация которой обеспечит возможность преодолеть негативные тенденции и перейти к конкурентоспособному развитию Компании.

Однако стратегическое управление не ограничивается планированием, оно заключается в том, чтобы:

1. предвидеть (изучать будущее и устанавливать программу действий);
2. организовывать (строить «двойной организм» компании – материальный и социальный);
3. распоряжаться (приводить в действие персонал подразделений и компании в целом);
4. согласовывать (связывать и объединять действия);
5. контролировать (протекание всех действий согласно установленным и отданным распоряжениям).



В современных условиях, в целях реализации стратегии, необходимо разрабатывать адаптационные модели поведения Компании, позволяющие понимать и оценивать то, что сдвиги в экономическом, а следовательно, и в социально-политическом укладе жизни страны необратимы, системны: они деформируют традиционные цели хозяйствующих субъектов, преобразуют внешнюю среду, заставляют пересматривать ценностные характеристики социально-экономических отношений и плохо регулируемы. Необходимо подчеркнуть, что в таких условиях как никогда ранее возрастает степень свободы творческого мышления в выборе определенных линий поведения Компании. Это означает, что можно осуществлять переустройство основы производственных отношений, совместно с трудовыми коллективами, вводить адекватную систему оплаты труда и материального стимулирования, распоряжаться чистой прибылью, создавать без излишних согласований новые структуры управления. Разработка и реализация стратегии Компании по существу сводится к управлению экономикой на микроуровне, для этого необходимо построение соответствующей системы управления, выполняющей следующие основные функции:

1. направляющую – обоснование стратегических целей и выбор главных путей их достижения;
2. координирующую – балансировка важнейших ресурсных ограничений и согласование противоречивых интересов всех участников бизнес-процессов;
3. стимулирующую – активизация движущих сил развития.

Опыт показывает, что при сложности выполнения всех стоящих задач, одной из наиболее трудноосуществимых является последняя из названных функций. Она направлена на то, чтобы заинтересовать работников в успехе общего дела и в реализации его способностей и возможностей. Как правило, традиционными методами такую задачу практически решить удаётся лишь частично. По оценкам специалистов, в народном хозяйстве страны в настоящее время используется менее половины творческого потенциала занятых в нём работников. В этой связи разработка и реализация стратегии зависит от мер в сфере мотивации людей, в сфере взаимодействия их интересов, выгоды. Для этого нужно иметь чёткое представление о составе и структуре экономических интересов в управляемом коллективе, знать и постоянно учитывать интересы не только общие для всей компании, но и специфические – коллективов подразделений (основных, вспомогательных, управленческих), а также различных категорий работников (по полу, возрасту, уровню квалификации). Безусловно, без таких знаний не может эффективно действовать внутренний механизм экономического управления, механизм стимулирования и мотивации труда.

Особо следует подчеркнуть, что для обеспечения устойчивого конкурентоспособного развития Компании необходимо провести ряд серьёзных изменений, в том числе и структурных, и перейти на инновационный путь развития. В ОАО «Татнефть» сейчас ведутся опытно-промышленные работы по разработке месторождений сверхвязкой нефти. Для обеспечения высокой экологичности производства в «Татнефть» будут применены малоотходные технологии. Компания участвует в строительстве Комплекса нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов (ОАО «ТАНЕКО») в Нижнекамске. Новый комплекс будет состоять из нефтеперерабатывающего завода, завода глубокой переработки нефти и нефтехимического завода по производству продукции на основе ароматических углеводородов. Комплекс позволит получать все виды моторных топлив в соответствии с действующими экологическими нормами. С вводом в эксплуатацию нового комплекса Компания сможет обеспечить потребность розничной сети АЗС «Татнефть» в экологически безопасных моторных топливах.

Анализируя ключевые характеристики Компании, известные подходы к оценке и повышению конкурентоспособности, можно сформулировать основные принципы концепции обеспечения её конкурентоспособности в долгосрочной перспективе. Прежде всего, задача обеспечения конкурентоспособности включает обеспечение конкурентоспособности продукции и собственно конкурентоспособности подразделений и компании в целом. Следует выделять разные критерии конкурентоспособности в

зависимости от горизонта планирования и управления Компанией. Так, основным показателем конкурентоспособности на оперативном уровне является интегральный показатель конкурентоспособности продукции, на тактическом уровне конкурентоспособность обеспечивается общим финансово-хозяйственным состоянием дел в подразделениях и компании в целом и характеризуется комплексным показателем, а на стратегическом уровне конкурентоспособность характеризуется инвестиционной привлекательностью, критерием которой является рост стоимости Компании.

При этом необходимо исходить из основополагающего принципа – конкурентоспособность Компании должна отражать продуктивность использования ресурсов. Этот принцип реализует ресурсный подход в управлении интеграционным объединением и справедлив как на уровне отдельного подразделения, так и на уровне экономики Компании в целом. Можно утверждать, что для обеспечения конкурентоспособности Компания должна постоянно заботиться о наиболее полном и эффективном использовании имеющихся в её распоряжении ресурсов, а также приобретаемых для будущего производства всех видов ресурсов.

При этом конкурентоспособность не является имманентным качеством Компании. Это означает, что конкурентоспособность может быть обнаружена (оценена) только в рамках группы компаний, относящихся к одной отрасли, либо компаний, выпускающих товары-субтитры. Таким образом, конкурентоспособность компании – понятие относительное, которое определяется как способность обеспечить лучшее предложение по сравнению с конкурирующей компанией [1]. Конкурентное преимущество – это положение компании на рынке, позволяющее ему преодолевать силы конкуренции и привлекать покупателей [2]. Значимое конкурентное преимущество «Татнефти» составляет комплекс нематериальных активов, включающий уникальные технологии и «ноу-хау» в области разработки месторождений, нефтегазодобычи и другие.

Как правило, конкурентные преимущества реализуются на уровне стратегических единиц бизнеса и составляют основу деловой стратегии компаний. При этом важно определить основные ключевые направления поиска резервов достижения стратегической цели. К таким резервам можно отнести:

1. формирование механизма активного развития подразделений Компании;
2. расширение хозяйственной самостоятельности структурных единиц;
3. развитие системы бюджетирования;
4. внедрение эффективных систем маркетинга и стимулирования сбыта;
5. внедрение системы управления затратами;
6. определение инвестиционных приоритетов;
7. рассмотрение и внедрение инновационных предложений;
8. упорядочение делопроизводства и документооборота;
9. стимулирование персонала на инновационную деятельность;
10. создание команды единомышленников.

В целом стратегическое управление сводится к достижению стратегических конкурентных преимуществ. Конкурентное преимущество должно быть таким, чтобы его можно было использовать незамедлительно, исходя из конкретных условий. Автор считает, что основные направления, на которых ОАО «Татнефть» может достичь конкурентных преимуществ, следующие.

1. Выбор рынков сбыта. Конкурентные преимущества будут тем выше, чем больше рынков, на которых её доля была бы большей по сравнению с ведущими конкурентами. Следует активизироваться на быстро растущих новых рынках и стремиться к стабильности на традиционных рынках. Также сворачивать свою деятельность на тех рынках, которые не могут обеспечить норму прибыли, большую или равную средней внутрифирменной.

2. Дифференциация продукции. Дифференциация означает специфическое сочетание качества продукта (товара или услуги) и его цены, согласованные со спросом и структурой

затрат, соответствующих тому или иному рынку сбыта. Чем более дифференцирована продукция, тем больше у Компании конкурентных преимуществ.

3. Структура инвестиций. Здесь под инвестициями понимается осуществление каких-либо экономических проектов в настоящем с расчётом получить доходы в будущем.

4. Структура финансов. Финансово-экономическая модель должна обеспечивать выполнение корпоративной миссии.

5. Структура управления. Деловое управление должно выполнять функции, отражающие основные фазы деятельности: развитие, маркетинг, логистика, производство, финансы, управление.

Автор считает, что в целях формирования эффективной системы управления Компанией принципиально важно обеспечить оптимальное сочетание логистического и маркетингового подходов. Это, прежде всего, позволит обеспечить повышение эффективности функционирования товаропроводящей сети в сфере распределения. При этом решение задачи оптимизации системы распределения продукции должно предполагать осуществление целого комплекса совместных мероприятий. Во-первых, определение ёмкости неосвоенных рынков сбыта продукции и прогнозирование их развития, сегментирование рынка. Во-вторых, определение количества и мест расположения посредников, выбор оптимальных условий поставки, оплаты, складирования и хранения продукции.

Решение задачи по оптимизации каналов товародвижения должно предусматривать выполнение следующих логистических и маркетинговых мероприятий. Во-первых, эффективный мониторинг и контроль рынков сбыта, анализ платёжеспособного спроса, совершенствование структуры управления сбытом, оптимизация товарных и информационных потоков, сокращение затрат на товародвижение. Во-вторых, комплекс мероприятий по эффективному взаимодействию с конечными потребителями и логистическими посредниками, а также мероприятия по управлению движением внутренних и внешних товарных потоков, использованию новых технологий сбыта продукции. В современных условиях оптимизация каналов распределения становится всё более эффективным инструментом экономии финансовых и материальных ресурсов в логистической цепи «поставщик – производитель – потребитель».

Система логистики, наряду с маркетингом, составляет фундамент стратегии развития Компании в соответствии с технологическими и производственными возможностями. Именно логистика охватывает планирование и управление процессами снабжения и доведения продукции до потребителя. Каждая из четырех составляющих – маркетинг, технология, производство, логистика – может служить весомым конкурентным преимуществом, но, действуя в совокупности, они гарантируют больший эффект в обеспечении конкурентоспособности Компании в целом, обеспечивая синергетический эффект.

На основе вышеизложенного можно сформулировать основные принципы развития Компании в будущем:

1. интеграция и оптимальное комбинирование нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств;
2. максимальное создание добавочной стоимости продукта;
3. замещение импорта нефтехимической продукции на базе развития среднего и малого бизнеса в области переработки полимеров;
4. минимальное потребление сырья извне и продажа на сторону промежуточных продуктов;
5. применение малоотходных и энергосберегающих технологий;
6. минимальное тепловое загрязнение окружающей среды;
7. максимальная энергонезависимость.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Фаей. Курс МВА по стратегическому менеджменту. М.: Альпина Паблишер, 2002. С. 25-31.
2. В.Д. Маркова, С.А. Кузнецова. Стратегический менеджмент. М.: ИНФРА-М, Новосибирск: Сибирское соглашение, 2008. С. 125-127.

**Арсланов Алмаз Владикович** – аспирант заочной формы обучения кафедры антикризисного управления Поволжской академии государственной службы им. П.А. Столыпина

**Arslanov Almaz Vladikovich** – Post-graduate Student of the Department “Crisis Management”, Volga Region Academy for Civil Service named by P.A. Stolypin

*Статья поступила в редакцию 01.02.2011, принята к опубликованию 19.08.2011*

УДК 331.5

**Л.В. Санкова, А.В. Косарева**

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММ АКТИВНОЙ ПОЛИТИКИ ЗАНЯТОСТИ: ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ**

*В статье рассматриваются теоретические подходы и методология оценки эффективности активной политики на рынке труда. Анализируется современное состояние рынка труда в России, возможности и ограничения оценки реализуемых программ. Подчеркивается необходимость определения более четких требований к ожидаемым результатам программ; дальнейшей разработки методологии оценки их эффективности (в том числе с использованием зарубежного опыта); расширения информационной базы для проведения оценки.*

Рынок труда, безработица, рабочие места, трудоустройство, активные программы, политика занятости, эффективность, методики оценки, переобучение, общественные работы

**L.V. Sankova, A.V. Kosareva**

### **EVALUATION OF THE ACTIVE LABOR MARKET POLICY: THEORY AND METHODOLOGY**

*The article deals with the theoretical approach and methodology of assess the effectiveness of the active labor market programs. Temporary-labor market conditions in Russia, the capabilities and limitations of programs assessing are analyzed. The need to define more clearly the requirements for the expected results of programs; further develop methodology for assessing their effectiveness (including the use of foreign experience), expanding the information base for evaluation are emphasized.*

Labor market, unemployment, jobs, employment, active programs, employment policies, performance, evaluation methodology, retraining, public works-governmental

В современных условиях сокращение безработицы и достижение эффективной занятости являются одними из ключевых задач социально-экономического развития, во многом определяя не только стабильность экономики страны, но и ее перспективы в

глобальном мире. Показатели уровня безработицы, ее продолжительности, напряженности на рынке труда относятся к числу основных индикаторов развития экономики. Осуществление посткризисной модернизации экономики поставило институт политики занятости перед «вызовом», требующим не только качественных инноваций и изменения традиционных технологий, успешно реализуемых в предшествующий период, но и новых подходов к оценке эффективности. Несмотря на признание определяющей роли активных программ на рынке труда в сокращении безработицы и восстановлении сбалансированности на рынке труда, в последние годы подходы к оценке их эффективности подвергаются пересмотру.

Актуализация исследования эффективности активных программ на рынке труда определяется целым рядом причин. Во-первых, последствиями мирового экономического кризиса. Во-вторых, ограниченностью воздействия на занятость традиционных мер стимулирования эффективного спроса. Данные меры сталкиваются с риском роста инфляции. В-третьих, трудностями практической реализации и отсутствием быстрого эффекта большинства структурных мер, направленных на предложения на рынке труда (в частности, повышение гибкости рынка труда и др.). Таким образом, именно активные программы на рынке труда в большей мере способны прямо воздействовать на безработицу и повышение эффективности занятости.

Необходимость углубления анализа эффективности данного вида программ на рынке труда резко возросла в условиях современного кризиса. Численность безработных во всем мире, по официальным данным, составила в 2010 году 205 млн. чел. По прогнозам МОТ, в 2011 году глобальный уровень безработицы составит 6,1% или 203,3 млн. человек. 55% общего прироста численности безработных во всем мире за 2007-2010 гг. приходилось на развитые страны и государства ЕС. В то время как в странах Юго-Восточной Азии и Тихого океана уровень безработицы в период кризиса в среднем не повысился. Рекордный уровень безработицы был характерен для стран ЦВЕ и СНГ (10,4% в 2009г., 9,6% в 2010г.) [6]. В докладе МОТ «Глобальные тенденции занятости – 2011 г.: вызов, связанный с восстановлением рабочих мест» подчеркивается, что наряду с улучшением основных макроэкономических показателей наблюдается дифференциация процессов восстановления рынков труда в различных группах стран после мирового экономического кризиса.

Ситуация на рынке труда в России оказалась в конце 2010г. и в 2011г. лучше, чем прогнозировалось в начале года. Так, в первом квартале 2011 г. уровень безработицы составлял 7,6%. Однако общая безработица является, конечно, важным, но скорее фоновым показателем для государственной политики занятости (в отличие от уровня регистрируемой безработицы). Компаративный анализ показывает, что данный показатель ниже, чем уровень безработицы в таких странах как Франция, США, Италия, Канада, Великобритания и выше, чем в Германии, Японии, Австралии. При этом уровень безработицы, напряженность на рынке труда и период поиска работы различались по регионам России (рис. 1). В частности, наибольший показатель уровня безработицы в 2010 г. отмечался в Северо-Кавказском ФО, минимальное значение – в Центральном ФО. Во 2 квартале 2011г. более 30% безработных ищут работу в течение 12 мес. и более, среднее время поиска работы - 8,1 мес., причем 73,6 процентов безработных имеют опыт работы. В условиях кризиса российская статистика безработицы не дает полной картины состояния рынков труда в регионах, поскольку они адаптируются к кризису не только через высвобождение, но и через рост неполной занятости. Помимо открытой безработицы в условиях кризиса в российской экономике получила распространение «псевдозанятость» в виде неполной занятости (административные отпуска и неполная рабочая неделя), а также в форме занятости на общественных и временных работах. При этом более 42% всех, занятых на общественных и временных работах, сконцентрированы в Приволжском федеральном округе.

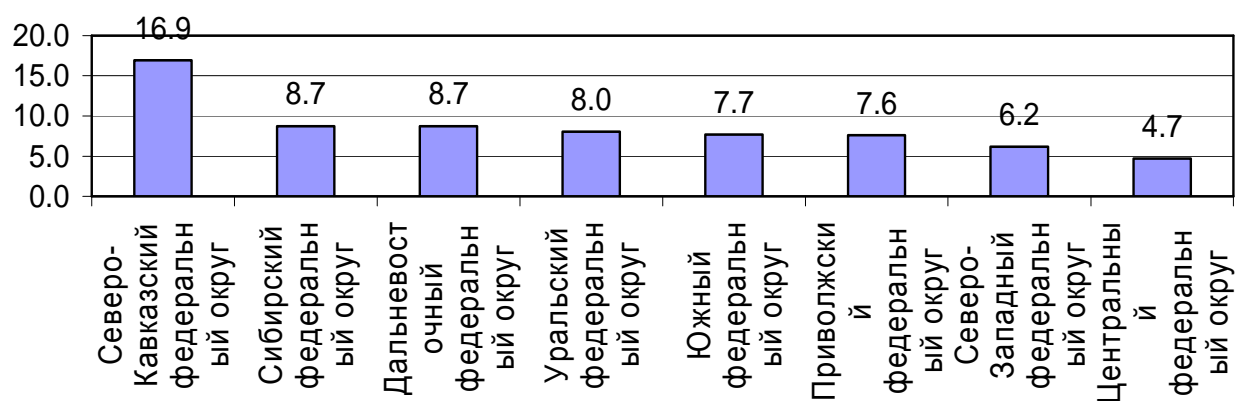


Рис.1. Уровень безработицы в субъектах РФ, 2010 г. Построено по данным [12]

Совершенствование политики в области содействия занятости предполагает углубление теоретического анализа активных программ, критериев определения их эффективности и развития статистической базы и инструментария оценки.

Прежде всего, отметим, что в мире складывается понимание политики занятости как инструмента наиболее полной реализации трудового, интеллектуального потенциала населения, а помощь безработным рассматривается лишь как фрагмент этой политики. Следует отметить, что именно активные программы занятости населения в значительной мере способствуют решению задач, поставленных перед политикой занятости. Внесем терминологическую ясность. Существует несколько интерпретаций активной политики на рынке труда. В общем плане активные программы содействия занятости представляют собой мероприятия по оказанию гражданам содействия в поиске работы и помощи в трудоустройстве и обеспечению на этой основе сокращения продолжительности фрикционной и структурной безработицы. На рис. 2 представлены активные программы, реализуемые на рынке труда. При этом каждый тип активных программ может реализовываться лишь через определенные каналы. Значимость активной политики позволяет зарубежным исследователям утверждать, что ее институционализация могла бы обеспечить ее функционирование как «автоматического стабилизатора» в экономике.



Рис. 2. Активные программы политики занятости, реализуемые на рынке труда (составлено авторами)

Несмотря на признание значимости активных программ на рынке труда всеми исследователями, вместе с тем продолжает оставаться дискуссионным целый ряд теоретических представлений об эффективности активных программ, методах ее оценки. Вопрос об оценке эффективности государственных программ и услуг на рынке труда стоит довольно остро. В указе Президента РФ № 825 от 28.06.2007 г. «Об оценке эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов РФ» предлагалось научным кругам разработать методику оценки эффективности государственных программ.

Под оценкой эффективности активных программ на рынке труда мы понимаем анализ работы программ, произведенного ими эффекта на микро- и макроуровнях, а также сравнение полученных результатов с определенными критериями. В связи с этим мы

проанализируем различные аспекты, связанные с оценкой эффективности программ активной политики занятости, и обозначим возможные подходы к ней. Традиционно макроэкономический анализ политики на рынке труда осуществлялся с использованием графического аппарата кривой Филлипса, кривой Бевериджа, моделей Лайарда-Никелла. Эффективность активных программ государства на рынке труда в основном анализируется в развитых странах, в странах ЦВЕ с переходной экономикой следующими зарубежными авторами: Дж. Хекман, Х. Ишимара, П. Тодд, Дж. Ключе, Х. Леманн и К. Шмит, Дж. Хоули, Д. Кард, А. Вебер и др. [2, 4, 5]. В то же время в России попытки оценить эффективность активных программ на рынке труда, пока немногочисленны. В данном контексте можно выделить работы Л. Ниворожкиной и А. Ниворожкина; А.Ахмедова, И. Денисовой и М. Карцевой; С.Ю. Рощина и А.П. Мартыновой; Ф.Т. Прокопова; Т.Я. Четверниной и др. [1, 7, 9, 11].

В международной практике технологии оценки эффективности активных программ занятости включают сравнение не только показателей трудоустройства, но и последующей трудовой карьеры двух групп безработных (с аналогичными гендерными, возрастными, образовательными, профессиональными параметрами): принявших и не принявших участие в той или иной программе.

Рассмотрим некоторые подходы отечественных исследователей к оценке эффективности программ активной политики занятости. Так С.Н. Смирнов предлагает определять социальную и экономическую эффективность политики занятости в регионе на основе использования ряда показателей, содержащихся в действующей статистической отчетности. Социальную эффективность предлагается оценивать как соотношение численности безработных, снятых с учета по всем основаниям в течение календарного периода, к численности безработных на конец календарного периода. Однако применение данной методологии оценки сталкивается со следующими дискуссионными моментами: во-первых, при росте данного показателя возможен и рост безработицы; во-вторых, неправомерно сводить снижение безработицы только к результативности деятельности службы занятости, что не учитывает влияния изменения социально-экономических (в частности, улучшение макроэкономической ситуации) и других факторов в регионе (стране) на безработицу. Логичным продолжением предлагаемого С.Н. Смирновым [10] метода оценки эффективности программ на рынке труда является определение экономической эффективности государственной политики занятости в регионе:

$$\text{ЭЭПЗ} = \text{РБ} / \text{СЭПЗ} \quad (1)$$

где РБ – расходы средств бюджета за календарный год;  
СЭПЗ - социальная эффективность политики занятости, коэффициент;  
ЭЭПЗ - экономическая эффективность политики занятости в регионе в календарном году.

Из-за относительности показателя СЭПЗ возможно снижение затрат на условную единицу социальной эффективности (то есть повышение экономической эффективности политики занятости) при фактическом росте безработицы.

Согласно Т.Я. Четверниной [11], расстановку приоритетов при выборе активных программ следует сочетать с оценкой их эффективности, а при формировании любой из них необходима предварительная выработка критериев и методов оценки ее эффективности. Анализ эффективности активных программ предполагает определение т.н. *нетто-эффекта* от реализации (в какой мере позитивные изменения явились результатом действия программы, а в какой они произошли бы без программы).

Ф. Т. Прокопов [9] определяет эффективность функционирования рынка труда и проводимой государственной политики как способность нейтрализовать действие неблагоприятных факторов и снизить уровень безработицы. Объем безработицы меняется под влиянием двух основных потоков - входа в число безработные и выхода из них, поэтому оценивать результативность политики занятости на основе объемных показателей (наиболее



распространенный подход) не всегда корректно. В связи с этим введены такие показатели как коэффициент входа, коэффициент выхода и коэффициент влияния. Предлагаемый подход обладает большими аналитическими возможностями.

В ряде работ отечественных исследователей проблема оценки эффективности программ активной политики занятости неправомерно сводится к оценке эффективности деятельности ГСЗН.

Анализ теоретических подходов и методологии оценки эффективности активных программ занятости позволяет выделить ряд аспектов, усложняющих оценку.

Во-первых, особенности понимания эффективности применительно к программам, реализуемым на рынке труда. Концептуальное понятие эффективности заключается в определении соотношения полезного результата в сравнении с затраченными ресурсами. Согласно традиционным подходам программа считается эффективной, если она ведет к сокращению периода между моментом регистрации в качестве безработного (или первичным обращением в службу занятости) и моментом трудоустройства. Эффективность программ, реализуемых ГСЗН, косвенно в наиболее общем плане может быть оценена через показатель доли трудоустроенных граждан, обратившихся в ГСЗН. Например, динамика данного показателя представлена на рис. 3. Помимо этого, каждый территориальный орган службы занятости проводит самостоятельную оценку эффективности активных программ (в частности, профессионального обучения) с использованием дополнительных критериев.

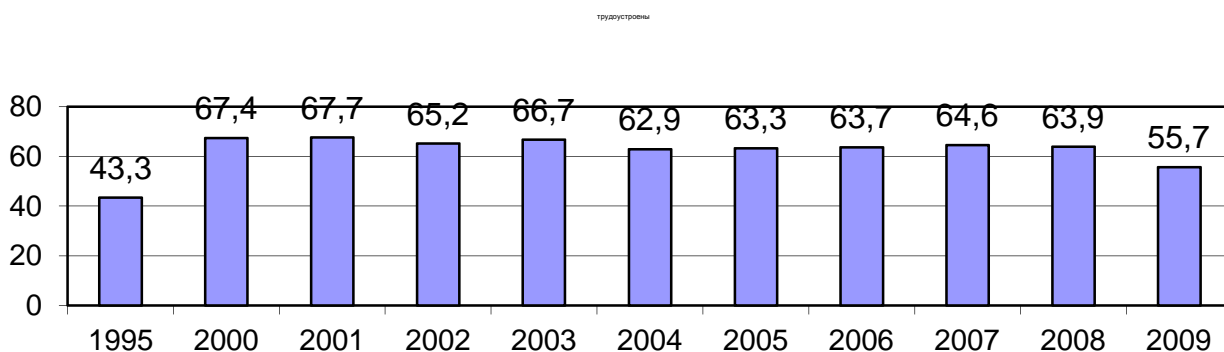


Рис.3. Трудоустройство населения государственными учреждениями службы занятости [12]

Во-вторых, конечный результат программы представляет собой результат одновременного действия целого ряда факторов: социально-экономических условий, состояния системы рабочих мест, макроэкономической политики и органической части живой личности (участника программы).

В-третьих, неоднозначность оценки затрат и результатов от реализации активных программ. В частности, все результаты осуществления активных программ на рынке труда с точки зрения возможности измерения могут быть сведены в три основные группы.

1) Измеряемые (легко оцениваемые) результаты (например, сокращение уровня и продолжительности безработицы, напряженности на рынке труда, сокращение расходов на выплату пособий; снижение затрат на поиск подходящей работы; рост численности трудоустроенных граждан после участия в программе; сокращение неполной занятости; рост производительности труда; увеличение численности самозанятых и др.).

2) Слабоизмеряемые или косвенные (например, снижение гендерной дискриминации на рынке труда; развитие человеческого капитала, потери мертвого груза, эффекты перемещения и замещения, эффекты поиска работы, эффекты участия в рабочей силе, эффекты производительности, последствия для других видов политики и др.).

Рассмотрим более подробно некоторые из эффектов, сопровождающих активную политику занятости. В частности, эффект замещения отражает тот факт, что в случае реализации программы нанятыми оказываются индивиды, участвующие в программе (в то время как могли бы быть наняты индивиды, не участвующие в программе). Эффект перемещения связан с возможностью фирм, нанимающих работников - участников программ содействия занятости (в частности, программы субсидирования), сократить издержки, увеличить выпуск и тем самым вытеснить с рынка конкурентов. Эффект налогообложения заключается в увеличении налогового бремени на налогоплательщиков в связи с необходимостью финансирования программ. Потери «мертвого» груза отражают возможность получения одинакового эффекта как от реализации программы, так и в ее отсутствии.

3) Неявные (расширение «гибких» навыков работников и др.).

В-четвертых, невозможность одновременного учета эффективности программ на макро- и микроуровнях. Анализ современной исследовательской литературы позволяет констатировать, что оценки эффективности активных программ (на макроуровне) на базе концепции общего равновесия встречаются значительно реже, чем оценки эффекта программ на микроуровне (на уровне индивида). Данный факт можно объяснить сложностью сбора и обработки большого объема микроданных об индивидах, проживающих в разных регионах и принадлежащих к различным группам населения.

В-пятых, «разнесенность» результата во времени, получение отсроченного эффекта (различающегося для тех или иных активных программ). В частности, анализ результатов применения существующей методологии оценки эффективности активных программ за рубежом позволяет констатировать, что долгосрочные оценки эффективности могут быть более благоприятными, чем краткосрочные. Так, программы, характеризующиеся незначительным или отрицательным эффектом через год после окончания, через 2-3 года дают позитивные результаты для участников и рынка (в частности, обучение на рабочем месте и др.).

В-шестых, недостаточная разработанность методик и инструментария определения эффективности, отсутствие необходимых статистических данных. При этом сам источник данных может определять качество полученных результатов оценки. Так, оценки, основанные на показателях периода пребывания в качестве зарегистрированных безработных, имеют более показательные результаты в среднесрочном периоде, чем оценки статуса занятости и доходов.

Также следует отметить наличие серьезных проблем с интерпретацией большей части эмпирических макроэкономических исследований и противоречивых доказательств микроэкономических исследований эффективности активных программ. Как показывает анализ зарубежных исследований, менее изученными являются оптимальные сроки реализации подобных программ, оптимальное сочетание различных мер в программах и объем программ.

Оценки эффективности активных программ, проведенные известными зарубежными исследователями, показали, что при ограниченном ресурсном и административном потенциале наиболее эффективными являются программы профессиональных консультаций и информационные услуги. Эффективность различных активных программ содействия занятости на рынке труда различается для различных групп стран мира; однако большая эффективность отмечается для таких активных программ, как программы обучения и переподготовки, содействия в поиске подходящей работы.

Общественные работы, характеризующиеся низкой результативностью (в отсутствие кризиса) в странах ОЭСР, в странах с переходной экономикой, являются наиболее значимыми в спектре мер активной политики на рынке труда стран Азии, Африки. Значимость различных направлений активной политики правомерно рассматривать в контексте социально-экономической ситуации в различных регионах мира, места и роли страны в процессе глобализации. Если в странах с переходной экономикой использование

активной и пассивной политики на рынке труда датируется 90-ми годами, то в развивающихся странах активная политика занятости находится только в зачаточном состоянии. Если в странах Африки, Азии организация общественных работ позволяет решать в основном тактические задачи, то подготовка и обучение безработных позволяют решать скорее стратегические задачи - сохранение и развитие человеческого капитала.

В отличие от практики западных стран российские программы обучения, осуществляемые по направлению служб занятости, продемонстрировали свою высокую эффективность (рассматриваемую как процент трудоустроенных после завершения обучения). Так, к концу 90-х годов доля трудоустроенных после прохождения обучения составила более 90%, что более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель развитых стран. Однако достаточно тревожной тенденцией выступает неоправданное ограничение контингента лиц, получающих доступ к услугам обучения и переподготовки.

На наш взгляд, эффективность активных программ политики занятости определяется, во-первых, грамотным выбором приоритетов и цели, во-вторых, определением критерия эффективности (социальный, экономический, интегральный), в-третьих, корректным выбором технологий достижения цели, в-четвертых, способом получения, обработки и полнотой информации о реальном состоянии рынка труда. В связи с этим оценка эффективности активных программ, реализуемых государством на рынке труда, должна проводиться на различных уровнях (микроуровень, макроуровень), в разрезе различных видов программ (общественные работы, подготовка и переподготовка и др.) и различных групп участников программ (молодежь, женщины, имеющие малолетних детей и др.), с использованием различных и взаимодополняющих методов, а также предполагает анализ достижения целей программ (см. рис. 4).

На микроуровне осуществляется измерение эффекта для конкретных индивидов, участвующих в программе. При этом программа признается эффективной, если после ее прохождения статус, доход индивидов значительно улучшается. Развитие данного исследовательского направления позволяет проводить дифференцированную активную политику, направленную на снижение безработицы. Оценка эффективности программы на макроуровне предполагает, что результаты оцениваются для различных групп населения, затрагиваемых действием программы, для общества в целом. В этом случае учитываются эффекты замещения, перемещения, налогов, потери мертвого груза и др. В частности, технология профилирования безработных в настоящее время является новой для России. Не отвергая целесообразности и необходимости данной программы, в то же время подчеркнем, что ее выбор в качестве несущей конструкции новой политики содействия занятости в России требует продуманной оценки эффективности данной программы, сопоставления ее с эффективностью других программ.

Представляется, что при построении интегрального индекса эффективности (макроуровень) активных программ необходимо учитывать не только экономические, но и социальные показатели, отражающие соответствующие изменения на национальных (региональных, локальных) рынках труда. При этом предлагаемые показатели должны отражать изменения различных процессов, протекающих на рынке труда, что требует оперативных статистических данных. Важным условием является доступность, полнота, регулярность сбора информации о них в рамках официальной статистики, а также сопоставимость данных показателей. Для оценки эффективности целесообразно рассматривать полученный индекс с учетом расходов на активную политику занятости (в процентах от ВВП).



Рис. 4. Оценка эффективности активных программ государства на рынке труда (составлено авторами)

В настоящее время акцент в оценке эффективности смещается с измерения макроэкономических эффектов на измерение воздействия активных программ на различные социально-демографические группы на рынке труда. Это в свою очередь требует совершенствования методологии оценки эффективности программ на микроуровне, в которой важное место заняли бы показатели улучшения статуса, дохода участников, а также устойчивости достигнутых результатов. При этом монетарные и немонетарные критерии программ должны стать неотъемлемой частью при расчете эффективности.

Поскольку экономическая эффективность активных программ предполагает учет затрат на осуществление программ, рассмотрим финансовый аспект. Несмотря на признаваемую всеми значимость финансирования именно активных программ на рынке труда, подходы к данному вопросу различаются по странам. Так, в табл. 1 представлены данные, характеризующие расходы государства на активную политику занятости в ряде стран ОЭСР.

Из таблицы видно, что наиболее высокие показатели затрат на финансирование активной политики занятости в 2009 г. характерны для Дании (1,6% ВВП), Бельгии (1,4% ВВП), Польши (1,3%) и Нидерландов (1,2% ВВП). Наиболее низкие показатели таких затрат отмечались в 2009 г. в Мексике, США, Великобритании, Чехии, Чили, Австралии, Эстонии. При этом за период 2002-2009 гг. доля расходов на активные программы на рынке труда

возросла в Польше (в 6,5 раз), Японии, Люксембурге (в 1,6 раз), Австрии, Бельгии, Испании, Финляндии. В ряде стран произошло сокращение данного показателя за 2002-2009 гг. (Дания, Германия, Нидерланды, Швеция, страны ОЭСР в целом). Расходы России на пассивные меры политики занятости в условиях кризиса 2008-2009 гг. выросли в 2,5 раза, а на активные меры в 12 раз. Если рассмотреть их в процентах от ВВП, то в 2008 году все расходы на политику занятости составляли 0,09% от ВВП, в т.ч. активные меры — 0,04 % от ВВП. В 2009 году все расходы составили 0,28% от ВВП, в том числе на пассивные меры — 0,13% ВВП, на активные - 0,15%. Если сравнивать Россию со странами ОЭСР, то следует отметить очень низкую долю затрат на финансирование активной политики.

Основными финансовыми показателями государственной политики занятости в России выступают следующие: 1) удельный вес расходов на политику занятости в ВВП; 2) удельный вес расходов на активную политику занятости в структуре расходов на осуществление государственной политики занятости; 3) расходы государственной политики занятости в расчете на одного безработного<sup>1</sup>.

Эффективность программ активной политики занятости также может изменяться в зависимости от величины и порядка финансирования. С 1 января 2007 года федеральные полномочия в сфере содействия занятости населения и защиты от безработицы переданы на уровень органов государственной власти субъектов Российской Федерации. Переход же на бюджетное финансирование активной политики с 2001 года привел к сокращению государственных расходов на все программы. В подобной ситуации проводимая политика занятости способна попасть в «финансовую ловушку»: объемы финансирования становятся основным критерием формирования программ и определения контингента их участников, а не реальные потребности рынка труда. Вместе с тем потребности региональных рынков труда в тех или иных активных программах могут различаться, что определяется особенностями их состояния. В современных условиях поддержка региональных рынков труда осуществляется в России по двум направлениям: финансирование переданных регионам полномочий в сфере политики занятости (за счет субвенций, в том числе на выплату пособий по безработице) и субсидии на реализацию мер по снижению напряженности на рынке труда (финансирование общественных работ, переподготовки высвобождаемых работников, переселения, открытия собственного малого бизнеса).

---

<sup>1</sup> Результаты осуществления политики занятости в России в 2000-2004гг. показывают, что каждый рубль, затраченный на трудоустройство, возвращал обществу от 2 руб. до 5 руб.

Таблица 1

Расходы на активную политику на рынке труда в ряде стран ОЭСР (в процентах от ВВП) [3]

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Австралия	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
Австрия	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.9
Бельгия	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4
Канада	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
Чили	..	..	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
Чехия	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
Дания	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.3	1.3	1.6
Эстония	..	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Финляндия	0.8	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9
Франция	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0
Германия	1.3	1.2	1.1	0.9	0.9	0.7	0.8	1.0
Италия	..	..	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4
Япония	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5
Корея	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4
Люксембург	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5
Мексика	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Нидерланды	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.2
Н.Зеландия	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	..	..
Норвегия	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	..	..
Польша	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	1.3
Португалия	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	0.8
Словакия	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2
Словения	..	..	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3
Испания	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9
Швеция	1.6	1.2	1.2	1.3	1.3	1.1	1.0	1.1
Великобритания	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
США	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
ОЭСР - в целом	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6

В заключение отметим, что оценка эффективности программ активной политики занятости будет способствовать повышению качества структуры подобных программ, выявлению проблемных полей их реализации, а также определению векторов активной политики занятости. Вместе с тем необходимо учитывать, что активная политика занятости на рынке труда не может выступать «субститутом» других мер регулирования рынка труда, они должны дополнять друг друга для достижения полной, эффективной занятости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Akhmedov A., Denisova I., Kartseva M. Active Labor Market Policies in Russia: Regional Interpretation Determines Effectiveness? Center for Economic and Financial Research and New Economic School, Moscow, June, 2003.
2. Card D., Kluve J., Weber A. Active Labor Market Policy Evaluations: A Meta-Analysis. Discussion paper series. Institute for the Study of Labor, February, 2009.
3. Employment and labor markets: Key tables from OECD. OECD, 2011. Режим доступа: [www.oecd.org](http://www.oecd.org).
4. Heckman J., Ishimura H., Todd P. E. Matching as an Econometric Evaluation Estimator: Evidence from Evaluating a Job Training Program // Review of Economic Studies 64. 1997. P. 605-654.

5. Kluve J., Lehmann H., Schmidt C. M. Disentangling Treatment Effects of Active Labor Market Policies: Evidence from Matched Samples // William Davidson. Working Paper. N.447. 2002.

6. Доклад МОТ о глобальных тенденциях в сфере занятости – 2011. Режим доступа: [www.ilo.org/public/russian/.../2011/](http://www.ilo.org/public/russian/.../2011/)

7. Мартынова А.П., Рощин С.Ю. Оценка эффективности и спрос на оценку эффективности государственных программ на рынке труда // Вопросы государственного и муниципального управления. 2008. №4. С. 27-47.

8. Международное бюро труда. Административный совет. Женева, 2009. GB306-WP-SDG\_1\_[2009-10-317]-Ru.doc

9. Прокопов Ф.Т. Безработица и эффективность государственной политики на рынке труда в переходной экономике России. Автореферат диссертации на соискание степени д.э.н. Москва, 1999.

10. Смирнов С. Н. Система оценок эффективности политики занятости в регионе // Человек и труд. 1996. №4. С. 15.

11. Четвернина Т.Я. Становление системы защиты от безработицы в современной России. М., 2004. С. 251-296.

12. Электронный ресурс: [www.gks.ru](http://www.gks.ru)

**Санкова Лариса Викторовна -**

Доктор экономических наук, доцент,  
заведующий кафедрой экономической  
теории и экономики труда Саратовского  
государственного технического университета

**Sankova Larisa Viktorovna –**

Doctor of Economic Sciences, Assistant  
Professor, Head of the Department “Economic  
Theory and Labor Economics”, Saratov State  
Technical University

**Косарева Анна Владимировна –**

аспирант кафедры экономической теории и  
экономики труда Саратовского  
государственного технического университета

**Kosareva Anna Vladimirovna –**

Post-graduate student of Department  
“Economic Theory and Labor Economics”,  
Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 07.02.2011, принята к опубликованию 25.08.2011*

УДК 339.187, 338.45:69

**А.Н. Плотников, Д.А. Плотников**

### **ЛОГИСТИКА СНАБЖЕНИЯ ПОДРЯДНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ МАТЕРИАЛЬНЫМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ**

*Статья посвящена проблемам организации эффективной системы снабжения строительного предприятия, интенсификации процесса обеспечения строительства материальными ресурсами, разработки и осуществления мероприятий по повышению эффективности и качества всех сторон деятельности органов снабжения.*

Снабжение, логистика, подрядные строительные организации, ресурсы, функционально-стоимостной анализ

**A.N. Plotnikov, D.A. Plotnikov**

### **LOGISTICS SUPPLY KONTRAKTORS MATERIAL AND TECNICAL RESOURCES**

Paper is devoted to the problems of organizing an effective supply system builder-tion company, the intensification of the process to ensure construction material resources, the development and implementation of measures to improve efficiency and of the quality of all aspects of the activity of supply.

Procurement, logistics, contractor, resources, value analysis

Для успешной работы строительных предприятий в условиях сложившейся нестабильной экономической ситуации в нашей стране необходимо, прежде всего, грамотное ведение оперативного экономического учета, позволяющее быстро ориентироваться в сложных рыночных ситуациях и принимать обоснованные управленческие решения, снижающие коммерческий риск. Естественно, что принятие подобных решений невозможно без достоверных сведений о состоянии и движении материально-технических ресурсов.

Контроль за снабжением материально-техническими ресурсами трудоемких, но игнорирование этой стороны производственной деятельности зачастую может обернуться значительными убытками для предприятия. Безусловно, в поле зрения руководителя предприятия всегда должны находиться и финансовые потоки — операции по кассе и банку, расчеты с подотчетными лицами и т. д.

Снабженческо-сбытовые организации призваны стать самостоятельными хозрасчетными предприятиями по обслуживанию производителей и потребителей, хранению продукции, использованию вторичных ресурсов, оказанию платных услуг по определению возможных источников снабжения и выполнению других посреднических функций.

Происшедшие социально-экономические преобразования явились причиной резкого возрастания неопределенности внешней среды. Сегодня нет гарантированных поставок, нет финансовой и правовой стабильности, сложнее прогнозировать платежеспособный спрос. В связи с этим особую актуальность приобретает проблема организации эффективной системы снабжения строительного предприятия.

Непрерывное усложнение процесса материально-технического снабжения требует все увеличивающихся затрат труда на его осуществление. В то же время напряженный баланс



трудовых ресурсов в стране не позволяет решать усложняющиеся проблемы обеспечения строительства средствами производства экстенсивным путем, т.е. за счет увеличения количества работников и массы потребляемых ресурсов. Проблемы можно и нужно решать только путем интенсификации процесса обеспечения строительства материальными ресурсами, разработки и осуществления мероприятий по повышению эффективности и качества всех сторон деятельности органов снабжения. Применительно к процессу материально-технического снабжения эффективность и качество означают наиболее полное, своевременное, качественное, а также с наименьшими затратами трудовых, материальных и финансовых ресурсов выполнения всех функций этого процесса.

Непрерывное совершенствование обеспечения производства продукцией производственно-технического назначения оказывает влияние на улучшение экономических показателей производства.

На рис. 1 изображены пути повышения обеспеченности материальными ресурсами предприятия.



Рис. 1. Пути повышения обеспеченности материально-техническими ресурсами предприятия

Удовлетворение потребности предприятия в материальных ресурсах осуществляется двумя путями: экстенсивным и интенсивным. Экстенсивный путь предполагает увеличение добычи и производства материальных ресурсов и связан с дополнительными затратами. Интенсивный путь удовлетворения потребности предприятия в материалах, сырье, топливе, энергии и других материальных ресурсах предусматривает более экономичное расходование имеющихся запасов в процессе производства продукции. Экономия сырья и материалов в процессе потребления равнозначна увеличению их производства.

Эффективным решением проблем материально-технического снабжения является применение метода «точно во время», а также интенсивного метода.

Сущность метода заключается в том, что ресурсы должны быть доставлены именно в тот момент, когда они необходимы для продолжения производства, и в объеме, рассчитанном на конкретный отрезок времени. При этом методе обеспечивается ритмичное, бесперебойное снабжение предприятия материальными ресурсами и эффективное их использование в течение процесса производства.

На современном этапе развития экономики особо важное значение приобретает комплектность обеспечения производства материальными ресурсами. В строительстве, при организации поставок оборудования, очень важно поступление к моменту монтажа всех его видов, которые производятся часто различными поставщиками. Для обеспечения

своевременного поступления материалов как транзитом, так и с предприятий, по поставкам, в настоящее время получает широкое распространение одна из прогрессивных форм – гарантированное снабжение.

Расчет эффективности может быть представлен последовательностью частных расчетов. Так, планируется за счет внедрения поставок материальных ресурсов по системе «точно во время» повысить рациональность материально-технического обеспечения с 0,903 до 0,95. Тогда сокращение длительности оборота производственных запасов предприятия ( $\Delta Y_1$ ) определяется на основе формулы:

$$Y_1 = 557,3 - 446,8 \cdot X, \quad (1)$$

где  $X$  – уровень рациональности поставок материально-технических ресурсов на предприятии (интегрированный показатель),

$Y_1$  – длительность оборота производственных запасов предприятия, в днях, после соответствующих преобразований составит 62,5 дня:

$$\Delta Y_1 = 446,8 \cdot (0,81 - 0,95) = 62,5.$$

Сокращение длительности оборота производственных запасов ведет к снижению их абсолютной величины, а следовательно, издержек по их содержанию и оборотных средств, вложенных в запасы.

Снижение материалоемкости производства ( $\Delta Y_2$ ) определяется на основе формулы:

$$Y_2 = 0,69 - 0,073 \cdot X, \quad (2)$$

где  $X$  – уровень рациональности поставок материально-технических ресурсов на предприятии (интегрированный показатель),

$Y_2$  – удельный вес материальных затрат, после соответствующих преобразований составит 0,01:

$$\Delta Y_2 = 0,073 \cdot (0,81 - 0,95) = 0,01.$$

Снижение материалоемкости производства ведет к уменьшению себестоимости продукции производства, росту прибыли и рентабельности.

Сокращение ритмичности поставок ( $\Delta Y_3$ ) определяется на основе формулы:

$$Y_3 = 1,2 - 0,37 \cdot X, \quad (3)$$

где  $X$  – уровень рациональности поставок материально-технических ресурсов на предприятии (интегрированный показатель),

$Y_3$  – ритмичность поставок материально-технических ресурсов, после соответствующих преобразований составит 0,044:

$$\Delta Y_3 = 0,37 \cdot (0,92 - 0,95) = 0,044.$$

Результатами повышения ритмичности поставок материально-технических ресурсов на предприятие становятся снижение простоев и повышение уровня обслуживания производства.

Величина экономии от проведения указанных мероприятий определяется на основе вклада каждого из них в запланированное снижение удельных материальных затрат (2,3%) и значения дохода строительного предприятия в 2010 г. (870,7 млн. руб.):

$$\Xi = (0,1 + 0,1 + 0,15) \cdot 0,023 \cdot 870,7 = 7,0 \text{ млн. руб.}$$

Таким образом, на основе функционально-стоимостного анализа процесса закупки и поставок материальных ресурсов в производство строительных материалов предложены мероприятия по снижению затрат и дана оценка ожидаемого экономического эффекта от их использования.

В статье также предлагаются мероприятия по автоматизации системы снабжения. Суть предлагаемых мероприятий заключается в организации непрерывного независимого

потока актуальной информации о ценах и поставщиках на основе рекламы закупок предприятия в специализированных интернет-ресурсах или в печатных изданиях.

Существуют также специализированные ресурсы для снабженцев, оказывающие услуги по поддержанию в актуальном состоянии прайс-листов не только постоянных поставщиков предприятия, но и их конкурентов. Таким образом, можно будет получить объективную и независимую картину обоснованности закупочных цен. А прозрачность и доступность информации обеспечит экономию за счет устранения личных предпочтений сотрудников снабжения при выборе поставщиков.

Другим направлением должно стать создание и поддержание высокого уровня конкуренции среди поставщиков. Обеспечив всем равные условия для конкуренции, предприятие получит возможность иметь более выгодные предложения. Для этого можно использовать официальный сайт предприятия, разместив на нем закупочную страничку с функцией получения электронных коммерческих предложений от поставщиков, или воспользоваться услугами специализированных интернет-сайтов. Также необходимо формировать имидж предприятия как надежного, постоянного и платежеспособного заказчика.

Предлагаемая авторами архитектура системы снабжения предприятия представлена на рис. 2, 3.



Рис. 2. Модифицированная система управления системой снабжения строительного предприятия

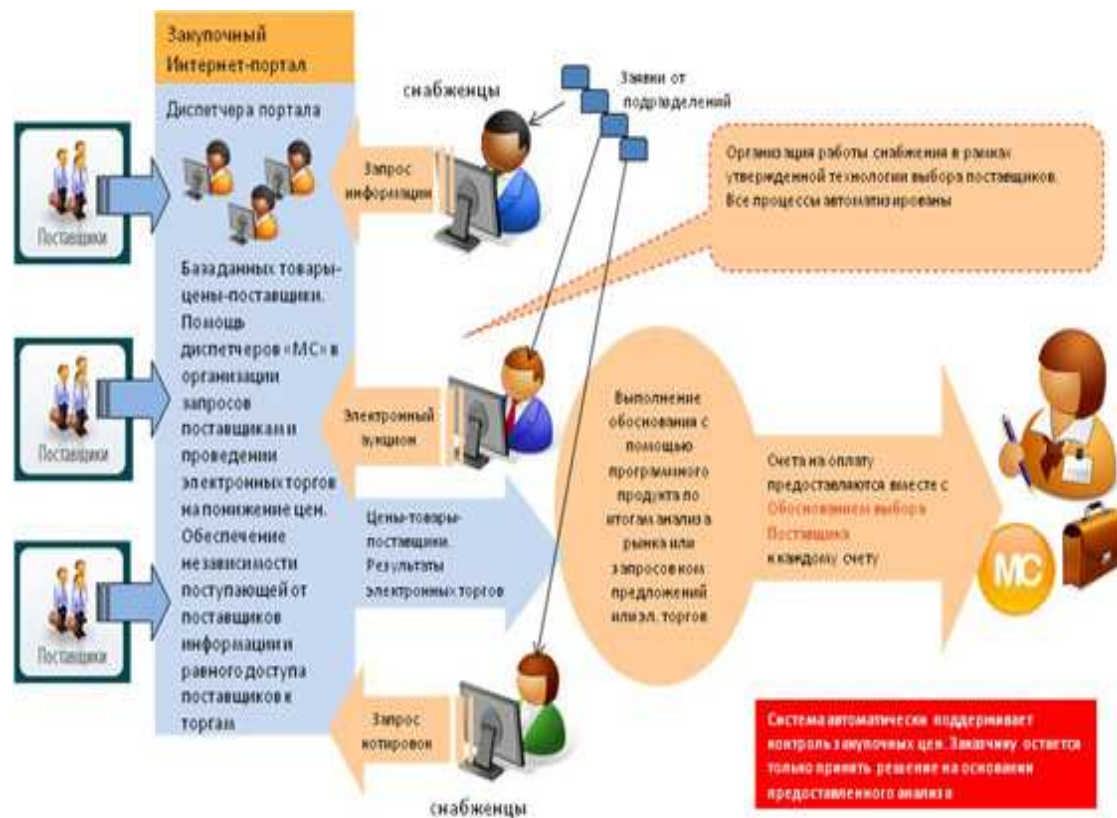


Рис. 3. Модифицированная система управления системой закупок строительного предприятия

Использование выше представленных модифицированных систем позволяет реализовать следующие функции логистики снабжения:

1. Провести анализ потенциальных поставщиков. Составленный перечень поставщиков анализируется, исходя из специальных критериев, позволяющих осуществить отбор. Имеется два основных критерия выбора поставщика: 1) стоимость приобретения продукции и услуг, 2) качество обслуживания. Стоимость приобретения включает в себя цену продукции или услуг и не имеющую денежного выражения прочую стоимость, к которой можно отнести, например, изменение имиджа организации, социальную значимость сферы деятельности фирмы, перспективы роста и развития производства и т. п.

2. Оценить качество обслуживания, которое включает в себя качество продукции или услуги и надежность обслуживания. Под надежностью обслуживания понимается гарантированность обслуживания потребителя нужными ему ресурсами в течение заданного промежутка времени и вне зависимости от недопоставок, которые могут возникнуть, нарушений сроков доставки и т. п. Надежность оценивается через вероятность отсутствия отказа в удовлетворении заявки потребителя. В отдельных случаях качество обслуживания, а также отдельные условия поставки, не отражаются на цене приобретения.

Кроме основных критериев выбора поставщика, существуют и прочие критерии, количество которых может быть достаточно велико, например, более 60. К ним относятся:

- удаленность поставщика от потребителя;
- сроки выполнения текущих и экстренных заказов;
- наличие у поставщика резервных мощностей;
- организация управления качеством продукции у поставщика;
- способность поставщика обеспечить поставку запасных частей в течение всего срока службы поставленного оборудования;
- кредитоспособность и финансовое положение поставщика и пр.

При создании карточки заказа или закупки достаточно выбрать код контрагента - все реквизиты, условия и график оплаты система позволяет извлекать из таблиц клиентов и

поставщиков. Кроме ввода закупок вручную, предусмотрен механизм их автоматической генерации на основе прогноза продаж и производства. Наконец, закупку можно создать напрямую из заказа одним нажатием кнопки. Поддерживаются регулярные поставки товара с неизменными коммерческими условиями. Создание заказов и закупок упрощается благодаря средствам копирования заголовков и строк других заказов, закупок и складских журналов. Каждый этап обработки заказов и закупок завершается оформлением определенного документа.

С помощью системы контролируется соответствие заказанного и полученного количества товара, определяется величина «недоставки» и «перепоставки». Обнаружив недоставку, система ожидает решения ответственного сотрудника: вернуть недоставленную закупку, оплатить счет на неполную сумму и закрыть закупку или выполнить частичную оплату, ожидая прихода всего количества товара. Выбор того или иного варианта действий основывается на потребности в товаре, уровне складских запасов, наличии альтернативной номенклатуры, и все эти сведения сотрудник предприятия может получить в стандартных запросах и отчетах данной системы.

Аналогично обрабатывается «перепоставка»: снабженец может отослать излишек товара поставщику, оформив возврат товара с выставлением кредит-ноты, или санкционировать оплату счета-фактуры на полную стоимость закупки.

Для каждого товара можно задать допуск «недоставки» и «перепоставки» в процентном выражении с целью автоматизации обработки закупок. Предусмотрена возможность «недоставки» или «перепоставки» по заказам, т.е. отправки заказа в объемах, отличных от договорных.

Автоматизированная система позволяет настроить прогнозную модель, способ покрытия по каждой номенклатуре, ABC-классификацию по группам номенклатуры, сроки поставки с учетом рабочего календаря и ещё целый ряд параметров, позволяющих максимально отразить внешние условия работы. Автоматизированная система на основании введенных в нее данных и статистики позволяет проводить прогнозное, оперативное сводное планирование, выдавая данные по потребности в той или иной номенклатуре по открытым и планируемым заказам, что существенно облегчает деятельность группы закупок и планирования производства.

В процессе сводного планирования система отыскивает тот вариант плана, который удовлетворил бы десяткам условий и параметров: длительности периодов отрицательной и положительной ликвидности склада, необходимой величине резервного запаса товара, периодичности планирования закупок, страховых резервов времени и т.д. В итоге создается список запланированных закупок, которые подлежат утверждению и переводу в разряд открытых закупок.

По данным независимых информационных агентств, при правильном, тщательно спланированном внедрении данной системы, компании могут добиться действительно значимых результатов:

- снижение операционных и управленческих затрат 15%,
- экономия оборотных средств 2%,
- уменьшение цикла реализации 25%,
- снижение коммерческих затрат 35%,
- снижение страхового уровня складских запасов 20%,
- увеличение оборачиваемости средств в расчетах 25%,
- увеличение оборачиваемости материальных запасов 30%,
- улучшение утилизации основных фондов 30%,
- уменьшение дебиторской задолженности 12%.

Произведем расчет затрат на внедрение модифицированной системы снабжения в деятельность службы снабжения строительного предприятия.

Автоматизация процесса снабжения:

1. Приобретение пакета MBS Ахарта. Стоимость пакета данного ПО для одного рабочего места составляет 1600 € (63536руб.). Предприятию необходима инсталляция ПО на 11 рабочих мест (отдел снабжения, бухгалтерия, отдел сбыта, управленческое звено).

Стоимость ПО для строительного предприятия составит:  $63536 * 11 = 698896$  руб.

2. Обучение работы в системе MBS Ахарта. Стоимость обучения 1 сотрудника работы с данным ПО составляет 21600 руб., соответственно общая стоимость обучения сотрудников для предприятия составит:  $21600 * 11 = 237600$  руб.

3. При внедрении модифицированной системы снабжения изменению будет подвергнут штат отдела снабжения. Предполагаемый штат будет состоять из 3 человек: менеджер сбора и согласования оперативных заявок (2 чел.), менеджер по анализу и формированию заказа в системе портала «Товары-Цены-Поставщики» (1 чел.)

Фонд оплаты труда менеджеров сбора и согласования оперативных заявок:  $35000 * 2 = 70000$  руб.

Фонд оплаты труда по анализу и формированию заказа в системе портала «Товары-Цены-Поставщики»: 29000 руб.

Итого общий фонд оплаты труда отдела снабжения составит:  $70000+29000=99000$  руб.

4. Оборудование рабочего места сотрудника отдела снабжения средствами ЭВМ.

Персональный компьютер:  $21300 * 3 = 639000$  руб.

Оргтехника: 1020 руб.

Канцтовары (расходные материалы): 2500 руб. в мес.

Итого годовой расход на оборудование рабочих мест сотрудников отдела снабжения составит:

$639000+1020+(2500*12)=67020$  руб.

Внедрение системы закупок с помощью электронного аукциона:

5. Доступ к интернет-порталу по «Товарам-Ценам-Поставщикам». Стоимость годового тарифа портала «Мастер снабжения (ООО «Русский деловой проект»» <http://mastercost.ru>: 73100 руб.

6. Оплата услуг провайдера доступа к сети Интернет. Годовая стоимость услуг ООО «RadiusHost» по предоставлению выделенной линии доступа к сети интернет составляет:  $1500 * 12 = 18000$  руб.

Для удобства расходы на внедрение и годовое обслуживание модифицированной системы снабжения строительного предприятия представляются в табл. 1.

Проведем экономический анализ эффективности трансформации системы снабжения.

Как было указано выше, одной из основных целей совершенствования системы снабжения является нивелирование недостатков существующей системы. Одним из недостатков существующей системы являются потери от несбалансированности экономических потоков.

В табл. 2 приводится расчет потерь от несбалансированности снабженческих потоков.

Из табл. 2 видно, что общие годовые потери составили 4668573,0 руб. Таким образом, размер годовых расходов на модификацию системы снабжения меньше потерь предприятия (1512616 руб.).

Экономический эффект составит 3155967 руб. ( $4668573 - 1512616$ ).

Эффективность мероприятия 2,08 ( $3155967/1512616$ ).

Таблица 1

Смета годовых расходов на внедрение и годовое обслуживание модифицированной системы снабжения строительного предприятия

	Необходимые ресурсы	Стоимость затрат, руб.
Автоматизация процесса снабжения	пакет MBS Ахарта	698896
	Обучение работы в системе MBS Ахарта	237600
	ФОТ сотрудника отдела снабжения (1 чел.)	70000
	Оборудование рабочего места сотрудника отдела снабжения средствами ЭВМ	67020
Внедрение системы закупок с помощью электронного аукциона	Доступ к интернет-порталу по «Товарам-Ценам-Поставщикам»	73100
	Оплата услуг провайдера доступа к сети Интернет	18000
	Оборудование рабочего места сотрудника отдела снабжения средствами ЭВМ	348000
Итого		1512616

Таблица 2

Расчет потерь от несбалансированности снабженческих потоков в строительном предприятии, 2010 г

Наименование материала	Объем поставки	Отпускная цена, руб.	Всего: потери от несбалансированности материальных потоков	
			% от цены закупок	в денежном выражении, руб.
Трубы эл.сварные и арматура, тн.	290	2369,3	6,8	46722,6
Плитка фасадная, шт.	37500	357,4	6,7	987967,5
Сэндвич-панели стеновые, м <sup>2</sup>	3750	5250	4,5	885937,5
Кирпич керамический, тыс. шт.	2460	23720	1,9	641863,2
Конструкционный сборный ж/б, шт.	3845	35450	0,1	136305,25
Пенобетонные блоки, шт.	1540	5852	2,9	261350,32
Гипсокартонные листы (ГКЛ KNAUF), м <sup>2</sup>	12200	1037	13,1	1657333,4
Пиломатериалы, м <sup>3</sup>	284	689,3	26,1	51093,67
ИТОГО				4668573,0

Очевидно, что при более детальном и профессиональном подходе к планированию снабженческой деятельности предприятие может получить и более значительный экономический эффект в будущем.

**Плотников Анатолий Николаевич** –  
Доктор экономических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Экономика и  
управление в строительстве» Саратовского  
государственного технического университета

**Plotnikov Anatoly Nikolaevich** –  
Doctor of Economic Sciences, Professor, Head  
of the Department “Economy and Management in  
Construction”, Saratov State Technical University

**Плотников Денис Анатольевич** –  
Кандидат экономических наук, доцент  
кафедры ЭУС Саратовского  
государственного технического университета

**Plotnikov Denis Anatol'evich** –  
Candidate of Economic Sciences, Assistant  
Professor of the Department “Economy and  
Management in Construction”, Saratov State  
Technical University

*Статья поступила в редакцию 06.02.2011, принята к опубликованию 19.06.2011*