

ISSN 1816-210X

# ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

**ТРУДЫ  
НИЖЕГОРОДСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 2 (95)**

**Нижний Новгород 2012**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

**Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2012. № 2 (95). – 350 с.**

*Выходит 4 раза в год*

**Главный редактор С.М. Дмитриев**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), М.В. Ширяев (зам. гл. редактора),  
Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора), В.В. Беляков (отв. секретарь), О.В. Пугина (отв. редактор),  
Т.В. Третьякова (технич. секретарь), Т.П. Новикова (технич. редактор)  
**Члены редколлегии:** В.Г. Баранов, В.Л. Башкатов, В.М. Воротынцев, О.М. Власова,  
В.В. Глебов, А.М. Грошев, А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, О.С. Кошелев, В.Ф. Кулепов,  
А.А. Куркин, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов, В.П. Хранилов,  
С.Н. Хрунков, Е.А. Чернышов, В.М. Галкин

УДК 050(06)  
ББК 9я54

*Электронная версия журнала:*  
<http://www.nntu.nnov.ru>

© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, 2012

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION**  
**FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION**  
**OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION**  
**NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**n.a. R.Y. ALEXEEV**

**TRANSACTIONS**  
**of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL**  
**UNIVERSITY**  
**n.a. R.Y. ALEXEEV**

**№2 (95)**

**Nizhni Novgorod 2012**

**Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev**  
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2012. № 2 (95). – 350 p.

*The journal is issued 4 times a year*

**Editor-in-Chief S.M. Dmitriev**

**EDITORIAL BOARD:**

N.Y. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), M.V. Shiryaev.(Deputy Editor-in-Chief),  
Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief), V.V. Belyakov (Executive Secretary), O.V. Pugina  
(Executive Editor), T.V. Tretyakova (Technical secretary), T.P. Novikova (Technical Editor)  
**Members of Editorial Board:** V.G. Baranov, V.L. Bashkatov, V.M. Vorotintzev, O.M. Vlasova,  
V.V. Glebov, A.M. Groshev, A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, O.S. Koshelev, V.F. Kulepov,  
A.A. Kurkin, I.O. Leushin, M.G. Mikhalenko, V.P. Khranilov, A.Y. Panov, S.N. Khrunkov,  
S.V. Khvatov, Y.A. Chernyshov, V.M. Galkin

*Electronic version of the journal:*  
<http://www.nntu.nnov.ru>

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....</b>	<b>11</b>
<b>Белоусов Е.Л., Брянцев В.Ф., Войткевич К.Л., Кейстович А.В., Сайфетдинов Х.И.</b> Вопросы создания авиационного радиосвязного оборудования по принципу «программируемое радио».....	11
<b>Седаков А.Ю.</b> Методика расчета геометрической конфигурации ферритовых элементов волноводных переключателей бортовых РЛС КВЧ диапазона.....	19
<b>Букварев Е.А., Рябков А.П.</b> Оптимизация многоканального когерентного накопителя пачки импульсов при возбуждении периода зондирования.....	31
<b>МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....</b>	<b>41</b>
<b>Морозов В.П.</b> Кинетика роста зёрен в пересыщенном однородном растворе.....	41
<b>Семина С.В., Куркина О.Е., Куркин А.А., Гиниятуллин А.Р.</b> Численное моделирование динамики стратифицированного озера.....	48
<b>Масленников Д.А., Катаева Л.Ю., Белоцерковская И.Е.</b> Об особенностях моделирования излучения при пожарах.....	66
<b>ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>76</b>
<b>Жевнерчук Д.В., Аристов А.В., Герасимов Ю.В.</b> Семантическая интероперабельность в диалоговых информационных системах.....	76
<b>Полетаев А.А., Корелин О.Н.</b> Оптимизация процесса арифметического кодирования алгоритма сжатия изображений JPEG2000 на основе зависимостей между значениями вейвлет-коэффициентов и параметрами R-D кривых.....	83
<b>Никулин Е.А.</b> Матричные методы рекластеризации составных объектов Безье.....	92
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....</b>	<b>102</b>
<b>Лаптев А.И., Букин П.Э., Фролова И.Н., Крайнов В.В.</b> Способ автоматизации выбора средств технологического оснащения.....	102
<b>Пилипосян С.Е.</b> Погрешности измерения момента инерции произвольного твердого тела.....	110
<b>Кошелев О.С., Калынов О.Ю., Фролов Л. С.</b> Алгоритм решения задачи автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства и минимальные требования к соответствующим программным продуктам в условиях конкретного предприятия.....	124
<b>ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....</b>	<b>130</b>
<b>Безносков А.В., Бокова Т.А., Дроздов Ю.Н., Махов К.А.</b> Трибология контуров инновационных реакторов на быстрых нейтронах с ТЖМ.....	130
<b>Крессов Д.Г.</b> О динамике расхода подкипающего водяного теплоносителя в каналах реактора под давлением.....	135
<b>Салмин А.И.</b> Проблема создания аэростата, заполненного электронами вместо подъемного газа.....	146

<b>НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>156</b>
<b>Беляков В.В., Галкин Д.А., Зайцев А.С., Зезюлин Д.В., Кудряшов Е.М., Макаров В.С.</b> Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу.....	156
<b>Барахтанов Л.В., Манянин С.Е.</b> Оценка зависимостей сопротивления снега сжатию...	167
<b>Барахтанов Л.В., Котляренко В.И., Манянин С.Е., Соколов И.А.</b> Исследование базовых характеристик шин сверхнизкого давления.....	172
<b>ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....</b>	<b>179</b>
<b>Францев М.Э.</b> Анализ эксплуатационных и экономических аспектов в модели проектной оптимизации амфибийных катеров на воздушной подушке, предназначенных для перевозки пассажиров.....	179
<b>Ершов Н.В., Ершов Н.Ф.</b> Предельное значение метацентрического радиуса и метацентрической высоты электротехника и электроэнергетика.....	185
<b>Химич В.Л., Хрипач Н.А., Лежнев Л.Ю., Папкин Б.А., Шустров Ф.А., Иванов Д.А., Сонкин В.И., Папкин И.А.</b> Моделирование перспективного дизельного окислительного нейтрализатора.....	191
<b>Лобастов В.П., Зеличенко Е.В.</b> Интеграционные процессы в области водного транспорта в рамках сотрудничества России и ЕК ООН.....	197
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....</b>	<b>206</b>
<b>Дмитриев С.М., Плехов А.С., Титов В.Г., Титов Д.Ю., Яшин С.Н.</b> Алгоритмы управления активными фильтрами гармоник в составе электроприводов переменного тока.....	206
<b>Смирнов А.Ю.</b> Определение размеров радиальных электромагнитных подшипников через машинную постоянную.....	215
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>221</b>
<b>Колокольцев В.М., Иванова И.В., Долгополов А.М.</b> Влияние химического состава на структуру и свойства литейной инструментальной стали для штампов горячего деформирования.....	221
<b>Палаткина Л.В.</b> Особенности структурообразования в сером чугуна.....	227
<b>Яровая Е.И., Ульянов В.А., Спаская М.М., Гусев А.Ю.</b> Многокритериальная оптимизация заготовительных технологических процессов.....	239
<b>ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>246</b>
<b>Храмов А.А., Гунько Ю.Л., Козина О.Л., Михаленко М.Г.</b> Влияние конструкции электродов на распределение тока по высоте электродов никель-железного аккумулятора.....	246
<b>Комова Е.П., Скоробогатова Е.В., Арбатский А.П., Карташов В.Р.</b> Взаимодействие хитозана с ионами некоторых <i>d</i> -металлов в водном растворе уксусной кислоты.....	252
<b>ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....</b>	<b>258</b>
<b>Борисов С.А., Плеханова А.Ф.</b> Применение инновационных математических методов в социально-экономическом прогнозировании.....	258

---

<b>Шарова А.А., Плеханова А.Ф.</b> Моделирование инфраструктуры риск-менеджмента на основе процессного подхода (на примере предприятий химической промышленности).....	265
<b>Ромашова И.Б., Шигина А.Е.</b> Инновационное поведение как фактор реализации инновационного потенциала.....	273
<b>Солдатова Ю.С., Яшин С.Н.</b> Совершенствование методологии оценки финансово-экономического состояния и возможностей предприятий по осуществлению инновационной деятельности.....	280
<b>СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>288</b>
<b>Казакова В.И.</b> От среднего класса к модернизации: новая культура построения коммунизма.....	288
<b>Малахова Ю.В.</b> Из истории метода.....	295
<b>Меркулов А.Е.</b> Исторические предпосылки, методология и основные положения теории постиндустриального общества.....	303
<b>МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>309</b>
<b>Вавилов В.Д.</b> Оптимизация характеристик микроакселерометра со смещенной осью качания маятника.....	309
<b>Гаврилов А.А., Шипунов А.Н.</b> Модернизация технологического процесса диффузионной сварки.....	319
<b>Гаврилов А.А., Шипунов А.Н.</b> Способ повышения точности размерной обработки кремния.....	325
<b>МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....</b>	<b>331</b>
<b>Яковлев Е.И., Ценова А.А.</b> Алгоритм вычисления базисов групп двумерных гомологий разветвленных триангулированных поверхностей.....	331
<b>Митяков Е.С., Сазонтов В.А.</b> Использование алгоритмов адаптивной фильтрации для прогнозирования экономической динамики.....	339



## CONTENTS

<b>RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....</b>	<b>11</b>
<b>Belousov YE.I., Bryantsev V.Ph., Voytkevich K.L., Keystovich A.V., Sayphetdinov KH.I.</b> Issues of developing aviation radio communication equipment on “software-defined radio” principlea.....	11
<b>Sedakov A.YU.</b> Design procedure of the geometrical configuration of ferrite elements for waveguides switches of onboard EHF range radars.....	19
<b>Bukvarev E.A., Ryabkov A.P.</b> Optimization of multichannel staggered pulses coherent integrator.....	31
<b>MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA .....</b>	<b>41</b>
<b>Morozov V.P.</b> The kinetics of grain growth in a supersaturated homogeneous solute.....	41
<b>Semin S.V., Kurkina O.E., Kurkin A.A., Giniyatullin A.R.</b> Numerical modeling of dynamics of a stratified lake .....	48
<b>Maslennikov D.A., Kataeva L.Yu., Belotserkovskaya I.E.</b> Features of radiation of forest fires.....	66
<b>INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....</b>	<b>76</b>
<b>Zhevnerchuk D.V., Aristov A.V., Gerasimov Y.V.</b> Semantic in teroperability of dialog information systems.....	76
<b>Poletaev A., Korelin O.</b> Arithmetic coding process optimization based on correlation between wavelet coefficients magnitude and parameters of R-D curves for JPEG2000 compression algorithm.....	83
<b>Nikulin E.A.</b> Matrix based methods of composite bézier objects reclasterization.....	92
<b>MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION .....</b>	<b>102</b>
<b>Laptev A.I., Bukin P.E., Frolova I.N., Kraynov V.V.</b> Selection process automation of technological equipment.....	102
<b>Piliposian S.Y.</b> Measurement error of random solid body moment of inertia.....	110
<b>Koshelev O., Kalynov O., Frolov L.</b> The engineering and design pre-production automation problem solving algorithm and the appropriate software products minimum requirements in a concrete company.....	124
<b>NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS .....</b>	<b>130</b>
<b>Beznosov A.V., Bokova T.A., Drozdov Yu.N. , Makhov K.A.</b> Tribology circuits innovative reactors on fast neutrons with HLMC.....	130
<b>Kresov D.G.</b> About dynamics of the flow boiling-up water coolant in channels of the reactor under pressure.....	135
<b>Salmin A.I.</b> Problem of creation of aerostat, filled by electrons instead of lifting GAS.....	146

<b>LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS .....</b>	<b>156</b>
<b>Belyakov V.V., Galkin D.A., Zaytsev A.S., Zezulin D.V., Kudryashov E.M., Makarov V.S.</b> Evaluation of effectiveness of special vehicles in snow-covered terrain.....	156
<b>Barakhtanov L.V., Manyanin S.E.</b> The estimation of the dependencies to deforming the snow.....	167
<b>Barakhtanov L.V., Kotlyarenko V.I., Manyanin S.E., Sokolov I. A.</b> Investigation of base characteristics of tyres of ultralow pressure.....	172
<b>PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....</b>	<b>179</b>
<b>Frantsev M. E.</b> Analysis of operational and economic aspects of the model design optimization of amphibious hovercraft for the carriage of passengers.....	179
<b>Ershov N.V., Ershov N.W.</b> Limit values of metacentric radius and metacentric height.....	185
<b>Khimich V.L., Khripach N.A., Lezhnev L.Yu., Papkin B.A., Shustrov F.A., Ivanov D.A., Sonkin V.I., Papkin I.A.</b> Simulation of promising diesel oxidation catalyst.....	191
<b>Lobastov V., Zelichenko E.</b> Integration processes in water transport in the cooperation of russia and un ec.....	197
<b>ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY .....</b>	<b>206</b>
<b>Dmitriev S.M., Plehov A.S., Titov V.G., Titov D.U., Yashin S.N.</b> Algorithms of management active filter harmonicas of the system electrical drive alternating current.....	206
<b>Smirnov A.YU.</b> The radial electromagnetic bearings dimensions determination by means of machihe's constant.....	215
<b>METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS .....</b>	<b>221</b>
<b>Bells V.M., Ivanov I.V., Dolgopolov A.M.</b> Effect of chemical composition on the structure and properties of foundry tool steel die * hot deformation.....	221
<b>Palatkina L.V.</b> Features of structurization in grey pig-iron.....	227
<b>Yarovaya E. I., Ulyanov V.A., Spasskaya M.M., Gusev A.Yu.</b> Multiobjective optimization of technological processes of blank production.....	239
<b>CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES .....</b>	<b>246</b>
<b>Khramov A.A., Gunko Yu.L., Kozina O.L., Mikhalenko M.G.</b> Influence of electrodes' construction on a vertical distribution of current in a nickel-iron accumulator.....	246
<b>Komova E.P., Skorobogatova E.V., Arbatsky A.P., Kartashov V.R.</b> Chitosan interaction with some d-metal ions in water solution of acetic acid.....	252
<b>ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT .....</b>	<b>258</b>
<b>Borisov S.A., Plekhanova A.F.</b> Innovative application of mathematical methods for social – economic forecasting .....	258
<b>Sharova A.A., Plekhanova A.F.</b> Modeling infrastructure of risk-management based on the process approach (on the example of chemical enterprises).....	265
<b>Romashova I.B., Shigina A.E.</b> Innovation behavior as the factor of the realization of the innovation potential.....	273
<b>Soldatova Y.S., Yashin S.N.</b> Improved methodology for assessing the financial and economic conditions and opportunities for companies to implement innovation.....	280

<b>SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....</b>	288
<b>V.I. Kazakova</b> The middle class and modernization: new culture of communism reconstructing.....	288
<b>Malakhova J.V.</b> On the issue of method history.....	295
<b>Merkulov A.E.</b> Historical background, methodology and main propositions of the postindustrial society theory.....	303
	309
<b>MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....</b>	
<b>Vavilov V.D.</b> Optimization features mikroakselerometrs with displaced an axis swing of the pendulum.....	309
	319
<b>Gavrilov A.A., Shipunov A.N.</b> Modernization of diffusion bonding process.....	325
<b>Gavrilov A.A., Shipunov A.N.</b> Method for improvement of silicon shrinkage accuracy.....	
<b>MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES .....</b>	331
<b>Yakovlev E.I., Tsenova A.A.</b> The algorithm for computing bases of two-dimensional homology groups of the branched triangulated surfaces.....	331
<b>Mityakov E.S., Sazontov V.A.</b> Application of adaptive filtration algorithms to forecast economic dynamics.....	339

# РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.391.27

Е.Л. Белоусов, В.Ф. Брянцев, К.Л. Войткевич, А.В. Кейстович, Х.И. Сайфетдинов

## ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ АВИАЦИОННОГО РАДИОСВЯЗНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПРИНЦИПУ «ПРОГРАММИРУЕМОЕ РАДИО»

ОАО «Научно-производственное предприятие “Полет”»

Рассмотрены вопросы построения оборудования авиационной радиосвязи по технологии SDR - «программируемое радио». Приведены преимущества применения цифровой обработки сигналов в передающем и приемном трактах радиостанции.

*Ключевые слова:* радиостанция, авиационная радиосвязь, программируемое радио, технология SDR.

В настоящее время к радиоэлектронным средствам, в том числе и к оборудованию авиационной радиосвязи, предъявляются требования упрощения их модернизации при введении дополнительных услуг, а также удешевления процесса эксплуатации. Стремительный прогресс развития цифровой техники: микропроцессоров, сигнальных процессоров, персональных компьютеров привел к созданию новой технологии – «software-defined radio» (SDR), называемой «программируемое радио».

При использовании технологии SDR практически весь объем работ по формированию и обработке радиосигнала перекладывается на программное обеспечение, которое с помощью процессоров управляет работой некоторых конкретных специализированных устройств. Цель такого подхода – создать систему, которая может принимать, передавать практически любые радиосигналы и в режиме реального времени поддерживать разнообразные изменяющиеся радиопротоколы с помощью программного обеспечения, которое априори является гибким и адаптивным.

В режиме приема SDR с помощью программных алгоритмов могут быть реализованы такие функции, которые очень сложно получить при построении приемника на аналоговых элементах.

Идеальная реализация SDR-приемника – это подключение антенны через схему согласования (полосовой фильтр) непосредственно к аналого-цифровому преобразователю (АЦП), соединенному с процессором. В таком случае программное обеспечение, запущенное на быстродействующем процессоре, обеспечивало бы обработку поступающего потока радиосигналов и преобразовывало бы их в требуемую форму (рис. 1). Для передатчика, изготовленного по технологии SDR, радиосигнал формируется с помощью быстродействующего процессора и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), подключенного через усилитель мощности и схему согласования непосредственно к антенне (рис. 2).

За счёт применения цифровой обработки достигаются высокие параметры по подавлению неиспользуемой боковой полосы и по форме спектра передаваемого сигнала. Проблемы идентичности фазовых и амплитудных соотношений между квадратурными сигналами  $I$  и  $Q$  преодолеваются в SDR программными методами. Для этого предусматривается ав-

томатическая коррекция амплитуды и фазы сигналов  $I$  и  $Q$ , что обеспечивает подавление спектральных составляющих в нерабочей полосе до уровня минус 90 дБ. Однако в этом случае требуются встроенные в программное обеспечение процессора таблицы, в которые заносится информация о расхождении фазовых и амплитудных соотношений между квадратурными сигналами  $I$  и  $Q$  на определенных частотах. В ряде случаев с помощью программы сканируются диапазоны, выбираются определенные мощные радиосигналы как опорные, подбираются наиболее оптимальные фазовые и амплитудные соотношения. При перестройке по диапазону или смене диапазона данные о требуемой коррекции фазы и амплитуды выбираются из таблицы, что позволяет программе поддерживать высокое подавление спектральных составляющих в нерабочей полосе.

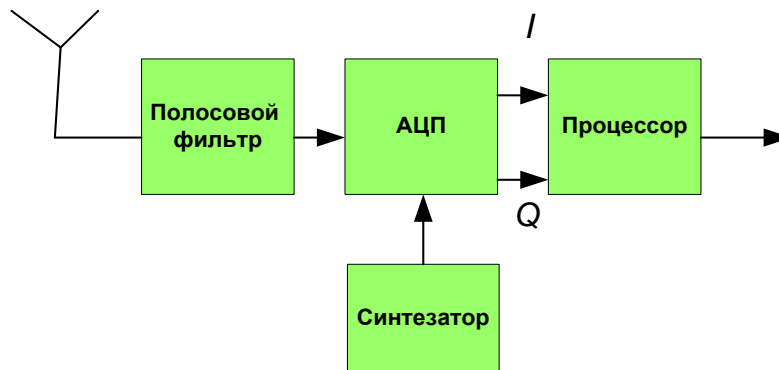


Рис. 1. Структурная схема приемника, построенного по технологии SDR

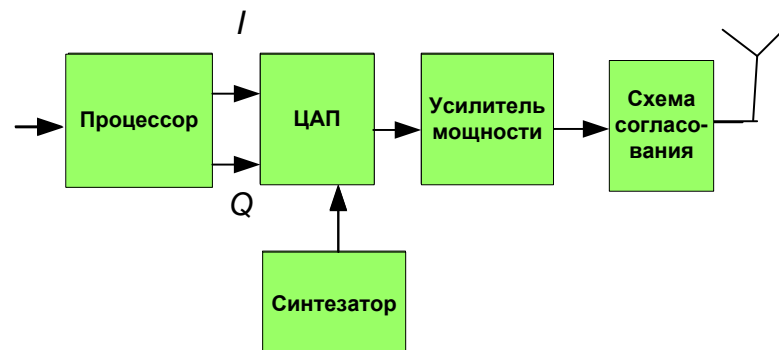


Рис. 2. Структурная схема передатчика, построенного по технологии SDR

Наблюдается тенденция разработки новых технологий цифровых гибкоперестраиваемых РЭС, в которых обеспечивается оперативный перевод радиосредств программным способом с одного режима работы на другой. В области радиосвязи такой подход реализуется в программируемой радиостанции, в которой осуществляется быстрый переход с обработки одного вида сигналов на другие со сменой видов модуляции, кодирования и перемежения в зависимости от параметров радиоканала связи и существующей помеховой обстановки. Программируемая радиостанция интегрирует функции радиостанции, аппаратуры передачи данных и речи (кодека, модема) с помощью программной реализацией видов модуляции, кодирования и перемежения с возможностью автоматического переключения и введения программным способом через внешний интерфейс новых режимов работы.

Программируемая радиостанция, которая может быть использована в бортовых и наземных комплексах авиационной радиосвязи, состоит из аналоговых высокочастотных модулей дальней связи (МДС) и ближней связи (МБС), блока цифровой обработки сигнала (БЦОС) и представляет собой широкодиапазонный комплекс связи – аналог радиостанции

диапазона (2-400) МГц. Этот диапазон частот в настоящее время ограничивается возможностями существующих аналогово-цифровых преобразователей, а именно, их быстродействием. Параметры модулей МДС и МБС взаимосвязаны с техническими характеристиками антенно-фидерных систем в ДКМВ и МВ-ДМВ диапазонах соответственно. Отличие модулей МДС и МБС заключается в том, что из-за различия радиусов зон обслуживания: в первом случае - загоризонтная, а во втором – в зоне прямой видимости, они работают в разных диапазонах частот и режимах связи, имеют разную выходную мощность передающих устройств и компоновку антенно-фидерного тракта.

БЦОС обеспечивает выполнение следующих операций:

- формирует радиоканалы связи в ДКМВ и МВ-ДМВ диапазонах;
- обрабатывает и формирует сигналы (осуществляет операции: кодирование/декодирование, модуляция/демодуляция и перемещение/деперемещение);
- выполняет функции частотного преобразования и фильтрации радиосигналов;
- осуществляет параллельную цифровую обработку сигналов в реальном масштабе времени с помощью соответствующих программных модулей одновременно нескольких каналов связи, организованных в ДКМВ, МВ-ДМВ диапазонах;
- осуществляет управление аналоговыми высокочастотными модулями МБС и МДС (устанавливает режим связи, вид модуляции и частоту передачи, ширину полосы, и т.д.);
- обеспечивает согласование выходного сопротивления модуля МДС с параметрами антенно-фидерного тракта на всех рабочих частотах.

Технология SDR определяет набор аппаратных и программных технологий, где некоторые или все функции обработки данных на физическом уровне созданы посредством модифицируемого или встроенного программного обеспечения, функционирующих на программных технологиях обработки информации. Такого рода устройства имеют в своём составе вентиляльные матрицы с эксплуатационным программированием (FPGA), процессоры цифровых сигналов (DSP), процессоры общего назначения (GPP), программируемые системы на кристалле (SoC) или иные специфические прикладные программируемые процессоры. Использование такого рода технологий позволяет наращивать новые функции на устройствах радиосвязи, а также добавлять возможности к уже существующим системам без привлечения дополнительных аппаратных средств.

Рассмотренные материалы относятся к возможности организации лишь одного радиоканала связи. На практике в большинстве случаев используются многоканальные системы радиосвязи, обеспечивающие одновременную работу по нескольким направлениям. Покажем на примере отечественной системы управления воздушного движения (УВД) возможности использования оборудования, созданного по технологии SDR.

В России работы по организации новой системы УВД предусмотрены «Концепцией создания и развития Аэронавигационной системы России» [1–9, 11]. Одной из основных целей концепции является модернизация существующей системы воздушно-наземной связи. Анализ состояния и перспектив развития в стране и за рубежом показывает, что значительное улучшение тактико-технических характеристик системы достигается за счет комплексирования информации всех каналов связи «воздух-земля», автоматизации процессов управления и восстановления связи, интеграции ресурсов технических средств [10, 11]. Выполнить эти процедуры позволит создание радиосвязного оборудования, основанного на технологии SDR, за счет формирования параллельных резервируемых каналов на различные диапазоны частот, виды модуляции и кодирования, способы организации связи.

Во всех сферах управления воздушным движением связь является ключевым элементом, обеспечивающим улучшение эксплуатационных характеристик и безопасности полетов. Для достижения требуемого уровня безопасности полетов требуется система связи высокого качества в части целостности, надежности связи, защиты информации и предсказуемости рабочих характеристик сети. В сфере работы авиакомпаний радиолинии связи «воздух-земля» являются фактором, обеспечивающим их конкурентоспособность. Растет объем информации,

передаваемой с борта воздушного судна (ВС). Современные бортовые блоки управления связью могут автоматически переключаться с аппаратуры спутниковой и ВЧ связи на радиоканал ОБЧ диапазона, как только будет обнаружена соответствующая несущая частота. Аналогично обеспечивается переключение и на оборудование вторичного радиолокатора (ВОРЛ) режима S. Эти операции могут быть осуществлены с помощью существующих вычислительных ресурсов оборудования по технологии SDR программными методами. Гармоничное сочетание возможностей ОБЧ, ВЧ и L диапазонов, основанное на некоррелированности механизмов распространения радиоволн, используется с целью обеспечения глобального сплошного перекрытия воздушно-наземной связью с высокой надежностью. Рассмотрим один из алгоритмов обработки информационных потоков от удаленных наземных станций ВЧ и ОБЧ диапазонов, станций спутниковой связи, вторичных обзорных радиолокаторов режима S при обмене данными с воздушными судами с помощью оборудования, созданного по технологии SDR.

В гражданской авиации используются различные подсистемы воздушно-наземной связи и алгоритмы работы в них должны быть заложены в базу данных воздушного судна, конкретно – в базу данных перспективных бортового и наземного комплексов связи, основанных на технологии SDR. Рассмотрим процедуры организации воздушно-наземной связи в системе УВД.

В авиационной системе связи, адресации и донесений ACARS радиоканалы ОБЧ диапазона используются для передачи блоков данных объемом до 220 байт со скоростью 2400 бод в соответствии с требованиями ARINC 618. Одно сообщение может содержать до 16 блоков. Длительность передачи многоблочных сообщений о местонахождении самолета составляет не более секунды. Доступ к среде передачи данных осуществляется по алгоритму CSMA - случайного множественного доступа с прослушиванием несущей. При интенсивности обмена одно сообщение в минуту с борта воздушного судна, наземная станция системы ACARS обеспечивает обслуживание до 30 ВС в зоне прямой видимости [12].

В режиме передачи данных по радиолинии связи ОБЧ диапазона VDL-2 обеспечивается совместимость с моделью OSI и обмен сообщениями со скоростью 31500 бит/с сигналами с модуляцией D8PSK с множественным доступом с контролем несущей с настойчивостью  $p$ . Настойчивость  $p$  означает, что при наличии данных для передачи у канального уровня и свободном канале, будет произведена передача с вероятностью  $p$ . Подбор величины вероятности  $p$  и длительности паузы повышает эффективность использования канала передачи путем уменьшения числа коллизий между соперничающими передатчиками и дает возможность регулирования приоритета доступа, назначая некоторым ВС более высокие значения вероятности  $p$ . Наземная станция режима VDL-2 обозначает себя на общем канале передачи данных, периодически посылая служебные кадры GSIF, которые содержат рабочие параметры радиоканала связи и станции [13].

Радиоканал ВЧ диапазона «воздух-земля» обеспечивает связь за пределами прямой видимости на расстоянии до 4000–8000 км. Этот канал является единственным средством связи в областях выше  $70^{\circ}$  северной широты, не имеющих наземной инфраструктуры, и во время трансокеанских перелетов. Этот канал является более дешевым по сравнению со спутниковой связью. Данный вид связи хорошо подходит для системы организации воздушного движения России в силу размеров территории, ее неосвоенности и физико-географических условий. Однако параметры в ВЧ радиоканале существенно зависят от состояния ионосферы, что требует применения специальных алгоритмов выбора рабочих частот, которые реализованы в системе HF DL. В ней осуществляются процедуры составления канала с автовыбором рабочей частоты, автоматического ведения связи на всех уровнях (физическом, канальном и сетевом) с многопараметрической адаптацией радиолинии по частоте, скорости передачи, видам модуляции и кодирования, а также по пространственному разнесению наземных станций, гарантирующие надёжность связи не менее 99% при достоверности не хуже  $10^{-6}$ . В системе HF DL в соответствии с требованиями ARINC 635 используется автоматический режим ведения связи с регистрацией самолета на наземной станции сети наземных станций (НС) ВЧ диапазона. При регистрации ВС посылает запрос на вхождение в систему связи наземной

станции в соответствии с протоколом доступа к каналу с временным разделением (TDMA) в разрешенном временном интервале и на частоте, выбранной ВС по результатам анализа качества каналов связи. Наземная станция управляет доступом самолетов к каналу путем назначения слотов случайного и резервированного доступа для каждого 32-секундного временного кадра, разбитого на 13 слотов, и передает эти назначения в сквиттерах [2]. Среднее время регистрации самолета при интенсивности потока сообщений с борта 11 сообщений в час и 26 самолетах, использующих один канал, не превышает 60 с, а время задержки при передаче сообщения в состоянии регистрации не превышает 34 с [7]. В HFDL используется сигнал с 2-, 4- или 8-позиционной фазовой манипуляцией, в зависимости от качества канала связи (отношения сигнал/помеха), оцениваемого по приему каждого сигнала. Скорость манипуляции в канале ВЧ диапазона – до 1800 бод.

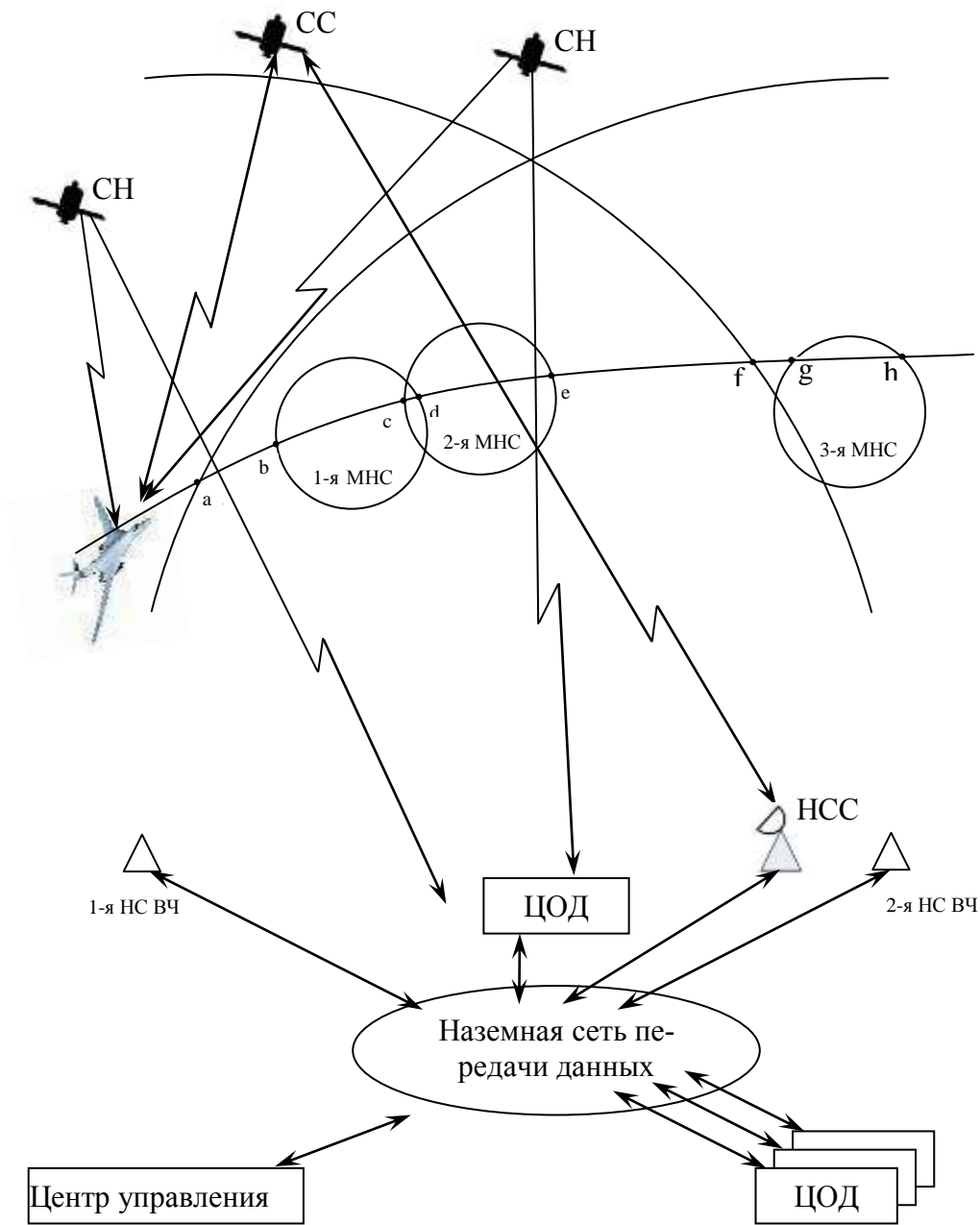
Авиационная система спутниковой связи обеспечивает доступ воздушного судна к наземным сетям связи через авиационные наземные станции спутниковой связи (НСС) (GES), которые осуществляют синхронизацию и координацию передачи данных по каналу «земля-воздух». Четыре типа каналов определены для использования в авиационной спутниковой системе связи ASCS. Авиационные спутниковые каналы используют цифровую модуляцию для эффективного использования мощности спутника и полосы частот. Каналы используют одну из двух видов модуляции в зависимости от канальной скорости. Низкие канальные скорости используют авиационную двоичную фазовую манипуляцию (ABPSK), в которой альтернативные символы модуляции передаются по синфазному ( $I$ ) и квадратурному ( $Q$ ) каналам. В каналах с высокими скоростями используется авиационная четверичная фазовая манипуляция (AQPSK).

Для обслуживания ВС в широкоэвентральном режиме автоматического зависимого наблюдения в соответствии с рекомендациями ICAO предусматривается формирование на ВС более длительного самогенерируемого сигнала режима  $S$ . Наземный вторичный обзорный радиолокатор режима  $S$  обеспечивает практическое применение всех приложений УВД в каналах «воздух-земля» [5]. В наземном вторичном обзорном радиолокаторе режима  $S$  осуществляются операции приема, проверки достоверности и обработки сигналов с последующим вводом их через центр обработки данных (ЦОД) в наземную сеть передачи данных.

Коммутация пакетов сообщений между наземными станциями не представляет сложности, так как их протоколами уже предусмотрены процедуры переключения в наземной сети передачи данных [1, 4, 10]. Для обеспечения бесперебойной связи с ВС на протяжении всех участков полета требуется взаимодействие между различными подсистемами воздушно-наземной связи. Такое взаимодействие можно осуществить с помощью централизованной обработки сообщений и сокращения их избыточности. Очевидно, что центр обработки данных должен объединять технологии различных наземных сетей и являться многопротокольным региональным маршрутизатором. Удаленные наземные спутниковые, ВЧ, ОВЧ станции и ВОРЛ режима  $S$  подключаются к центру обработки данных посредством наземных сетей передачи данных с протоколом X.25 (рис. 3).

Глобальные навигационные спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС с помощью спутников навигационных (СН) позволяют самолету самому определить свое местоположение. Функция автоматического зависимого наблюдения (АЗН) обеспечивает сбор информации о географических координатах самолета, его высоте и курсе. Информация может передаваться наземным службам один раз в несколько минут, тем самым обеспечивается возможность слежения за взаимным расположением самолетов, прогнозирования появления ВС в зонах обслуживания других наземных станций и внесения необходимых корректив [6]. В функции центра обработки данных входит: слежение за сообщениями с ВС по имеющемуся каналу связи, передача информации о сервисах: тип и рабочая частота наземной станции на пути следования ВС при подходе к границе зоны видимости текущей наземной станции и регулировка потоков данных. Таким образом, воздушному судну с бортовым комплексом связи по технологии SDR будет заранее известно, на каком канале далее будет доступна передача данных.





**Рис. 3 Упрощенная структурная схема системы управления воздушным движением:**

- ЦОД – центр обработки данных и маршрутизации;
- траектория движения воздушного судна;
- точки *a ... h* – моменты переключения каналов связи;
- границы зон связи радиостанций ОВЧ диапазона и ВОРЛ режима *S* в многорежимной наземной станции;
- границы зон связи наземных станций ВЧ диапазона

Учитывая то, что пролетающие в воздушном пространстве России ВС имеют на своем борту оборудование, работающее в разных режимах передачи данных, то для их обслуживания должна быть использована многорежимная наземная станция (МНС), созданная по технологии SDR.

При входе ВС в зону действия одной из многорежимных наземных станций, центр обработки данных формирует сообщение с информацией о типе и рабочих параметрах следящей (или нескольких) по маршруту полета наземной станции, на которую следует переключиться. Дополняя информацию полетного плана, ЦОД также удостоверяется, что МНС готова к обслуживанию нового ВС. Данное сообщение может носить лишь рекомендательный характер, так как основные протоколы возлагают функцию инициирования связи на воздушное судно. При отсутствии стандартных средств обеспечения данного вида сообщения может быть сформировано служебное сообщение с необходимой информацией в части свободного текста, выводящееся на терминал кабины пилотов. Тип НС может указываться в идентификаторе спутниковой, ОВЧ или ВЧ станции, а также ВОРЛ. Стандартизовав этот тип сообщений и сократив избыточность информации, этот процесс можно автоматизировать.

На рис. 3 показана траектория движения самолета, при которой связь со службами УВД осуществляется через наземные станции в следующем порядке: до точки  $a$  – спутник связи (СС), 1-я наземная станция ВЧ диапазона (НС ВЧ); на участке  $(a - b)$  – 1-я и 2-я НС ВЧ; спутник связи; на участке  $(b - c)$  – 1-я и 2-я НС ВЧ, ОВЧ станция и ВОРЛ 1-й МНС, спутник связи; на участке  $(c - d)$  – 1-я и 2-я НС ВЧ, ОВЧ станции и ВОРЛ 1-й и 2-й МНС, спутник связи; на участке  $(d - e)$  – 1-я и 2-я НС ВЧ, ОВЧ станция и ВОРЛ 2-й МНС, спутник связи; на участке  $(e - f)$  – 1-я и 2-я НС ВЧ, спутник связи; на участке  $(f - g)$  – 2-я НС ВЧ, спутник связи; на участке  $(g - h)$  – 2-я НС ВЧ, ОВЧ станция и ВОРЛ 3-й МНС, спутник связи; после точки  $h$  – спутник связи, 2-я наземная станция ВЧ диапазона. Переключение канала воздушно-наземной связи при переходе от одного участка трассы к другому осуществляется по внутри-сетевому протоколу [1], в котором определяются наиболее надежные каналы с оптимальной стоимостью и наивысшей пропускной способностью. В ЦОД информация с ВС проверяется на достоверность, комплексируется и распределяется между потребителями и главным центром управления системы.

Министерство обороны США усиленно содействует развитию технологии SDR через многомиллиардный бюджет программы «Совместные тактические радио системы» (JTRS). Большинство оборонных ведомств стран также развивают проекты SDR, схожие с программой JTRS. Все эти усилия направлены на эффективное применение различных версий SDR для широкого круга применений в большом диапазоне зон обслуживания разнообразными аппаратно-программными средствами: от портативных приборов до оборудования, монтируемого на транспортных средствах, воздушных судах и кораблях.

В России ГУП НПЦ "ЭЛВИС" разрабатывает серию SDR-приемопередатчиков "Мультифлекс" – перепрограммируемых аналогово-цифровых микросхем типа "система на кристалле", основанных на SDR-технологии, предназначенных для использования в телекоммуникационной аппаратуре и фазированных антенных решетках.

Комплексы связи, созданные по принципу «программируемое радио», имеют следующие преимущества, которые позволяют использовать их на объектах авиационной сети радиосвязи:

- повышается аппаратурная надежность за счет автоматического резервирования и реконфигурации;
- увеличивается длительность жизненного цикла в условиях непрерывного совершенствования протоколов обмена данными «воздух-земля»;
- уменьшается стоимость и сокращается время модернизации оборудования, проводимого за счет коррекции только программного обеспечения.

### Библиографический список

1. ARINC 635-3 Specification. HF Data Link Protocols. 2000.
2. ARINC 753-3 Characteristics. HF Data Link System. 2001.
3. ARINC 618-5 Specification. Air/Ground character-oriented protocol. 2000.
4. ARINC 631-3 Specification. VHF Digital link implementation provisions. 2000.
5. Приложение 10 к соглашениям ICAO, том 3.
6. **Кейстович, А.В.** Использование навигационных сообщений автоматического зависимого наблюдения в качестве источника внешнетраекторных измерений / А.В. Кейстович, А.А. Кейстович, Л.М. Вдовин / Кибернетика и технологии XXI века: сб. ст. V Международной научно-технической конференции. Воронеж. 2004. С. 205–209.
7. Руководство по ВЧ-линии передачи данных ICAO, 2000.
8. DO-265. Стандарты минимальных эксплуатационных характеристик (MOPS) для авиационной подвижной высокочастотной линии передачи данных (HF DL). RTCA. 14 декабря 2000.
9. Патент РФ № 2286030. ВЧ система и способ обмена пакетными данными. 2006.
10. Патент РФ № 2308175. Центральная станция радиосвязи с подвижными объектами. 2007.
11. **Кузьмин, Б.И.** Авиационная цифровая электросвязь в условиях реализации "Концепции ИКАО-ИАТА CNS/ATM" в Российской Федерации: монография / Б.И. Кузьмин; под ред. Е.Л. Белоусова. – СПб. – Н. Новгород: – ООО "Агентство "ВиТ-принт", 2007. – 496 с.
12. **Бочкарев, В.В.** Автоматизированное управление движением авиационного транспорта / В.В. Бочкарев, Г.А. Крыжановский, Н.Н. Сухих. – М.: Транспорт, 1999. – 319 с.
13. **Кейстович, А.В.** Требования к характеристикам многорежимной наземной станции для организации ОБЧ линий передачи данных «воздух-земля» / А.В. Кейстович, Л.М. Вдовин / Кибернетика и технологии XXI века: сб. ст. V Международной научно-технической конференции. Воронеж. 2004 С. 495–500.

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2012*

**Ye.L. Belousov, V.Ph. Bryantsev, K.L. Voytkovich, A.V. Keystovich, Kh.I. Sayphetdinov**

### ISSUES OF DEVELOPING AVIATION RADIO COMMUNICATION EQUIPMENT ON “SOFTWARE-DEFINED RADIO” PRINCIPLE

Joint Stock Company “POLYOT Research & Production Company”

**Purpose:** Assessing the possibility of aviation radio communication equipment development on the basis of SDR technology – “software-defined radio”.

**Design/methodology/approach:** The article addresses tendencies of developing new technique for digitally responsive radio facilities, which provide software-based real-time change-over from one operation mode to another, speedy change-over from one signal type being processed to another, change of coding, interleaving and modulation types depending on the radio communication channel parameters and current jamming situation.

**Findings:** The advantages of developing radio communication equipment on the basis of SDR technology are shown. They are as follows: generation of parallel automatic backup channels for different frequency bands, modulation and coding types, methods of communication organization.

**Research limitations/implications:** Aviation radio communication networks.

**Originality/value:** Communication complexes developed according to SDR technology offer high hardware reliability due to automatic backing-up and reconfiguration, and exhibit expedite equipment update, which involves only software correction.

*Key words:* radio, aircraft radio communication, software-defined radio, SDR technology.

УДК 621.318.136.029.64

А.Ю. Седаков

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ  
ФЕРРИТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДНЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ  
БОРТОВЫХ РЛС КВЧ ДИАПАЗОНА**

Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Представлена обобщенная методика расчета геометрической конфигурации ферритовых элементов для волноводных переключателей. Показано, что полученные приближенные соотношения для расчета размеров можно использовать при проектировании переключающих устройств для бортовых РЛС КВЧ диапазона.

*Ключевые слова:* развязывающее устройство, переключающее устройство, ферритовый элемент, КВЧ диапазон.

**Введение**

При проектировании приемопередающей аппаратуры бортовых РЛС обычно предъявляются жесткие технические требования ко всем составляющим блокам и узлам (малые габариты, низкое энергопотребление, высокое быстродействие переключения режимов работы, устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов и т.п.). С позиций удовлетворения этих требований наиболее перспективными переключающими устройствами приемопередатчиков и АФС являются волноводные переключатели с «внутренней» магнитной памятью [1-4], создаваемые на основе волноводных Y- или T-циркуляторов, в которых магнитный поток замыкается внутри ферритового элемента (ФЭ) с прямоугольной петлей гистерезиса.

Принцип работы таких переключателей основан на изменении направления намагниченности ФЭ за счет пропускания через управляющий виток импульсов тока различной полярности. Создаваемый импульсами тока магнитный поток замкнут внутри ФЭ, поэтому после прекращения протекания тока ФЭ остается намагниченным в определенном направлении до тех пор, пока через управляющий виток не будет пропущен импульс тока противоположной полярности. Рассматриваемое переключающее ферритовое устройство (ФУ) конструктивно мало отличается от волноводных развязывающих ФУ. Принципиальное отличие имеет только геометрия ФЭ. Конфигурация ФЭ должна быть такой, чтобы при намагничивании в нем формировался замкнутый магнитный поток, и обеспечивалась возможность выполнения геометрических размеров и обработки поверхностей с заданными точностью и качеством. С этих позиций наиболее подходящими для практического использования являются ферритовые элементы в виде призматического Y-разветвления [5, 6]. Однако возможно и другое конструктивное исполнение ФЭ, например, в виде треугольной призмы или какого-то другого сочетания наружных образующих поверхностей [7, 8]. Возможно различное конструктивное исполнение и внутренней конфигурации ФЭ.

Строгой теории, позволяющей рассчитывать и оптимизировать геометрию ФЭ для переключающих ФУ, до настоящего времени не создано, поскольку для решения соответствующей краевой задачи электродинамики конфигурация ФЭ очень сложная. Разработчиками переключающих ФУ используются различные полуэмпирические методики определения геометрии ФЭ, например, метод электродинамического подобия [9].

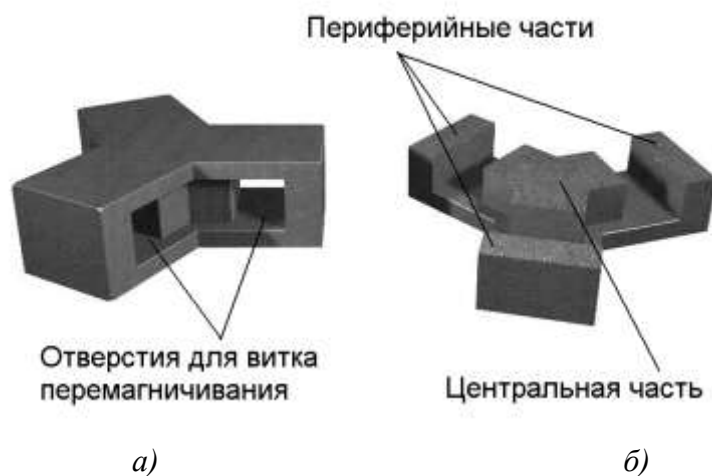
В процессе выполнения работ по созданию переключающих устройств в ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю.Е. Седакова», разработана достаточно простая методика приближен-

ного расчета конфигурации ФЭ [5, 6]. Поскольку в статическом состоянии (после прекращения действия управляющего сигнала) переключающие ФУ функционально не отличаются от развязывающих ФУ, логично было проанализировать возможность использования для создания методики инженерного расчета геометрических размеров ФЭ переключающих ФУ разработанной ранее методики расчета ФЭ развязывающих ФУ [6, 10, 11]. Первоначально данная возможность расценивалась только как потенциальная, выполнимая при определенных допущениях, основным из которых является возможность условного выделения в ФЭ переключающих ФУ областей, аналогичных по режиму работы ФЭ областям развязывающих ФУ.

Впоследствии отмеченная потенциальная возможность реализована в виде методики приближенного расчета геометрии ФЭ на основе использования результатов расчета цилиндрических элементов развязывающих ФУ. При этом приоритетным фактором выбора формы ФЭ был учет возможностей производственной и технологической баз [12, 13], который включал в себя анализ возможностей имеющегося в институте технологического оборудования и инструмента, а также перспективы их совершенствования и обновления. В настоящей статье автором предлагается обобщение основных положений этой методики с учетом ее апробации и уточнений, которые вносились в процессе проектирования и выпуска переключающих ФУ в течение последнего десятилетия.

### Постановка задачи

Прежде, чем формулировать в общем виде задачу расчета геометрических размеров ФЭ переключающих ФУ, рассмотрим конкретный пример конфигурации ФЭ, используемых в переключающих ФУ КВЧ диапазона. На рис. 1, *а* в увеличенном масштабе показан внешний вид (рис. 1, *а*) и внутренняя конфигурация (рис. 1, *б*) центральной и периферийной частей ФЭ в виде призматического Y-разветвления. Как видно из рисунка, каждое плечо Y-разветвления ФЭ имеет отверстия, предназначенные для размещения управляющего витка провода перемангничивания, параллельные плоскости основания. Эти отверстия разделяют ФЭ на центральную и три периферийные части. Центральная часть ферритового элемента (рис. 1, *б*) является аналогом цилиндрических ФЭ Y- и T-циркуляторов [14]. Отличие заключается лишь в том, что она (центральная часть) имеет форму многогранной призмы. Периферийные части ФЭ служат замыкателями магнитного потока в ФЭ, создаваемого импульсами тока, пропускаемого через управляющий виток, охватывающий центральную часть ФЭ. Управляющий виток провода перемангничивания проходит через отверстия в плечах Y-разветвления и размещается в пазах, выполненных в ФЭ по периметру центральной части.



**Рис. 1. Ферритовый элемент:**  
*а* – общий вид; *б* – внутренняя конфигурация

В общем случае центральная часть ФЭ может быть выполнена не только в виде девятигранной, но и в виде трехгранной, шестигранной или любой другой призмы с числом граней, кратным трем, а также в виде цилиндра. Сущность методики расчета [5, 6] заключается в следующем:

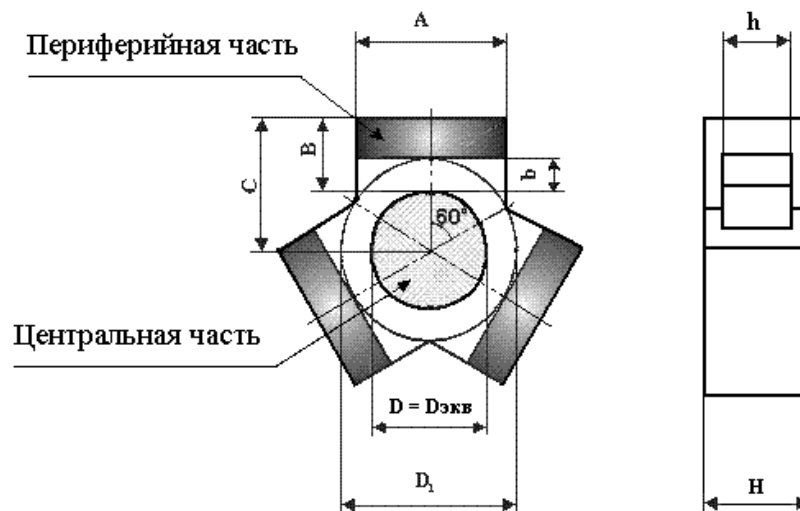
1. ФЭ условно разделяется на две части: центральную рабочую и периферийную вспомогательную. При этом предполагается, что центральная часть функционально аналогична цилиндрическому ФЭ развязывающих ФУ, поэтому ее геометрические размеры должны соответствовать размерам ФЭ развязывающего ФУ рассматриваемого частотного диапазона. Периферийная часть функционально представляет собой замыкатель магнитного потока с такими геометрическими размерами, при которых обеспечивается сохранение замкнутого магнитного потока внутри ФЭ, созданного в момент действия импульса тока.

2. Полагается, что площадь центральной части и суммарная площадь периферийных частей ФЭ в сечении, параллельном плоскости основания ФЭ, равны (обоснование этого предположения приведено далее в разделе 3).

3. Из условия равенства площадей центральной и периферийных частей сечения ФЭ выводятся выражения для расчета основных геометрических размеров ФЭ, как функций диаметра и длины (высоты) ФЭ, определяемым по методике работ [6, 10].

### Расчет конфигурации ферритовых элементов

Рассмотрим вывод аналитических выражений для расчета геометрии ФЭ с цилиндрической формой центральной части, считая, что известны значения диаметра  $D$  центральной части и высоты  $H$  ФЭ, которые соответствуют значениям диаметра  $D_{\phi}$  и длине (высоте)  $l_{\phi}$  цилиндрического ФЭ развязывающего ФУ заданного частотного диапазона. Схематическое изображение геометрической конфигурации ФЭ для расчета основных его размеров представлено на рис. 2.



**Рис. 2 - Схематическое изображение геометрической конфигурации ФЭ переключающего устройства для расчета его размеров**

Сначала выбирается размер отверстия в поперечном сечении  $b=2\dots 3\delta$ , где  $\delta$  - диаметр провода (вместе с изоляцией), образующего управляющий виток перематничивания ФЭ. Выбор этого размера не имеет каких-либо физических ограничений, должна лишь быть обеспечена возможность свободного размещения и фиксации положения управляющего витка. После этого определяется диаметр окружности  $D_1$ , описанной вокруг поперечного сечения центральной части ФЭ по формуле  $D_1=D+2b$  (рис. 2).

Из геометрии структуры, изображенной на рис. 2, и условия  $D_1=D+2b$  следует, что размер  $A$  определится как

$$A = D_1 \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} D_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} (D + 2b). \quad (1)$$

Размеры  $B$  и  $C$  выбираются из условий равенства площадей центральной части ФЭ  $S_1$  и суммарной площади периферийных частей (замыкателей)  $S_2$ . Это условие получено из следующих соображений: если площадь замыкателей  $S_2$  будет больше площади центральной части ФЭ  $S_1$ , то ФЭ, безусловно, будет функционально пригоден для использования в составе ФУ, но его общие габариты будут избыточны; если площадь замыкателей  $S_2$  будет меньше площади центральной части ФЭ  $S_1$ , это приведет к возрастанию магнитного сопротивления участка магнитной цепи, соответствующей периферийной части ФЭ, а, следовательно, и к возрастанию полного магнитного сопротивления ФЭ, что однозначно приведет к увеличению времени перемагничивания ФЭ (соответственно к увеличению времени переключения ФУ). Таким образом, оптимальным с позиций применения в составе бортовых РЛС является равенство указанных площадей. Следует заметить, что ранее в работах [5, 6] условие равенства этих площадей обосновывалось возможностью обеспечения однородности магнитного потока внутри ФЭ. Это не совсем корректно, поскольку ФЭ представляет собой изогнутый магнитопровод со сложной конфигурацией поверхностей и об однородности магнитного потока внутри него можно судить лишь с определенными приближениями.

Из рис. 2 следует:

$$S_1 = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2)$$

$$S_2 = 3 \times A(B - b) \quad (3)$$

Равенство  $S_1=S_2$  с учетом (2) и (3) приводит к уравнению

$$\frac{\pi D^2}{4} = 3A(B - b) \quad (4)$$

Из выражения (4) определяется размер  $B$

$$B = \frac{\pi D^2}{12A} + b \quad (5)$$

С учетом (1) размер  $B$  вычисляется как

$$B = \frac{\pi D^2}{6\sqrt{3}(D + 2b)} + b. \quad (6)$$

После этого получаем выражение для определения размера  $C$

$$C = B + \frac{D}{2} = \frac{\pi D^2}{6\sqrt{3}(D + 2b)} + \frac{D}{2} + b. \quad (7)$$

Второй размер отверстия  $h=2...3\delta$  в  $Y$ -разветвлении, как и размер  $b$ , выбирается из условия свободного размещения провода управляющего витка в отверстии. При этом нужно учитывать, что толщина стенок между основаниями ФЭ и отверстиями должна быть больше величины  $a=(H-h)/2$ , определяемой прочностными характеристиками используемого материала. Эта величина должна быть такой, чтобы избежать разрушения указанных стенок под воздействием сил, возникающих во время формообразующих операций при изготовлении ФЭ. Экспериментально установлено, что величина стенок в ФЭ должна составлять не менее 0,25 мм.

Очевидно, что выражения (1), (6) и (7) однозначно определяют конфигурацию поперечного сечения ФЭ с учетом введенных условий.

Таким образом, при сделанных упрощениях и допущениях все размеры ферритового элемента переключающего ФУ с цилиндрической формой его центральной части можно считать. Однако изготовление с высокой точностью ФЭ с цилиндрической формой центральной части с технологической точки зрения очень сложная задача. На практике такие ФЭ изготовить не удастся. Конфигурация центральной части ФЭ в разрабатываемых ФУ, как правило, отличается от цилиндрической. Выбор конфигурации, в данном случае, производится с учетом возможностей производственной и технологической баз [8, 13], а именно: с учетом обеспечения возможности получения геометрических размеров и выполнения обработки поверхностей с заданной точностью.

Частный случай вывода аналитических выражений для расчета геометрических размеров ФЭ, центральная часть которого представляет собой девятигранную призму, рассмотрен в работах [5, 6]. В расчетах используется эквивалентный диаметр, принимаемый равным диаметру цилиндрического ФЭ развязывающего ФУ заданного частотного диапазона. Под эквивалентным диаметром понимается диаметр окружности, вписанной в поперечное сечение призматической центральной части ФЭ. При таком подходе строгий учет реальной конфигурации центральной части ФЭ в расчетах невозможен. Экспериментальные исследования переключателей с ФЭ, рассчитанными согласно [5, 6], показали, что центральная рабочая частота таких устройств может отличаться от заданной на 10-15%.

Для учета реальной конфигурации центральной части ФЭ и повышения точности расчета геометрических размеров ФЭ в процедуру расчета целесообразно ввести поправочные коэффициенты.

Из условия, что центральная часть ФЭ переключающего ФУ функционально является аналогом цилиндрического ФЭ развязывающего ФУ, логично допустить, что площадь сечения центральной части ФЭ должна равняться площади сечения цилиндрического ФЭ развязывающего ФУ.

В общем случае площадь сечения центральной части  $S_l$  в полярных координатах можно определить с помощью выражения

$$S_l = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} [r(\varphi)]^2 d\varphi, \quad (8)$$

где  $r$  – полярный радиус переменной точки контура;  $\varphi$  – ее полярный угол.

На практике, как правило, площадь основания призм удобно выражать через диаметр вписанной окружности. Для общего случая, как и в работах [5, 6], под эквивалентным диаметром  $D_{\text{экв}}$  будем понимать диаметр вписанной окружности в сечение центральной части ФЭ. Выбор диаметра вписанной окружности в качестве эквивалентного обусловлен удобством вывода выражений для определения фактической площади через этот диаметр. Очевидно, что средний поперечный размер призматической центральной части ФЭ несколько больше эквивалентного диаметра. Для компенсации этой неточности вводим в расчетные зависимости поправочный коэффициент, смысл которого заключается в установлении отношения между эквивалентным диаметром  $D_{\text{экв}}$  и диаметром  $D_{\text{ф}}$  развязывающего ФУ рассматриваемого частотного диапазона. Условно назовем его поправочным коэффициентом геометрических параметров  $k_{\Gamma}$ .

Эквивалентный диаметр  $D_{\text{экв}}$  центральной части ФЭ можно представить в виде

$$D_{\text{экв}} = k_{\Gamma} D, \quad (9)$$

где  $k_{\Gamma}$  – поправочный коэффициент геометрических параметров;  $D$  – диаметр ФЭ развязывающего ФУ рассматриваемого частотного диапазона (соответствует значению диаметра  $D_{\text{ф}}$ ).

Очевидно, что для цилиндрической центральной части ФЭ эквивалентным диаметром будет сам этот диаметр, т.е.  $D_{\text{экв}} = D$  и  $k_{\Gamma} = 1$ . Это утверждение следует из введенного опреде-



ления эквивалентного диаметра как диаметра окружности, вписанной в поперечное сечение центральной части ФЭ.

Выражение (2) для расчета площади сечения центральной части ФЭ с учетом (9) будет иметь вид

$$S_1 = \frac{\pi(k_{\bar{A}}D)^2}{4}. \quad (10)$$

Соответственно выражения для определения размеров  $A$  (1),  $B$  (6) и  $C$  (7) примут вид:

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2}(k_{\bar{A}}D + 2b), \quad (11)$$

$$B = \frac{\pi(k_{\bar{A}}D)^2}{6\sqrt{3}(k_{\bar{A}}D + 2b)} + b, \quad (12)$$

$$C = \frac{\pi(k_{\bar{A}}D)^2}{6\sqrt{3}(k_{\bar{A}}D + 2b)} + \frac{k_{\bar{A}}D}{2} + b. \quad (13)$$

Из допущения, что площадь сечения центральной части ФЭ переключающего устройства должна равняться площади сечения цилиндрического ФЭ развязывающего устройства рассматриваемого диапазона частот, можно рассчитать значение поправочного коэффициента  $k_{\Gamma}$  для любой конфигурации сечения центральной части ФЭ, выразив площадь поперечного сечения центральной части через эквивалентный диаметр  $D_{\text{экв}}$ . Следует отметить, что указанное допущение является полуэмпирическим. Однако оно является очевидным по физическому смыслу, поскольку при равенстве указанных площадей сечений есть основание говорить о том, что и магнитные потоки электромагнитных полей, а, следовательно, и сами поля в центральной части ФЭ переключающих ФУ и ФЭ развязывающих ФУ отличаются мало. Кроме того, повышение точности определения размеров ФЭ при введении поправочных коэффициентов нашло экспериментальное подтверждение.

Рассмотрим в качестве примера несколько конфигураций сечения центральной части ФЭ, используемых при разработке переключающих ФУ в ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю.Е. Седакова», и определим для них значения поправочного коэффициента  $k_{\Gamma}$ .

На рис. 3 представлены поперечные сечения ФЭ схемы для расчета их геометрических размеров в случае, когда центральная часть выполнена в виде девятигранной (рис. 3, а) и шестигранной (рис. 3, б) призм.

Площадь поперечного сечения центральной части в виде девятигранной призмы вычисляется по формуле

$$S_1 = \frac{9\sqrt{3}}{16} D_{\text{экв}}^2. \quad (14)$$

Эту же площадь можно выразить через усредненный поперечный размер (диаметр  $D$ ), считая его равным диаметру  $D_{\text{ф}}$  развязывающего ФУ, пользуясь выражением (2).

В результате получаем соотношение

$$\frac{9\sqrt{3}}{16} D_{\text{экв}}^2 = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (15)$$

С учетом выражений (9) и (15) рассчитывается значение поправочного коэффициента

$$k_{\Gamma} = \frac{D_{\text{экв}}}{D} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{3}}} \approx 0,898. \quad (16)$$

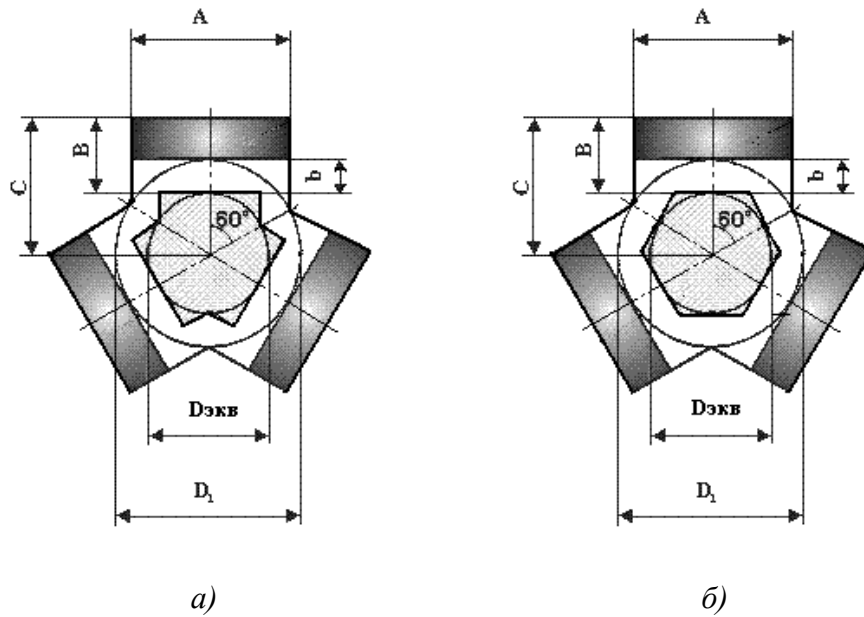


Рис. 3. Эскизы поперечных сечений для расчета геометрических размеров ферритовых элементов с центральной частью в виде девятигранной (а) и шестигранной (б) призм

Аналогично определяем значение поправочного коэффициента для ФЭ с центральной частью в виде шестигранной призмы. В данном случае имеем

$$S_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} D_{\text{экв}}^2, \quad (17)$$

$$k_{\Gamma} = \frac{D_{\text{экв}}}{D} = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}}} \approx 0,952. \quad (18)$$

Аналитические выражения (11), (12) и (13) получены для расчета геометрии ФЭ в виде девятигранной призмы в форме Y-разветвления. В соответствии с рассматриваемой методикой можно получить выражения для расчета основных геометрических размеров ФЭ с различным сочетанием как внешних образующих поверхностей, так и внутренних. Для ФЭ в виде треугольной призмы, сечения для расчета размеров которых представлены на рис. 4, получены аналитические выражения для расчета основных геометрических размеров A, B, C.

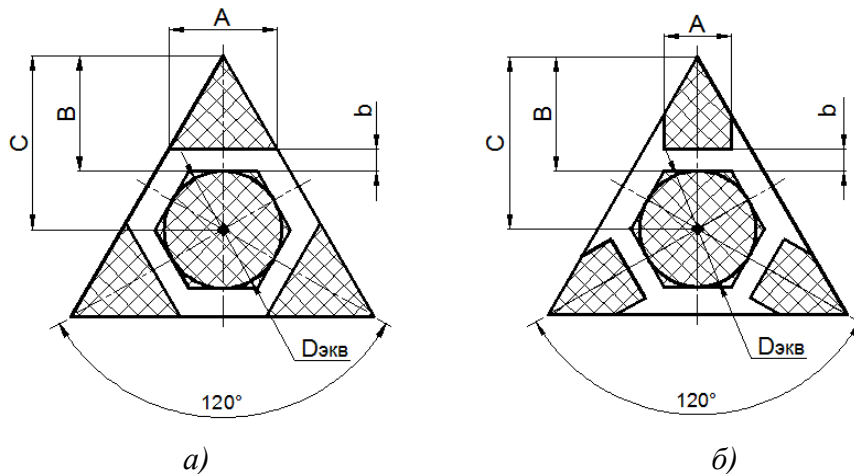


Рис. 4. Эскизы поперечных сечений для расчета геометрических размеров ферритовых элементов в виде треугольной призмы

Для ФЭ с поперечным сечением, представленным на рис. 4, а, эти выражения имеют следующий вид:

$$A = \frac{k_{\bar{A}} D}{3} \sqrt{\sqrt{3}\pi}, \quad (19)$$

$$B = \frac{k_{\bar{A}} D}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{3}}} + b, \quad (20)$$

$$C = \frac{k_{\bar{A}} D}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{3}}} \right) + b, \quad (21)$$

Для ФЭ с поперечным сечением, представленным на рис. 4, б), выражения для расчета размеров  $A$ ,  $B$  и  $C$  имеют вид

$$A = \frac{k_{\bar{A}} D}{\sqrt{3}}, \quad (22)$$

$$B = \frac{3k_{\bar{A}} D}{4} + b, \quad (23)$$

$$C = \frac{5k_{\bar{A}} D}{4} + b. \quad (24)$$

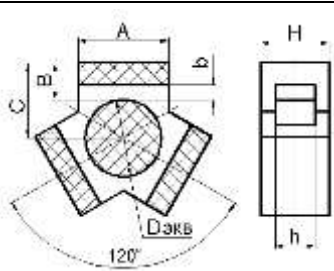
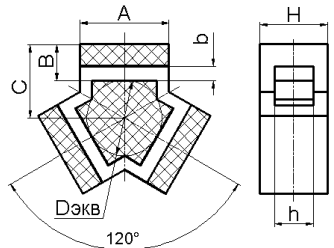
В выражениях (19)–(24) значение коэффициента  $k_{\Gamma}$  имеет тот же смысл, что и в выражении (9).

Для удобства инженерного проектирования все выведенные соотношения для определения геометрических размеров ФЭ и рассчитанные значения поправочных коэффициентов сведены в табл. 1. Ими можно пользоваться как справочными данными при проектировании ФЭ для переключающих ФУ.

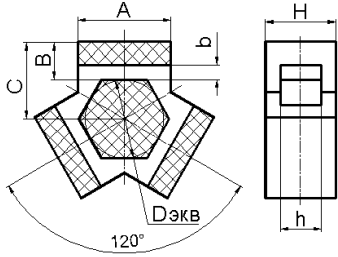
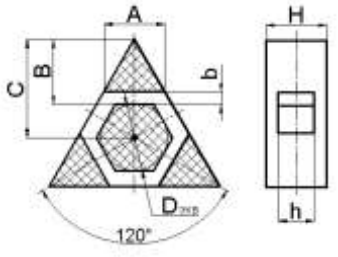
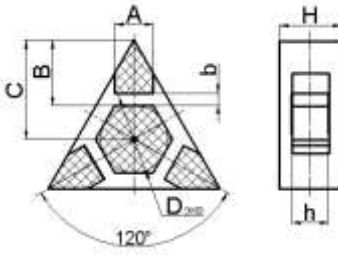
Представленную таблицу можно дополнять расчетными соотношениями для других конфигураций ФЭ, однако на практике вариантов для выбора конфигураций ФЭ не так уж много, если учитывать технологические и экономические аспекты изготовления ФЭ.

Таблица 1

Расчетные соотношения для основных размеров сечения ФЭ

№ п/п	Конфигурация ФЭ	Расчетные соотношения для основных размеров	Коэффициент, $k_{\Gamma}$ .
1	2	3	4
1		$A = \frac{\sqrt{3}}{2} (k_{\bar{A}} D + 2b),$ $B = \frac{\pi (k_{\bar{A}} D)^2}{6\sqrt{3} (k_{\bar{A}} D + 2b)} + b,$	$k_{\Gamma} = 1$
2		$C = \frac{\pi (k_{\bar{A}} D)^2}{6\sqrt{3} (k_{\bar{A}} D + 2b)} + \frac{k_{\bar{A}} D}{2} + b,$ $h = 2 \dots 3\delta, b = 2 \dots 3\delta,$	$k_{\bar{A}} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{3}}}$

Окончание табл. 1

1	2	3	4
3		$D_{\text{экв}} = k_{\Gamma} D,$ <p>где <math>\delta</math> - диаметр провода витка перематывания ФЭ;  <math>D</math> - диаметр ФЭ развязывающего ФУ соответствующего частотного диапазона</p>	$k_{\bar{A}} = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}}}$
4		$A = \frac{k_{\bar{A}} D}{3} \sqrt{\sqrt{3}\pi}, \quad B = \frac{k_{\bar{A}} D}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{3}}} + b,$ $C = \frac{k_{\bar{A}} D}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{3}}} \right) + b,$ $h = 2 \dots 3\delta, \quad b = 2 \dots 3\delta$	$k_{\bar{A}} = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}}}$
5		$A = \frac{k_{\bar{A}} D}{\sqrt{3}}, \quad B = \frac{3k_{\bar{A}} D}{4} + b,$ $C = \frac{5k_{\bar{A}} D}{4} + b,$ $h = 2 \dots 3\delta, \quad b = 2 \dots 3\delta$	$k_{\bar{A}} = \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}}}$

### Заключение

В заключение отметим несколько важных обстоятельств, связанных с внедрением предложенной методики в практику проектирования переключающих ФУ.

1. Предложенная методика расчета конфигураций ФЭ прошла детальную отработку при проектировании и выпуске переключающих ФУ КВЧ диапазона для бортовых РЛС, выпускаемых в ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю.Е. Седакова» уже более десяти лет. Она неоднократно уточнялась, дополнялась, корректировалась. Сейчас эта методика используется в том виде, в котором предложена в настоящей статье. При этом выпускаемая конструкторская документация на переключающие ФУ не содержит подборов ФЭ, что очень важно для снижения себестоимости устройств, поскольку трудоемкость изготовления ФЭ весьма значительна и выход годных составляет ~ 70%.

2. Введение поправочных коэффициентов при расчете диаметра ФЭ позволяет в определенной мере «скомпенсировать» использованные достаточно грубые приближения и повысить точность установки центральной частоты рабочего диапазона частот до 5-7%. Этого достаточно, чтобы при регулировке ФУ получить требуемое значение центральной частоты с помощью согласующих диэлектрических или металлических шайб в каждом волноводном плече устройства.

3. Для разработчика переключающих ФУ, на первый взгляд, кажется естественным ввести поправочные коэффициенты и при определении высоты ФЭ (размер  $H$ ), которая в предложенной методике считается исходным заданным параметром, определяемым для эквивалентного цилиндра по методике работ [6, 10]. Основанием для этого может служить то

обстоятельство, что вблизи торцов ФЭ магнитный поток замыкается через периферийные части ФЭ и магнитное поле направлено не вдоль, а поперек ФЭ. Однако это не оказывает существенного влияния на высоту ФЭ. Дело в том, что высота эквивалентного цилиндрического ФЭ определяется [15] из условий резонанса «синфазной» моды циркулятора (в которой учитываются только диэлектрические свойства феррита вдоль оси феррит-диэлектрического резонатора, поэтому отклонение магнитного поля на торцах призматического ФЭ от направления вдоль оси ФЭ в данном случае практически не играет роли).

Таким образом, в соответствии с рассмотренной методикой расчета по заданным исходным параметрам, включающим в себя центральную частоту рабочего диапазона частот, физические параметры феррита, величину внутреннего магнитного поля, намагничивающего феррит, и параметры входных волноводов, можно рассчитать все геометрические размеры ФЭ для переключающих ФУ.

На основе предложенной методики расчета ФЭ с использованием имеющейся в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» технологической базы разработано несколько типов переключающих ФУ восьмимиллиметрового диапазона на волноводах сечением 7,2×3,4 мм, которые использованы для отключения передатчика и подключения системы встроенного контроля в исследовательских самолетных радиолокационных комплексах и в радиолокаторах рельефометрических систем.

В табл. 2 представлены характерные размеры ФЭ (обозначение размеров - см. рис. 2). Приведенные допуски на выполнение размеров ФЭ обеспечиваются технологической базой и соответствуют реальным техническим требованиям, заложенным в конструкторской документации.

Таблица 2

**Характерные размеры ФЭ, используемых в разработках переключателей на металлических волноводах сечением 7,2×3,4 мм**

<i>A</i> , мм	<i>C</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>H</i> , мм	<i>h</i> , мм
1,9 <sub>-0,025</sub>	1,9 <sub>-0,025</sub>	0,98±0,03	0,5±0,03	1,8 <sub>-0,025</sub>	0,81±0,03



**Рис. 5. Внешний вид и внутреннее устройство переключателя на металлических волноводах сечением 7,2×3,4 мм**

На рис. 5 представлены внешний вид и внутреннее устройство одного из переключателей на металлических волноводах сечением  $7,2 \times 3,4$  мм (в центре волноводного Т-разветвления показан ФЭ с управляющим витком). Основные электрические характеристики переключателя в полосе частот  $f_0 \pm 1$  ГГц: вносимые потери  $P_{пр} \leq 0,5$  дБ; развязки  $P_{обр} \geq 20$  дБ;  $K_{СВн} \leq 1,25$ . Масса переключателя не превышает 25 г при габаритах  $26 \times 22 \times 18$  мм.

### Библиографический список

1. **Козлов, В.А.** Приемопередающие устройства для бортовых импульсных РЛС миллиметрового диапазона / В.А. Козлов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2002. Т. 5. № 4. С. 44–47.
2. **Козлов, В.А.** Опыт разработки приемопередающих устройств для бортовых импульсных РЛС миллиметрового диапазона / В.А. Козлов, А.Л. Кунилов, Д.Р. Шишкин // Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления: Труды международной специализированной выставки-конференции военных и двойных технологий. – Н. Новгород, 2002. С. 46–48.
3. **Козлов, В.А.** Многоканальные ферритовые антенные переключатели миллиметрового диапазона волн // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2004. Т.7. № 3. С. 64–66.
4. **Бородин, В.Н.** Многоканальные ферритовые антенные переключатели миллиметрового диапазона / В.Н. Бородин, В.А. Козлов // Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления: Труды международной специализированной выставки-конференции военных и двойных технологий. Т. 4. – Н. Новгород, 2002. С. 49–50.
5. **Козлов, В.А.** Расчет и технология изготовления ферритовых элементов КВЧ-переключателей с «внутренней» магнитной памятью / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков // Антенны. 2005. Вып. №5 (96). С. 18–23.
6. **Козлов, В.А.** Расчет и технология изготовления ферритовых элементов волноводных развязывающих и переключающих КВЧ устройств / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков // Вопросы радиоэлектроники, сер. РЛТ. 2008. Вып. 3. С. 181–188.
7. **Козлов, В.А.** Выбор конфигурации ферритового элемента переключающего КВЧ устройства / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков // Информационные системы и технологии ИСТ-2007: материалы Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород, НГТУ, 2007. С. 65.
8. **Козлов, В.А.** Расчет и выбор конфигурации ферритового элемента для КВЧ переключателей / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы докладов VIII Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / под ред. В.Ф. Дмитрикова, В.А. Неганова, Г.П. Ярового и А.С. Ястребова. – СПб.: Политехника, 2009. – С. 184–185.
9. **Воронков, В.Д.** Быстродействующие ферритовые переключатели с магнитной памятью миллиметрового диапазона длин волн / В.Д. Воронков, В.А. Сильванович // Ферритовые СВЧ приборы и материалы: тезисы докладов конференций. Серия: Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ Электроника. 1984. Т. 3. С. 88–89.
10. **Козлов, В.А.** Расчет и технология изготовления феррит-диэлектрических элементов волноводных КВЧ циркуляторов и вентилях / В.А. Козлов, А.В. Назаров, Ю.А. Светлаков // Антенны. 2007. Вып. 2 (117). С. 25–30.
11. **Козлов, В.А.** О расчете ферритовых элементов волноводных КВЧ циркуляторов / В.А. Козлов, Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Антенны. 2012. Вып. 4 (177). С. 53–55.
12. **Светлаков, Ю.А.** Разработка комплекса технологий размерной обработки конструкционных деталей из ферритов / Ю.А. Светлаков, А.Ю. Седаков // Вопросы атомной науки и техники. 2009. № 1 (26). С. 82–84.
13. **Седаков, А.Ю.** Структура технологического обеспечения проектирования и изготовления СВЧ-компонентов бортовых РЛС // Антенны. 2010. Вып. 10 (161). С. 57–64.

14. Слободин, Г.Б. Ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн // Обзоры по электронной технике. Серия: Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ Электроника. – 1988. Вып. 21 (1416). – 82 с.
15. Denlinger, E.J. Design of Partial Height Ferrite Waveguide Circulators / E.J. Denlinger // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1974. V. MTT-22. No 8. P. 810–813.

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2012*

**A.Yu. Sedakov**

**DESIGN PROCEDURE OF THE GEOMETRICAL CONFIGURATION  
OF FERRITE ELEMENTS FOR WAVEGUIDES SWITCHES  
OF ONBOARD EHF RANGE RADARS**

Federal State Owned Unitary Enterprise Federal Research and Production Center  
“Measuring system research institute named after Yu.Ye. Sedakov” (NIIS)

**Purpose:** The objects of the paper are investigations, which may be used to create generalised design procedure of the geometrical configuration of ferrite elements.

**Methodology:** This design procedure is based on using of the method calculation for ferrite rods of Y-circulators. There are four regions in ferrite elements for waveguide switches: one active region und three regions of periphery. The active region is equivalent to ferrite rod of Y-circulator.

**Findings:** The paper contains some calculation results of main sizes for various configurations of ferrite elements for waveguide switches.

**Implications:** The received approximate expressions for calculation of the sizes can be used at designing of switching devices for onboard EHF range radars.

**Value:** The present study provides a starting-point for creation of practical method calculation for specialists and engineers.

*Key words:* isolating device, switching device, ferrite element, EHF of a range.

УДК 621.396

Е.А. Букварев, А.П. Рябков

**ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО КОГЕРЕНТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ПАЧКИ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ВОБУЛЯЦИИ ПЕРИОДА ЗОНДИРОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается цифровая обработка радиолокационной информации. Предложен метод увеличения эффективности многоканального когерентного накопителя пачки импульсов при вобуляции периода зондирования. Сделана теоретическая оценка сложности программной реализации вычислителя. Приведены примеры построения.

*Ключевые слова:* селекция движущихся целей, вобуляция периода зондирования, когерентный накопитель, оптимизация.

**Введение**

Обязательным требованием современных импульсных радиолокаторов является возможность производить селекцию сигналов от движущихся целей на фоне пассивных помех (СДЦ). Однако при обработке пачки отраженных импульсов фильтром СДЦ возникает эффект слепых скоростей, при котором цель с некоторыми значениями радиальной скорости не может быть обнаружена. На практике для устранения эффекта слепых скоростей применяют вобуляцию периода зондирования, когда зондирующие импульсы излучаются не равномерно во времени, а по определенному закону.

Известно, что сложность практической реализации обработки радиолокационных сигналов с вобуляцией периода зондирования оказывается значительно выше по сравнению со случаем равномерного зондирования. В частности, остается проблема выполнения многоканального когерентного накопителя, требующего, в зависимости от реализации, больших аппаратных или вычислительных затрат [1]. В статье предлагается оптимизированный по вычислительным затратам многоканальный когерентный накопитель, учитывающий свойства пачки импульсов при вобуляции периода зондирования.

**Постановка задачи**

Оптимальный алгоритм обнаружения сигнала с известными параметрами на фоне коррелированных гауссовских помех состоит в сравнении с порогом величины [2]:

$$\eta = \vec{U}^{*T} \tilde{R}^{-1} \vec{S}, \quad (1)$$

где  $\vec{U}$  – вектор отсчетов принимаемого сигнала.

Согласно алгоритму (1) вектор отсчетов сигнала проходит две операции: подавление помехи путем умножения на обратную корреляционную матрицу помехи, затем когерентное накопление, или умножение на вектор отсчетов ожидаемого сигнала.

Формула (1) справедлива для внутривыборочной и межвыборочной обработки радиолокационных сигналов. В данном случае нас интересует межвыборочная обработка, поэтому представим  $\vec{U}$  вектором отсчетов комплексной огибающей пачки радиоимпульсов.

Будем рассматривать «внутрипачечную» вобуляцию, когда период зондирования изменяется от импульса к импульсу. Для удобства введем понятие «функция вобуляции», определяющую дискретный набор значений периода зондирования:

$$\varepsilon(i) = \frac{T_i - T_{CP}}{T_{CP}}, \quad (2)$$



где  $T_i$  –  $i$ -й период зондирования;  $T_{CP}$  – средний период зондирования.

Пусть производится построение многоканального по частоте Доплера когерентного накопителя. Обработывается пачка импульсов размером  $N$ . Введем ограничения:

- функция возбуждения – периодическая, с периодом  $p$ ;
- отношение  $N/p$  равно степени двойки;
- амплитуда пачки импульсов постоянная.

Требуется синтезировать оптимальную вычислительную структуру при вариации ограничительных параметров.

### Пачка равноотстоящих импульсов

В данном случае функция возбуждения принимает только нулевые значения. Комплексную огибающую принимаемой пачки импульсов можно представить отсчетами комплексной синусоиды в равноотстоящие моменты времени [3]:

$$x(n) = \exp[-j(2\pi\theta n + \varphi)], \quad (3)$$

где  $n$  – время, или номер периода зондирования;  $\varphi$  – неизвестная случайная начальная фаза;  $\theta = f_D T_{CP}$  – нормированная доплеровская частота;  $f_D$  – абсолютная частота Доплера.

Пачка из  $N$  импульсов занимает временной отрезок  $NT_{CP}$ . В качестве многоканального когерентного накопителя в соответствии с формулой (1) можно применить алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ). Отсчеты комплексной огибающей пачки импульсов раскладываются по  $N$  комплексным гармоникам с кратными частотами:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x^*(n) \cdot W_N^{kn}, \quad W_N = \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}\right), \quad (4)$$

где  $k$  – номер канала, или отсчет частоты.

Алгоритм БПФ представляет  $N$ -канальный когерентный накопитель с шагом по частоте  $\Delta\theta = 1/N$ . Наибольшую амплитуду на выходе будет иметь тот канал, частота которого ближе всех к доплеровской частоте принимаемого сигнала. Алгоритм БПФ позволяет эффективно решить задачу многоканального когерентного накопителя пачки импульсов с точки зрения вычислительных затрат, но имеет недостаток. Радиальная скорость цели определяется неоднозначно, так как спектр дискретного сигнала является периодическим.

Заметим, что в соответствии с оптимальным алгоритмом (1) в формуле (4) рассматриваются комплексно сопряженные отсчеты входного сигнала.

### Пачка неравноотстоящих импульсов

При «внутрипачечной» возбуждении периода зондирования отсчеты комплексной огибающей принимаемой пачки импульсов можно представить в следующем виде:

$$x(n) = \exp[-j(2\pi\theta(n + \xi(n)) + \varphi)], \quad (5)$$

где величина  $\xi(n)$  задает отклонение от равномерного зондирования:

$$\xi(n) = \sum_{i=0}^n \varepsilon(i) = \sum_{i=0}^n \frac{T_i - T_{CP}}{T_{CP}}. \quad (6)$$

При обработке неравноотстоящие импульсы рассматриваются как равноотстоящие. Но, согласно формуле (5), возбуждение периода зондирования приводит к дополнительной фазовой модуляции комплексной огибающей пачки импульсов. Согласно оптимальному алгоритму (1) для многоканального когерентного накопителя пачки импульсов при возбуждении периода зондирования выбираем следующий вариант обработки сигнала:

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x^*(n) \cdot V_k(n), \quad (7)$$

где  $V_k(n)$  – опорный сигнал в  $k$ -м канале когерентного накопителя:

$$V_k(n) = W_N^{kt(n)} = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} k t(n)\right). \quad (8)$$

Функция  $t(n)$  задает время появления неравноотстоящих зондирующих импульсов и определяется функцией вобуляции периода зондирования.

$$t(n) = n + \xi(n). \quad (9)$$

Число параллельных каналов, соответствующих положительному и отрицательному доплеровскому сдвигу, определяется из ограничений по максимальной радиальной скорости цели и может быть взято больше, чем число импульсов в пачке  $N$ . Шаг дискретизации по частоте, как и в разложении БПФ, равен  $\Delta\theta = 1/N$ .

По сложности вычислений алгоритм (7) соответствует дискретному преобразованию Фурье (ДПФ):  $L$ -канальный когерентный накопитель требует  $LN$  операций комплексного умножения, причем  $L \geq N$ .

Необходимо оптимизировать разложение (7). Исходя из того, что функция вобуляции периодическая с периодом  $p$ , воспользуемся приемом факторизации и представим последовательность неравноотстоящих зондирующих импульсов как суперпозицию  $p$  последовательностей равноотстоящих импульсов [1]. Период следования отсчетов в выделенных последовательностях равен периоду вобуляции во времени:

$$T_B = \sum_{i=0}^{p-1} T_i. \quad (10)$$

На рис. 1 показана зависимость функции  $t(n)$ , задающей момент появления  $n$ -го зондирующего импульса. При вобуляции зондирующий импульс излучается раньше или позже момента времени, определяемого прямолинейным законом (прямая  $t'(n) = n$ ). Это соответствует сдвигу  $n$ -й точки на рис. 1 вверх или вниз на величину  $\xi(n)$ . В случае периодической функции вобуляции можно выделить на рис. 1  $p$  групп точек, лежащих на одной прямой  $t_i(n) = n + \xi_i$ . Легко заметить, что моменты времени  $t_i(n)$  являются равноотстоящими с одинаковым периодом  $T_B$ .

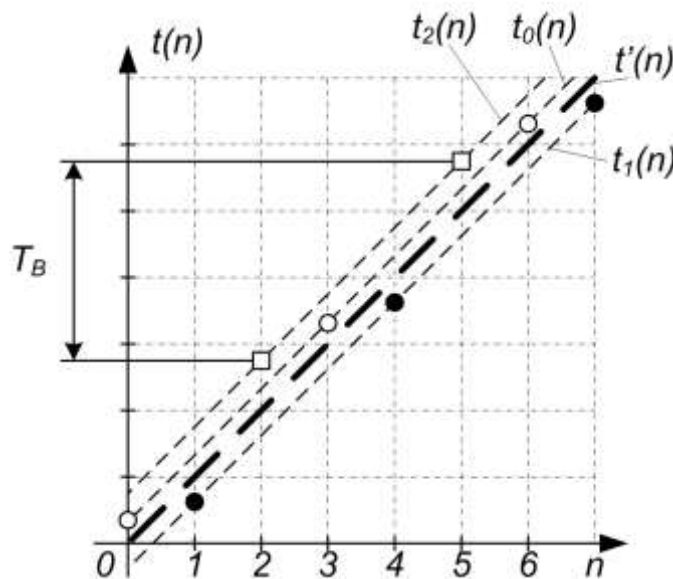


Рис. 1. Функция времени  $t(n)$ ,  $p = 3$

Запишем новое представление функции  $t(n)$ :

$$t(n) = \begin{cases} t_0(n) = n + \xi_0 \{n = 0, p, 2p \dots\}; & pn + \xi_0 \{n = 0, 1, 2 \dots\}, \\ t_1(n) = n + \xi_1 \{n = 1, p + 1, 2p + 1 \dots\}; & pn + 1 + \xi_1 \{n = 0, 1, 2 \dots\}, \\ \dots & \\ t_{p-1}(n) = n + \xi_{p-1} \{n = p - 1, 2p - 1, 3p - 1 \dots\}; & pn + p - 1 + \xi_{p-1} \{n = 0, 1, 2 \dots\}. \end{cases} \quad (11)$$

С учетом (11) выражение (7) можно переписать следующим образом:

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N/p-1} x^*(pn) \cdot W_N^{kt(pn)} + \sum_{n=0}^{N/p-1} x^*(pn+1) \cdot W_N^{kt(pn+1)} + \dots + \sum_{n=0}^{N/p-1} x^*(pn+p-1) \cdot W_N^{kt(pn+p-1)} \quad (12)$$

Здесь для каждой из  $p$  групп равноотстоящих отсчетов записали отдельную сумму. Теперь раскроем содержимое  $t(n)$  и запишем:

$$Y_k = W_N^{k \cdot \xi_0} \sum_{n=0}^{N/p-1} x^*(pn) \cdot W_N^{k \cdot pn} + W_N^{k \cdot (1 + \xi_1)} \sum_{n=0}^{N/p-1} x^*(pn+1) \cdot W_N^{k \cdot pn} + \dots \\ + W_N^{k \cdot (p-1 + \xi_{p-1})} \sum_{n=0}^{N/p-1} x^*(pn+p-1) \cdot W_N^{k \cdot pn}. \quad (13)$$

В выражении (13) под каждым знаком суммы видим запись ДПФ размерностью  $N/p$ . Каждая из групп ДПФ умножается на свой поворотный множитель, обозначающий сдвиг во времени. Использование алгоритма БПФ позволяет значительно снизить вычислительные затраты когерентного накопителя пачки импульсов при вобуляции периода зондирования. Однако необходимо выполнение следующих условий: в пачке обрабатываемых импульсов должно уместиться целое число периодов вобуляции, то есть  $N$  должно делиться на  $p$  нацело; величина  $N/p$  должна быть равна степени двойки.

Из выражения (13) видим, что разложение (7) является периодическим по частоте  $k$ , потому что отсчеты БПФ повторяются с периодом  $N/p$ , а поворотные множители, согласно (4), являются комплексными гармониками с переменной  $k$ . Можно убедиться, что период повторения разложения (7) равен обратной величине наибольшего общего делителя всех разных периодов зондирования [1]. Следовательно, функцию вобуляции можно выбрать таким образом, чтобы отсчеты  $Y_k$  повторялись на частотах, превышающих максимально возможную частоту Доплера цели. Многоканальный когерентный накопитель при вобуляции периода зондирования позволяет однозначно определить радиальную скорость цели.

### Моделирование когерентного накопителя

Проведем компьютерное моделирование когерентного накопителя пачки из  $N = 32$  импульсов при вобуляции периода зондирования. Период вобуляции примем равным восьми, то есть  $p = 8$ , а закон вобуляции задаем с помощью набора  $\xi(n)$ , составленного, например, из простых чисел:

$$\xi(n) = \{2/13; -7/47; 23/89; -3/17; 11/43; -19/83; -5/31; 0\}. \quad (14)$$

Получить значения периодов зондирования можно с помощью формулы (6), выбрав средний период зондирования  $T_{CP}$ .

На рис. 2 показан результат на выходе многоканального когерентного накопителя, где  $k$  – номер канала. Как и следовало ожидать, результаты алгоритмов (7) и (13) полностью совпадают. Амплитуда отклика максимальна на выходе канала  $k = 40$ , который точно совпадает с частотой Доплера цели. На выходе остальных каналов видим ненулевые отклики, мешающие определять полезный сигнал. Причина появления мешающих откликов заключается в том, что опорные сигналы (8) когерентного накопителя, входящие в выражение (7), в нашем случае не являются ортогональными.

Представим множество сигналов вида (8)  $N$ -мерным евклидовым пространством, в

котором, как известно, можно выбрать максимум  $N$  взаимно ортогональных векторов. Поэтому, если число параллельных каналов когерентного накопителя превышает размер пачки импульсов, избавиться от ненулевых мешающих откликов теоретически не получается. Можно лишь обеспечить равномерность мешающих откликов путем выбора соответствующей функции возбуждения.

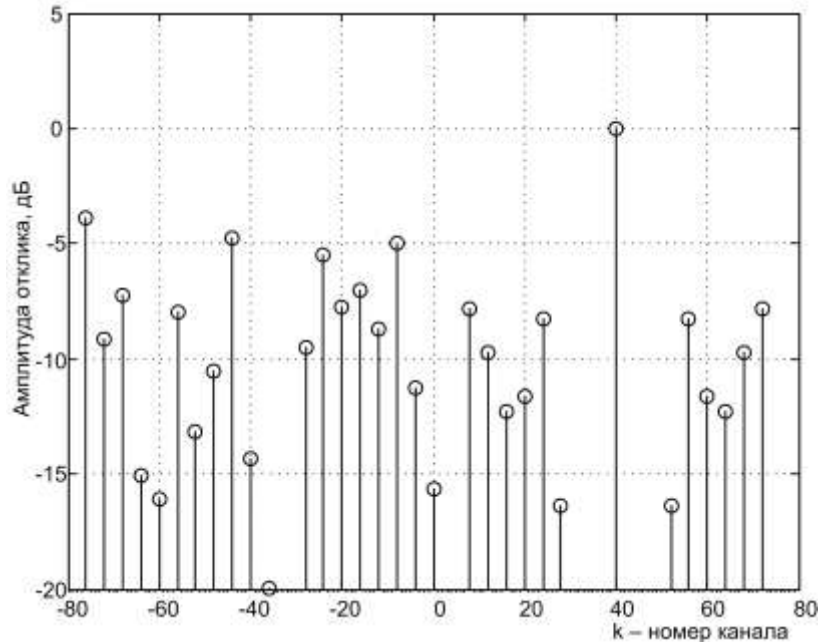


Рис. 2. Результат когерентного накопления пачки импульсов

Теперь рассмотрим более вероятный случай, когда частота Доплера цели не совпадает точно с частотой одного из параллельных каналов когерентного накопителя, а попадает между соседними каналами. На рис. 3 показан результат многоканального когерентного накопителя для пачки импульсов, частота Доплера которой попадает ровно посередине между каналами  $k = 40$  и  $k = 41$ . Видим два выделяющихся на фоне остальных соседних отсчета, говорящих о значении частоты Доплера цели. Чтобы точнее определить доплеровский сдвиг, можно применить метод интерполяции.

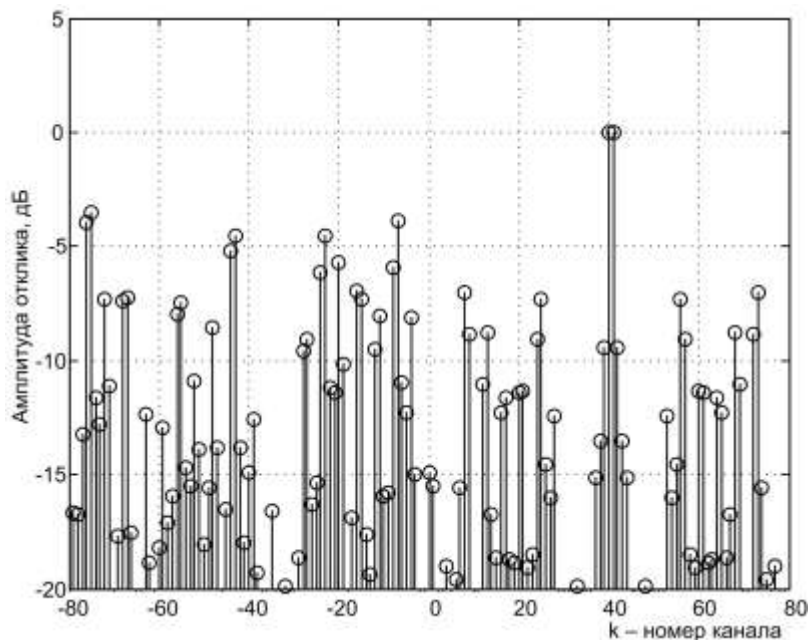


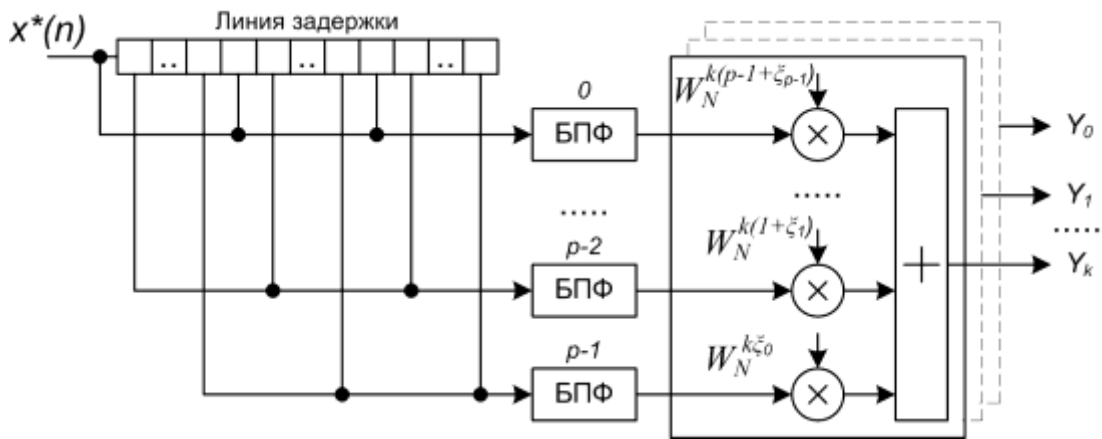
Рис. 3. Частота Доплера цели попадает между двумя каналами

Заметим, что на выходе многоканального когерентного накопителя пачки равноотстоящих импульсов, представляющего собой алгоритм БПФ, подобных мешающих откликов не наблюдается, потому что БПФ подразумевает разложение сигнала по системе ортогональных функций на отрезке  $[0, NT_{CP}]$ . Разложение БПФ гармонического сигнала (3) даст в его спектре один ненулевой отсчет.

Результаты компьютерного моделирования показали, что с увеличением периода вобуляции  $p$  и числа импульсов в пачке уровень мешающих откликов относительно полезного отклика снижается.

**Реализация когерентного накопителя**

Один из вариантов реализации когерентного накопителя (13) показан на рис. 4. Согласно предложенному алгоритму, для получения отсчета  $Y_k$  нужно умножить  $k$ -й отсчет каждой из  $p$  групп БПФ на свой поворотный множитель, а затем взять сумму. Если число  $k$  отрицательное или превышает размерность БПФ  $N/p$ , то можно воспользоваться свойством периодичности спектра дискретного сигнала.



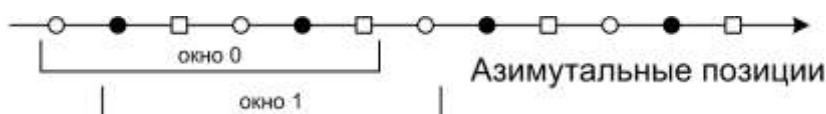
**Рис. 4. Структура когерентного накопителя пачки импульсов при вобуляции периода зондирования**

*Таблица 1*

**Закон изменения  $\xi_i$**

Положение скользящего окна						
0	1	2	...	p-1	p	...
$\xi_{p-1}$	$\xi_0$	$\xi_1$	...	$\xi_{p-2}$	$\xi_{p-1}$	...
...	...	...	...	...	...	...
$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	...	$\xi_0$	$\xi_1$	...
$\xi_0$	$\xi_1$	$\xi_2$	...	$\xi_{p-1}$	$\xi_0$	...

В радиолокации для межпериодной обработки часто применяют алгоритм скользящего окна. В этом случае требуется учесть некоторые особенности.



**Рис. 5. К пояснению работы скользящего окна,  $p = 3$**

Как показано на рис. 5, с перемещением скользящего окна меняются позиции групп

равноотстоящих импульсов в обрабатываемой пачке. Поэтому в поворотных множителях когерентного накопителя необходимо циклически менять величины  $\zeta_i$  в соответствии с позицией своей группы импульсов.

В табл. 1 показан закон изменения величин  $\zeta_i$  с перемещением скользящего окна, а на рис. 4 поворотные множители соответствуют его нулевому положению.

Структура изображенного на рис. 4 когерентного накопителя не оптимальна применительно к алгоритму скользящего окна, потому что с приходом нового отсчета требует пересчета БПФ для всех групп импульсов. Ранее было принято, что скользящее окно (рис. 5) вмещает целое число периодов вобуляции, поэтому после перемещения на одну позицию в скользящем окне обновляется только одна группа импульсов, а остальные группы импульсов всего лишь перемещаются. Следовательно, с приходом нового отсчета требуется пересчет БПФ только одной группы импульсов.

На рис. 6 показан рекуррентный вариант когерентного накопителя пачки импульсов при вобуляции периода зондирования. Предполагается, что линия задержки уже заполнена. С приходом нового отсчета вычисляется БПФ обновленной группы импульсов, и результаты последовательно сохраняются в блоках памяти ОЗУ. Демультимплексор DMX служит для выбора блока ОЗУ.

Так как положение групп импульсов в скользящем окне меняется, то в поворотных множителях когерентного накопителя необходима циклическая перестановка величин  $X_i$ , обозначающих временное положение групп импульсов в обрабатываемой пачке. В табл. 2 показан закон изменения  $X_i$ .

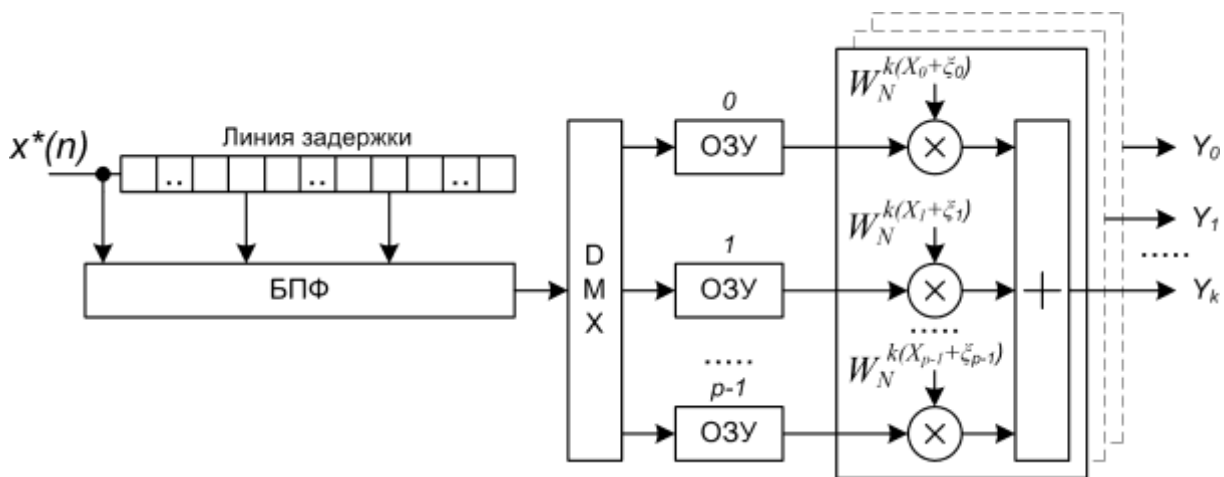


Рис. 6. Рекуррентный вариант когерентного накопителя

Таблица 2

Закон изменения  $X_i$

	Положение скользящего окна						
	0	1	2	...	p-1	p	...
$X_0$	0	p-1	p-2	...	1	0	...
$X_1$	1	0	p-1	...	2	1	...
...	...	...	...	...	...	...	...
$X_{p-1}$	p-1	p-2	p-3	...	0	p-1	...

Можно дальше упростить когерентный накопитель. Представим, что первый импульс пачки неравноотстоящих импульсов совпадает с первым импульсом пачки равноотстоящих

импульсов, момент появления которых определяется прямой  $t'(n)$  на рис. 1. Тогда прямая  $t_0(n)$  совпадет с прямой  $t'(n)$ , временной сдвиг  $\xi_0$  станет нулевым, а первый поворотный множитель  $W_N^{k\xi_0}$  в выражении (13) станет единичным.

В случае скользящего окна необходимо рассмотреть  $p$  подобных случаев, потому что положение групп импульсов в скользящем окне циклически меняется. Таким образом, потребуется  $p$  разных комбинаций временных сдвигов  $\xi_i$ , но тогда один поворотный множитель когерентного накопителя всегда будет единичным.

Временной сдвиг пачки импульсов (5) эквивалентен изменению начальной фазы. Начальная фаза в общем случае неизвестна, но не влияет на результат когерентного накопителя. Как правило, на выходе когерентного накопителя ставится амплитудный детектор.

### Сложность алгоритмов

Рассмотрим сложность приведенных алгоритмов когерентного накопителя пачки импульсов при вобуляции периода зондирования.

Для получения одного отсчета  $Y_k$  по формуле (13) требуется  $C_1$  операций комплексного умножения:

$$C_1 = p \cdot \left( \frac{N}{2p} \cdot \log_2 \left( \frac{N}{p} \right) \right) + (p-1) = \frac{N}{2} \cdot \log_2 \left( \frac{N}{p} \right) + (p-1). \quad (15)$$

В выражении (15) первое слагаемое соответствует числу умножений для выполнения операции БПФ, второе слагаемое соответствует числу умножений на поворотные множители с учетом того, что один из множителей равен единице.

Число параллельных каналов  $L$  когерентного накопителя выбирается согласно максимальной радиальной скорости цели и может быть больше размера  $N$  азимутального пакета. Для вычисления  $L$  отсчетов разложения (13) требуется  $C_L$  операций комплексного умножения:

$$C_L = p \cdot \left( \frac{N}{2p} \cdot \log_2 \left( \frac{N}{p} \right) \right) + L(p-1) = \frac{N}{2} \cdot \log_2 \left( \frac{N}{p} \right) + L(p-1). \quad (16)$$

Рекуррентный вариант  $L$ -канального когерентного накопителя применительно к алгоритму скользящего окна требует  $R_L$  операций комплексного умножения. С приходом нового отсчета в скользящем окне обновляется только одна группа равноотстоящих импульсов, поэтому вычислять БПФ требуется только для одной группы импульсов.

$$R_L = \frac{N}{2p} \cdot \log_2 \left( \frac{N}{p} \right) + L(p-1). \quad (17)$$

Многоканальный когерентный накопитель (7) потребовал бы  $S_L$  операций комплексного умножения:

$$S_L = LN. \quad (18)$$

Из выражений (16) и (18) видим, что увеличение  $L$  на единицу в первом случае увеличивает число операций на  $p-1$ , а во втором случае на  $N$ .

Для сравнения эффективности алгоритмов на рис. 7 приведен график числа операций комплексного умножения в зависимости от числа импульсов в пачке. Для расчетов значение периода вобуляции приняли равным восьми  $p=8$ , а число параллельных каналов берется в четыре раза больше числа импульсов в пачке  $L=4N$ , то есть охватывается область положительного и отрицательного доплеровского сдвига вплоть до второй слепой скорости. Последний график показывает число операций, которое требует  $N$ -канальный когерентный накопитель пачки равноотстоящих импульсов (4). Размер азимутальной пачки выбирается в соответствии с принятыми ограничениями.

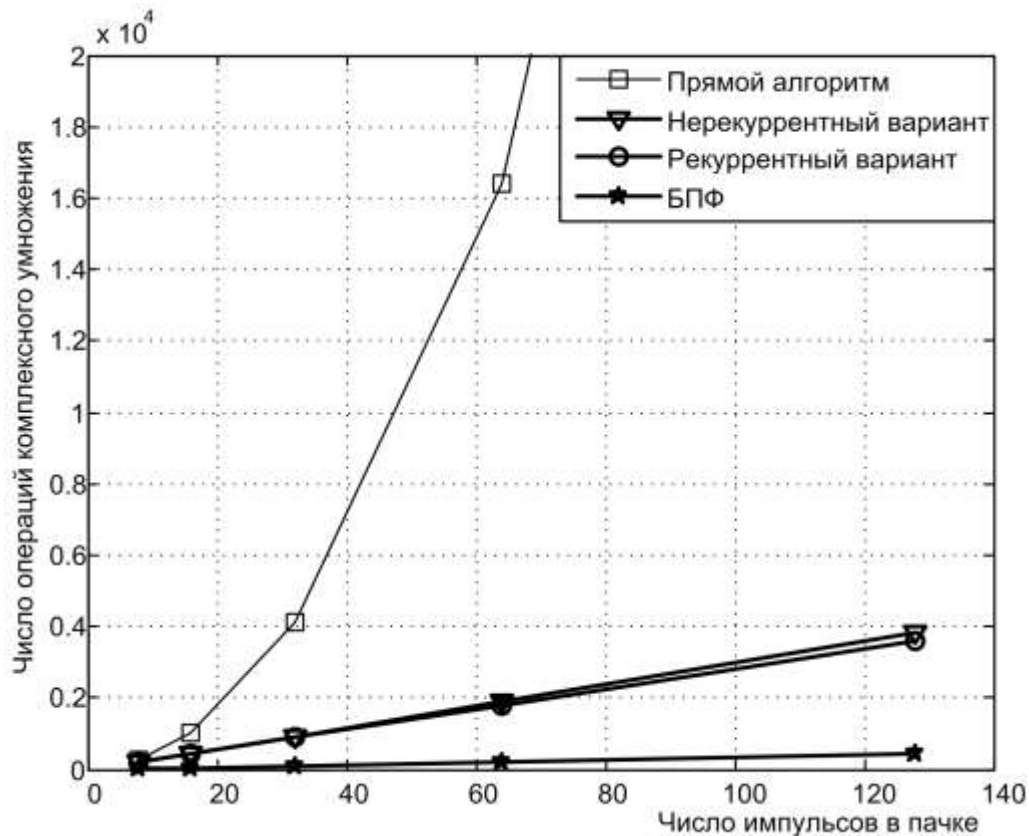


Рис. 7. Сложность алгоритмов в зависимости от числа импульсов в пачке

Сравнивая графики, видим, что при  $L = 4N$  сложность прямого метода вычисления квадратично растет с увеличением числа импульсов в пачке. Предложенные варианты реализации когерентного накопителя позволяют значительно снизить вычислительные затраты и предполагают примерно линейный рост сложности в зависимости от числа импульсов. Когерентный накопитель пачки равноотстоящих импульсов требует всех меньше операций, но имеет в четыре раза меньше параллельных каналов.

### Заключение

Получены оптимизированные с точки зрения вычислительных затрат алгоритмы многоканального когерентного накопителя азимутальной пачки импульсов при вобуляции периода зондирования, в том числе в режиме скользящего окна.

Показано, что для периодического закона вобуляции с периодом  $p$  требуется вычислить БПФ для  $p$  групп равноотстоящих импульсов, затем взять сумму с соответствующими поворотными множителями. Алгоритм БПФ требует ограничения на размер пачки импульсов.

При вобуляции периода зондирования можно однозначно определять радиальную скорость цели. Учет знака доплеровской частоты позволяет определять радиальное направление движущейся цели.

Преимущество приведенных алгоритмов заключается в том, что часть вычислительных операций, а именно расчет БПФ, является общей для всех параллельных каналов когерентного накопителя. Это дает гибкость в выборе участков доплеровской фильтрации.

При фиксированном диапазоне обрабатываемых доплеровских частот прямой алгоритм когерентного накопителя предполагает квадратичный рост вычислительных затрат с увеличением пачки импульсов. Оптимизированные алгоритмы значительно сокращают требуемый объем вычислений и имеют приблизительно линейную зависимость вычислительных затрат от размера обрабатываемой пачки.



### Библиографический список

1. **Бакулев, П.А.** Методы и устройства селекции движущихся целей / П.А. Бакулев, В.М. Степин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
2. **Ширман, Я.Д.** Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Радиозлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2012*

**E.A. Bukvarev, A.P. Ryabkov**

### **OPTIMIZATION OF MULTICHANNEL STAGGERED PULSES COHERENT INTEGRATOR**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

The paper deals with digital signal processing in radars. The problem of resource-intensive multichannel staggered pulses coherent integrator is addressed.

Assuming a periodic stagger an optimization method is proposed based on pulse packet partitioning and fast Fourier transform. There are restrictions on the packet size.

Two examples of implementation are proposed. The common sliding window mode is also considered. It was shown that all parallel channels share the part of computations. Consequently it gives flexibility for organizing coherent integration in selected frequency band. Moreover there is ability to determine the moving target velocity unambiguously.

In addition theoretical complexity for the software implementation was shown. The complexity of the direct algorithm has a quadratic dependence on the number of pulses meanwhile the optimized methods have a linear dependence.

As a result the new method may be useful in improving the performance of radar MTI systems dealing with staggered pulses.

*Key words:* moving target indication, pulse staggering, coherent integrator, optimization.

# МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 541.124

В.П. Морозов

## КИНЕТИКА РОСТА ЗЁРЕН В ПЕРЕСЫЩЕННОМ ОДНОРОДНОМ РАСТВОРЕ

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,

**Цель работы:** Нахождение асимптотического решения системы интегродифференциальных уравнений, описывающих рост и растворение твердой фазы в расплавах

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial a} f \frac{da}{dt} = 0, \quad \frac{1}{b} = \frac{1}{b_{\min}} - \rho \int a^3 f(a, t) da, \quad \frac{da}{dt} = \frac{1}{b} - \frac{1}{a},$$

где  $f(a, t)$  – плотность зерен радиуса  $a$ ,  $b$  – критический радиус. Приведенные уравнения справедливы в том случае, когда кинетика роста зерен контролируется скоростью растворения. Кроме того, делается естественное предположение, что в начальный момент времени существует максимальный размер зерен  $L$ .

**Научный подход:** Исследование проведено в переменных  $r = a/a_L$ ,  $\tau = \int_0^t \frac{dt'}{a_L^2}$ , где  $a_L = a(L, t)$  – максимальный

размер зерен в момент времени  $t$ , в которых асимптотическое решение находится сравнительно легко.

**Результат:** В переменных  $r, \tau$  при  $\tau \gg 1$  найдена плотность распределения  $f(r, \tau) = \rho(r) N(\tau)$ . При начальном распределении  $f(a_0, 0) \sim (L - a_0)^m$  ( $a_0 \sim L$ ) плотность  $\rho(r)$  существенно отличается от классического распределения Лифшица-Слезова. Определены типы начальных распределений, которые приводят к классическим результатам. Найдены временные зависимости среднего радиуса, критического радиуса и числа зерен в единице объема.

**Новизна:** Результаты исследования новы и могут быть использованы для прогноза поведения различных расплавов (например, в охлаждающей оболочке атомных реакторов).

*Ключевые слова:* коалесценция, критический радиус, скорость растворения, диффузия.

### Введение

Будем ориентироваться на вполне стандартную физическую ситуацию [1], когда в расплаве (например, свинца) находятся атомы и зёрна другого вещества (например, железа). В слабо пересыщенном растворе флуктуационным режимом образования твёрдой фазы можно пренебречь, считая, что доминирует процесс коалесценции или Оствальдского созревания, когда рост крупных зародышей происходит за счёт растворения более мелких.

Кинетика коалесценции впервые исследовалась в классической работе Лифшица и Слезова [2], в которой найдена универсальная плотность распределения зёрен, к которой в асимптотическом пределе при  $t \rightarrow \infty$  эволюционирует любое начальное распределение. При этом рассматривался случай, когда рост зёрен контролируется диффузионным процессом. В последующих работах [3–5] и ряде других для разных физических моделей использовался метод работы [2], что приводило к существованию универсального (своего для каждой модели) асимптотического распределения, не зависящего от начального распределения зёрен. Это обусловлено тем, что в неявной форме предполагалось существование в начальный момент времени зёрен с произвольным размером. Однако в реальных системах начальный размер зёрен ограничен. Впервые этот факт учтён в работе Морозова и Максимова [6]. Было показа-

но, что начальная функция распределения, характеризующаяся степенным, порядка  $m$ , стремлением к нулю, вблизи максимального размера зёрен даёт отличное от классического асимптотическое поведение. При этом, как и в работе [2], рассматривается диффузионный механизм роста зёрен.

В настоящей работе рассматривается с учётом конечного значения максимального размера зерна кинетика коалесценции, обусловленная скоростью растворения.

### Основные уравнения

Плотность распределения зёрен по их размерам будем нормировать следующим образом:

$$N_0 \int f(a, t) da = N(t),$$

где  $a$  – радиус зерна (предполагаем, что зёрна имеют сферическую форму),  $N_0$  – концентрация зёрен при  $t = 0$ ,  $N(t)$  – концентрация зёрен в момент времени  $t$ . Кроме того, будем предполагать, что общий объём зёрен мал, т.е.

$$N_0 \int \frac{4}{3} \pi a^3 f(a, t) da \ll 1.$$

В гидродинамическом приближении плотность  $f(a, t)$  удовлетворяет уравнению непрерывности [2]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial a} f \frac{da}{dt} = 0, \quad (1)$$

где  $\frac{da}{dt}$  – скорость роста радиуса зерна.

Для нахождения этой скорости необходимо учесть уравнение диффузии для концентрации атомов при наличии в растворе зерна

$$\frac{dc}{dt} - D\Delta c = -\beta(c - c_a)\delta(|\vec{r}| - a). \quad (2)$$

Здесь  $c$  – концентрация атомов,  $c_a$  – равновесная концентрация атомов на поверхности зерна радиуса  $a$ ,  $D$  – коэффициент диффузии,  $\beta$  – скорость растворения,  $\delta(u)$  – дельта функция Дирака. Проинтегрировав (2) по объёму радиуса  $a + \delta$  и устремляя  $\delta$  к нулю, получим граничное условие на поверхности зерна

$$D \left. \frac{dc}{dr} \right|_{r=a} = \beta(c - c_a)|_{r=a}. \quad (3)$$

В квазистационарном режиме при  $r > a$  имеем уравнение  $\Delta c = 0$ , решение которого

$$c = c_\infty + \frac{A}{r}. \quad (4)$$

Отметим, что  $c_\infty$  – средняя по объёму концентрация,  $A$  – произвольная постоянная. Граничное условие (3) даёт связь между  $A$  и  $c_\infty$

$$A = -\frac{\beta a^2}{D + \beta a} (c_\infty - c_a).$$

Из закона сохранения массы

$$\frac{d}{dt} \rho \frac{4\pi}{3} a^3 = m\beta(c(a) - c_a),$$

где  $m$  – масса атома,  $\rho$  – плотность зерна, с учётом (4) находим

$$\frac{da}{dt} = \frac{v\beta D}{D + \beta a} (c_\infty - c_a). \quad (5)$$

Равновесная концентрация  $c_a$  при малом пересыщении даётся формулой Гиббса-Томсона [3]

$$c_a = c_{oo} \left( 1 + \frac{2\varepsilon v}{kTa} \right), \quad (6)$$

где  $c_{oo}$  – равновесная концентрация атомов над плоской поверхностью,  $v = m/\rho$  – удельный объём,  $\varepsilon$  – поверхностная энергия,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. С учётом (5) и (6) окончательно получаем

$$\frac{da}{dt} = \frac{vD\beta\sigma}{D + \beta a} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right), \quad (7)$$

где  $\sigma = \frac{2\varepsilon v c_{oo}}{Tk}$ ;  $b = \frac{\sigma}{c_{\infty} - c_{oo}}$  – критический радиус.

В настоящей работе мы ограничимся случаем, когда  $\beta a \ll D$ , то есть когда скорость роста зерна контролируется скоростью растворения  $\beta$ . В этом случае вместо (7) получаем

$$\frac{da}{dt} = v\beta\sigma \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right). \quad (8)$$

Ситуация, когда  $\beta a \gg D$ , была рассмотрена в [6], уравнение (1) и (8) дополним уравнением, выражающим факт сохранения полной массы вещества в единице объёма,

$$mc_{\infty} + \frac{4}{3}\pi\rho \int a^3 f(a,t) da = mc_{0\infty} + \frac{4}{3}\pi\rho \int a^3 f(a,0) da ,$$

которое после преобразований принимает вид

$$\frac{1}{b} + \frac{N_0 4\pi}{3\sigma v} \int a^3 f(a,t) da = \frac{1}{b_0} + \frac{N_0 4\pi}{3\sigma v} \int a^3 f(a,0) da , \quad (9)$$

где  $b_0 = \frac{\sigma}{c_{0\infty} - c_{00}}$  – начальный критический радиус.

Если в уравнениях (1), (8), (9) перейти к безразмерным переменным:  $b = b'b_0$ ,  $a = a'a_0$ ,  $t = t' \frac{b_0^2}{v\beta\sigma}$  то окончательно получаем систему уравнений (штрихи опускаем)

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial a} f \frac{\partial a}{\partial t} = 0 , \quad (10)$$

$$\frac{da}{dt} = \frac{1}{b} - \frac{1}{a} , \quad (11)$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{b_{\min}} - P \int a^3 f(a,t) da , \quad (12)$$

где  $P = \frac{4\pi}{3} \frac{N_0 b_0}{\sigma v}$ ,  $b_{\min} = [1 + P \int_0^L a_0^3 \varphi(a_0) da_0]^{-1}$ ;  $\varphi(a_0) = f(a,0)$  – начальное распределение,  $L$  –

максимальный размер зёрен. В уравнении (12) удобно перейти к представлению Лагранжа

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{b_{\min}} - P \int_{a_0^*(t)}^L a^3(a_0,t) \varphi(a_0) da_0 , \quad (13)$$

где  $a_0^*(t)$  находится из уравнения  $a(a_0^*(t),t) = 0$ . Все зёрна с  $a_0 \leq a_0^*(t)$  к моменту времени  $t$  растворяются.

Формальное решение уравнения (10) имеет вид

$$f(a,t) = \frac{\varphi(a_0)}{z}, \quad (14)$$

где  $z = \frac{da}{da_0}$ .

Дифференцируя (11) по  $a_0$ , получим  $\frac{dz}{dt} = \frac{z}{a^2}$ , откуда

$$z = \exp\left(\int_0^t \frac{dt'}{a^2}\right) = \frac{a_0}{a} \exp\left(\int_0^t \frac{dt'}{ab}\right), \quad (15)$$

где при переходе к последнему равенству учтено уравнение (11). Покажем, что  $a_0^*(t)$  монотонно растёт. Поскольку  $a_0$  как функция  $a$  и  $t$  – интеграл системы (10) – (13), т.е.  $\frac{da_0}{dt} = 0$ ,

имеем  $\frac{\partial a_0}{\partial t} + \frac{\partial a_0}{\partial a} \frac{da}{dt} = 0$  или  $\frac{\partial a_0}{\partial t} + \frac{1}{z} \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a}\right) = 0$ . Полагая здесь  $a_0 = a_0^*(t)$  и учитывая (15),

получим  $\frac{\partial a_0^*}{\partial t} = \frac{1}{a_0^*} \exp\left(\int_0^t \frac{dt'}{ab}\right) > 0$   $a = a(a_0^*(t), t'), b = b(t')$  В этом выражении в показателе экспоненты  $a = a(a_0^*(t), t'), b = b(t')$ .

Здесь же отметим следующее: если  $L < b_{\min}$ , то все зёрна рассасываются. Для того, чтобы объём зёрен оставался конечным, должно выполняться неравенство  $L > b_{\min}$ , что заведомо справедливо при  $L > 1$ , что в дальнейшем мы и будем предполагать.

### Нахождение асимптотического решения

В уравнении (10) и (11) удобно перейти к переменным  $r = \frac{a}{a_L}$  и  $\tau = \int_0^t \frac{dt'}{a_L^2}$ . Нетрудно

убедиться, что уравнение (10) сохраняет свою структуру

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} + \frac{d}{dr} f \frac{dr}{dt} = 0, \quad (16)$$

а вместо (11) находим

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r}{\lambda} - \frac{1}{r} + \frac{\lambda+1}{\lambda}, \quad (17)$$

где  $a_L \frac{da_L}{dt} = \frac{1}{a_L} \frac{da_L}{d\tau} = \frac{1}{\lambda}$  и  $\frac{a_L}{b} = \frac{\lambda+1}{\lambda}$ , что получается из (11) при  $a = a_L$ . Здесь для краткости введено обозначение  $a(L, t) = a_L$ . Корни правой части уравнения (17) имеют значения  $r_1 = 1$  и  $r_2 = \lambda$ . Анализ фазового портрета уравнения (17) показывает, что при  $\lambda < 1$  объём зёрен неограниченно растёт, то есть закон сохранения (12) не выполняется. Реализуется только случай, когда  $\lambda > 1$ , поскольку зёрен с  $r > 1$  нет.

При  $\tau \rightarrow \infty$   $\lambda$  стремится к некоторой константе, что подтверждается численными расчётами, совпадающими с аналитическими решениями, которые будут получены далее.

При постоянном  $\lambda$  ( $\tau \gg 1$ ) уравнение (17) интегрируется:

$$\tau - \tau_0 = \tau(r) = \int_0^r \frac{dr}{\frac{dr}{d\tau}} = \frac{\lambda}{\lambda-1} \ln \frac{(1-r)\lambda^\lambda}{(\lambda-r)^\lambda}.$$

Учитывая, что  $a_L \sim e^{\tau/\lambda}$  (при  $\tau \gg 1$ ), получаем

$$c(a_0) a_L^{\lambda-1} = \frac{(1-r)\lambda^\lambda}{(\lambda-r)^\lambda}. \quad (18)$$

Откуда видим, что при  $a_0 = L$  ( $r = 1$ )  $c(L) = 0$ , а величина  $\frac{c(a_0)}{1-r}$  конечна при  $\lambda > 1$ . Дифференцируя (18) по  $a_0$ , получим

$$\frac{dc(a_0)}{da_0} = -\frac{c(a_0)}{1-r} z \frac{(\lambda-1)r}{(\lambda-r)a_L}. \quad (19)$$

Из (19) следует, что  $\left. \frac{dc(a_0)}{da_0} \right|_{a_0=L} \neq 0$ , поэтому

$$c(a_0) = A(L - a_0) \quad \text{при } a_0 \sim L. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (18), получаем соотношение

$$\frac{(1-r)\lambda^\lambda}{(\lambda-r)^\lambda} = Aa_L^{\lambda-1}(L-a_0). \quad (21)$$

Полагая в (21)  $a_0 = a_0^*$  и  $r = 0$ , находим

$$(L - a_0^*) = \frac{1}{Aa_L^{\lambda-1}}. \quad (22)$$

Уравнение (21) даёт временную зависимость приведенного радиуса зерна  $r$  от времени и начального радиуса  $a_0$ . Однако параметр  $\lambda$  неизвестен.

Плотность распределения  $f(r, \tau)$  и  $\lambda$  найдем в более общей форме, чем это сделано в [6]. Асимптотическое решение уравнения (10) при постоянном  $\lambda$  имеет вид

$$f(r, \tau) = \chi(\tau - \tau(r)) \frac{d\tau}{dr}. \quad (23)$$

Неизвестную функцию  $\chi$  можно найти из условия конечности объёма зёрен, то есть конечности интеграла  $J = a_L^3 \int_0^1 f(r, \tau) dr$ . Учитывая (23) и тот факт, что при  $\tau \gg 1$   $a_L = De^{\tau/\lambda}$ , получим

$$J = -De^{3\tau/\lambda} \int_0^1 r^3 \chi(\tau - \tau(r)) \frac{d\tau}{dr}.$$

Это выражение конечно при  $\tau \rightarrow \infty$ , если  $\chi(\tau - \tau(r)) = ke^{-\frac{3(\tau - \tau(r))}{\lambda}}$ , следовательно (с учётом (23)), получаем:

$$\begin{aligned} f(\tau, r) &= N(\tau)P(r), \\ P(r) &= -\frac{3}{\lambda} e^{-\frac{3\tau(r)}{\lambda}} \frac{d\tau}{dr}, \\ N(\tau) &= Ba_L^{-3}. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, в переменных  $\tau, r$  плотность  $f(\tau, r)$  факторизуется, т.е. распадается на произведение плотности  $P(r)$  по размерам зёрен и их концентрацию  $N(\tau)$ . При любом  $\lambda$  плотность  $P(r)$  нормирована на единицу. Заметим, что  $\rho(r)$  имеет универсальный вид. Однако нужно иметь в виду, что параметр  $\lambda$  существенно зависит от вида начальной плотности  $\varphi(a_0)$ .

Для нахождения  $\lambda$  заметим, что выражение (18) можно переписать в виде

$$c(a_0)^{\frac{3}{\lambda-1}} a_L^3 = e^{-\frac{3\tau(r)}{\lambda}}.$$

Подставляя эту экспоненту в (24), находим

$$f(\tau, r) = -\frac{3}{\lambda} B \frac{d\tau}{dr} c(a_0)^{\frac{3}{\lambda-1}}. \quad (25)$$

Соответственно соотношение (19) представим в виде

$$\frac{dc(a_0)}{da_0} = c(a_0)^{\frac{\lambda-1}{\lambda}} \frac{d\tau}{dr} \frac{z}{a_L}. \quad (26)$$

Если в формальном решении (14) (в переменных  $\tau, r$ ) подставить  $z$  из (26), то получим

$$f(\tau, r) = \frac{a_L}{z} \varphi(a_0) = \frac{c(a_0)}{dc(a_0)/da_0} \frac{d\tau}{dr} \varphi(a_0). \quad (27)$$

Сравнивая (25) и (27), находим  $c(a_0)$

$$c(a_0) = \left[ \frac{1}{B_0} \int_0^L \varphi(a_0) da_0 \right]^{\frac{\lambda-1}{3}}. \quad (28)$$

Разумеется, что полученные соотношения справедливы при  $\tau \gg 1$ , когда  $a_0 \sim L$  и при  $\lambda > 1$ . Явное выражение для  $\lambda$  находится из условия  $\left. \frac{dc(a_0)}{da_0} \right|_{a_0=L} \neq 0$ , что было показано ранее (см., например, (20)).

Как и в работе [6], рассмотрим случай, когда при  $a_0 \sim L$  начальное распределение ведет себя как  $\varphi(a_0) \sim (L - a_0)^m$ , где  $m > -1$ . В этом случае согласно (28)  $c(a_0) \sim (L - a_0)^{\frac{(m+1)\lambda-1}{3}}$ , откуда  $\frac{dc(a_0)}{da_0} \sim (L - a_0)^{\frac{(m+1)\lambda-1}{3}-1}$ . Конечное значение этой производной при  $a_0 = 0$  даёт

$$\lambda = \frac{m+4}{m+1}. \quad (29)$$

Тогда для плотности  $P(r)$  из (24) получаем

$$P(r) = \frac{3r(1-r)^m \lambda^{m+4}}{(\lambda-r)^{m+5}}. \quad (30)$$

Если  $\varphi(a_0) \sim a_0^k$ , где  $k$  – произвольное вещественное число, то указанная процедура приводит к значению  $\lambda = 4$ , что соответствует выражению (29) при  $m = 0$ .

Распределение (30) существенно отличается от распределения, полученного по методике Лифшица - Слёзова. Эта методика приводит к значению  $\lambda = 1$ , что согласно (29) реализуется при  $m \rightarrow \infty$ . Переходя в (30) к этому пределу, получим [3]

$$P(r) = \frac{3r}{(1-r)^5} e^{-\frac{3r}{1-r}}, \quad (31)$$

что, как показано в настоящей работе, не так. При конечном  $L$  распределение (31) реализуется лишь в том случае, если  $L$  – существенно особая точка начального распределения, например, если

$$\varphi(a_0) \sim e^{\frac{\alpha}{L-a_0}} \frac{g(a_0)}{(L-a_0)^\beta} \quad (g(L) = \text{const}).$$

Отметим ещё один случай, когда реализуется распределение Лифшица-Слёзова. В работах [2, 3] в неявной форме предполагалось, что максимального значения  $L$  не существует ( $L = \infty$ ). Непосредственно (30) в этом случае использовать нельзя, поскольку  $a_L = \infty$ . Однако, если ввести переменную  $u = a/b$ , которая использовалась в [2, 3], то делая в (30) замену переменных при конечном  $L$ :  $u = \frac{a}{a_L} \frac{a_L}{b} = r \frac{\lambda+1}{\lambda}$  и переходя к пределу, когда  $m \rightarrow \infty$ , получим

$$P(u) = \frac{24}{(2-u)^5} e^{-\frac{3u}{2-u}}, \quad (32)$$

которое и получено в [3]. Разумеется, (32) можно получить из (31) с помощью замены  $u = 2r$ .

Одно из начальных распределений, которое приводит к (32), может быть получено следующим образом. Пусть  $\varphi(a_0) \sim \left(1 - \frac{a_0}{L}\right)^m$ . Положим здесь  $L = m\delta$  и устремим  $m \rightarrow \infty$ . То-

гда  $\varphi(a_0) \sim e^{-\frac{a_0}{\delta}}$ , т.е. распределение Лифшица-Слёзова, реализуется при экспоненциальном поведении начального распределения при больших значениях  $a_0$ . Разумеется, экспоненциальное поведение может быть любого типа.

В заключение приведём временные зависимости параметров. Прежде всего с помощью (30) найдём среднее значение приведённого радиуса зёрен.

$$\bar{r} = \int_0^1 rP(r)dr = \frac{2\lambda(\lambda+1)}{\lambda+2(\lambda+1)^2} = \frac{2(m+4)(2m+5)}{9(m+2)(m+3)}.$$

Далее, поскольку  $a_L \frac{da_L}{dt} = \frac{1}{\lambda}$ , то  $a_L \sim \sqrt{\frac{2}{\lambda}t}$ ,  $\bar{a} = \bar{r}$ ,  $a_L = \bar{r} \sqrt{\frac{2}{\lambda}t}$ . В этом случае критический

радиус  $b$  и число зёрен в единице объёма  $N(t)$  определяются выражениями  $b = \frac{\lambda}{\lambda+1} \sqrt{\frac{2}{\lambda}t}$ ,

$N(t) \sim \frac{1}{a_L^3} = \left(\frac{2}{\lambda}t\right)^{-3/2}$ . Отметим, что временные зависимости среднего радиуса  $\bar{a}$ , критического радиуса  $b$  и  $N(t)$  такие же, как в [3].

#### Библиографический список

1. **Желтов, Ю.В.** О кинетике растворения железа в расплавах меди и олова / Ю.В. Желтов [и др.] // Известия АН СССР. Металлы. 1988. № 3. С. 52.
2. **Лифшиц, И.М.** О кинетике диффузионного распада пересыщенных твёрдых растворов / И.М. Лифшиц, В.В. Слёзов // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. № 2. С. 479.
3. **Кукушкин, С.А.** Дифференциальные системы на поверхности твёрдых тел: механизмы образования тонких плёнок / С.А. Кукушкин, В.В. Слёзов. – СПб.: Наука, 1966.
4. **Slezov, V.V.** Theory of Diffusive Decomposition of Solid Solution // Sov. Sci, Sec A: Physics. 1955. № 17. P. 211.
5. **Кукушкин, С.А.** Кинетика фазовых переходов первого рода на асимптотической стадии / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов // ЖЭТФ. 1988. Т. 113. С. 2193.
6. **Морозов, В.П.** Кинетика роста зёрен на поздней стадии коалесценции / В.П. Морозов, И.Л. Максимов // Неорганические материалы. 1999 Т. 35. С. 1021.

Дата поступления  
в редакцию 02.05.2012

V.P. Morozov

## THE KINETICS OF GRAIN GROWTH IN A SUPERSATURATED HOMOGENEOUS SOLUTE

National Investigate University Higher School of Economics

**Purpose:** Finding the asymptotic solution of a system of integrodifferential equations describing the growth and dissolution of the solid phase in the melts

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial a} f \frac{da}{dt} = 0, \quad \frac{1}{b} = \frac{1}{b_{min}} - \rho \int a^3 f(a,t) da, \quad \frac{da}{dt} = \frac{1}{b} - \frac{1}{a},$$

where  $f(a, t)$  – the density of grains of radius  $a$ ,  $b$  – a critical radius. These equations are valid in the case where the kinetics of grain growth is controlled by the dissolution rate. Furthermore, it is natural to assume that during the initial moment of time there is the maximum size of grains  $L$ .

**Approach:** Research was performed in the variables  $r = a/a_L$ ,  $\tau = \int_0^t \frac{dt'}{a_L^2}$ , where  $a_L = a(L, t)$  – the maximum grain size at time  $t$  in which the asymptotic decision is rather easily.

**Findings:** The distribution density  $f(r, \tau) = \rho(r) N(\tau)$  is found in variables  $r, \tau$  at  $\tau \gg 1$ . At initial distribution  $f(a_0, 0) \sim (L - a_0)^m$  ( $a_0 \sim L$ ) density  $\rho(r)$  essentially differs from classical Lifshits-Slezov distribution. Types of initial distributions which lead to classical results are defined. Temporary dependences of average radius, critical radius and number of grains in unit of volume are found.

**Originality:** Results of investigation are new and can be used for a forecast of behavior various melts (for example, in a cooling cover of nuclear reactors).

*Key words:* coalescence, the critical radius, the rate of dissolution, diffusion.



УДК 532.5

С.В. Семин<sup>1</sup>, О.Е. Куркина<sup>2,1</sup>, А.А. Куркин<sup>1</sup>, А.Р. Гиниятуллин<sup>1</sup>**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ОЗЕРА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики<sup>2</sup>

**Цель работы:** Моделирование динамики внутренних бароклиных возмущений различной формы в модельном озере переменной глубины, анализ поля скорости частиц жидкости, особенно вблизи дна, в индуцированном волновыми движениями потоке.

**Научный подход:** Исследование проведено с использованием численной полнонелинейной трехмерной негидростатической модели для стратифицированной жидкости.

**Результат:** Проведено полнонелинейное трехмерное численное моделирование динамики внутренних волн в стратифицированном озере. Проанализированы распределения придонных скоростей, получаемые при расчетах; показано, что трехмерные эффекты в значительной мере определяют структуру поля скорости; выделены области, где скорости максимальны (в таких областях внутренние волны являются основным фактором взвешивания частиц донных наносов и эрозионных процессов на дне) и области низких скоростей.

**Новизна:** Результаты исследования новы и могут иметь практическое приложение для многих прикладных, особенно экологических и хозяйственных задач, связанных с процессами распространения естественных и техногенных примесей в природных бассейнах и определением качества воды в них, а также с воздействием на гидротехнические сооружения и транспорт донных наносов.

*Ключевые слова:* численное моделирование, полнонелинейная негидростатическая модель, внутренние волны.

**Введение**

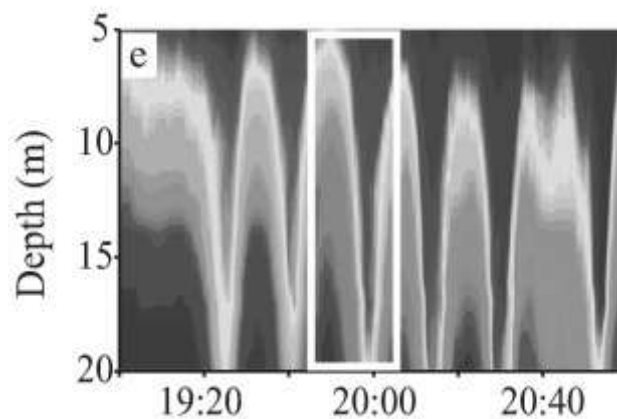
Проблема прогнозирования специфических физических процессов, которые определяют состояние замкнутых стратифицированных водоемов (озер, водохранилищ), интересна как с геофизической, так и с экологической точек зрения, так как качество воды и характер экологической системы большинства таких водоемов напрямую зависят от горизонтального переноса и вертикального перемешивания примесей, взвешенных частиц донных осадков, растворенных минеральных и питательных веществ, кислорода и других биологических агентов. Все это важно учитывать при развёртывании хозяйственной деятельности человека с использованием природных водных ресурсов.

Для вертикальной структуры природных водоемов умеренных широт характерен верхний перемешанный слой, ниже которого располагается скачок плотности – пикноклин, который в пресноводных водоемах обеспечивается в основном изменением температуры воды и фактически представляет собой термоклин. Представление о механизмах формирования перемешанного слоя, пикноклина и полей скорости важно для решения многих прикладных задач, особенно экологических и хозяйственных. Они в значительной мере определяют ход процессов распространения естественных и техногенных примесей в этих природных бассейнах и влияют на качество воды в них.

Поток энергии в замкнутые водоемы обеспечивается, главным образом, за счет ветрового воздействия. Оно инициирует стгонно-нагонные явления, отклоняя поверхность водоема и термоклин от горизонтального уровня [1, 2]. В бассейнах малых и средних размеров (для которых можно пренебречь влиянием вращения Земли) откликом на такое воздействие после прекращения ветра становится низкочастотная стоячая волна с длиной, равной размерам водоема – гравитационная сейша, в поле как поверхностных, так и внутренних волн [1, 3, 4]. В водоемах значительных размеров воздействие ветра приводит к генерации волн с длинами порядка размеров водоема, которые могут быть идентифицированы как волны Кельвина или Пуанкаре [5]. Изменения атмосферного

давления также часто вызывают колебания уровня воды в водоеме. По закону «обратного барометра» понижение давления на один миллибар вызывает повышение уровня на один сантиметр. При выходе барического образования с водной акватории на сушу вода, оказавшись без внешнего воздействия, приходит в колебательное движение. Вертикальная структура этих крупномасштабных колебаний существенно зависит от распределения ветрового воздействия во времени и в пространстве и от особенностей батиметрии бассейна, но, как правило, большая часть энергии бароклинных возмущений остается в двух низших модах.

Натурные наблюдения, однако, показывают, что поле внутренних гравитационных волн в закрытых бассейнах имеет непрерывный спектр частот – от низких, соответствующих сейшам и волнам Кельвина, до высоких, достигающих частоты плавучести [6, 7]. Реальные записи внутренних волн в озерах часто представляют собой цуги интенсивных короткопериодных импульсов, или пакеты внутренних солитонов (см., рис. 1), сформировавшиеся в результате нелинейной эволюции синусоидальных низкочастотных волн малой амплитуды [1, 3, 6, 8–10], что иллюстрирует передачу энергии от больших масштабов – малым.



**Рис. 1. Запись температуры в северо-западной части озера Констанс (lake Constance) летом 2008 г. (интервал между контурами  $0.1^{\circ}\text{C}$ , дискретизация по времени 1 с), демонстрирующая интенсивные внутренние солитоноподобные импульсы, по данным [9]**

Возможные механизмы перераспределения энергии от волн в масштабах всего бассейна в относительно короткие волны и даже в турбулентные состояния включают:

- 1) нелинейное укрупнение;
- 2) сдвиговую неустойчивость;
- 3) накат и отражение от наклонных границ;
- 4) взаимодействие с топографией [11] и рассеяние на интрузиях плотности [12].

Эти механизмы были изучены в теоретических, лабораторных и численных работах [10, 13–16].

Механизм генерации крупномасштабных колебаний уровня изучен достаточно давно и подробно [17–19], в то же время сравнительно мало внимания уделялось тому, как энергия передается по спектру от длинных волн к более коротким [11, 20–23]. Такая ситуация объясняется тем, что гидродинамические модели, используемые в лимнологии [24, 25], в своем большинстве не могут корректно воспроизводить каскад передачи энергии от сейшевых колебаний к сильнонелинейным уединенным возмущениям и возникающее при их трансформации на мелководье перемешивание водных слоев (это, как правило, связано с приближением гидростатики, особенностями стратификации пресноводных водоемов, недостаточным временным и/или пространственным разрешением моделей).

Нелинейные волновые движения в замкнутых стратифицированных бассейнах характеризуются многомодовым составом (как в смысле вертикальных бароклинных, так и горизонтальных мод) и большим разнообразием режимов и форм: от распространяющихся и

стоячих волн до локализованных (солитоноподобных и короткоживущих волн большой амплитуды), включая их всевозможные нелинейные суперпозиции. Точное описание возмущений большой амплитуды является наиболее важным практически, поскольку интенсивные волны значимы не только из-за большой заключенной энергии, но и из-за их нелинейной природы, делающей их динамику более сложной. Эффекты нелинейности обеспечивают перераспределение энергии в спектре волн и появление когерентных состояний, проявляющихся в возникновении очень крутых несинусоидальных волн и долгоживущих волновых групп, обладающих собственной динамикой. Такие интенсивные внутренние возмущения необходимо наиболее детально исследовать, так как с точки зрения практики они являются важным источником сильных течений, вертикального перемешивания и эрозии дна, прохождение внутренних солиборов может приводить к стократному увеличению диффузии и перемешивания через термоклин [26], вносить вклад в создание сдвигов скорости и неустойчивости в придонном слое жидкости, важна их роль в процессах транспорта донных частиц и примесей на большие расстояния. Нетривиальным образом определяются и пространственно-временные распределения компонентов скорости и поля давления в жидкости при прохождении локализованных возмущений, местоположение экстремумов в этих полях определяется номером вертикальной моды волны и может приходиться как на внутренние области жидкости, так и на ее дно и поверхность [27, 28]. Изучение динамики течений, образующихся в результате распространения сильнонелинейных внутренних гравитационных волн, позволяет проводить качественные оценки расположения зон конвергенции и дивергенции в поле скорости частиц жидкости и прогнозировать места аккумуляции и эрозии донного материала.

Рассматриваемые задачи трехмерной волновой динамики в ограниченной горизонтально- и вертикально-неоднородной жидкой среде, в целом, являются классическими с точки зрения механики жидкости. При этом до недавнего времени сложность исходной системы уравнений гидродинамики ограничивала исследователей либо рамками некоторых частных случаев, либо упрощающими предположениями (такими, как слабая нелинейность, длинноволновость, горизонтальная однородность, одноволновость и т.п.). Поэтому к настоящему времени разработан ряд упрощенных приближенных моделей различного уровня точности для описания динамики внутренних гравитационных волн в замкнутых бассейнах. Они используют различные ограничения на параметры волновых возмущений и предположения о форме вертикальной стратификации плотности и адекватны в определенных диапазонах внешних условий и волновых режимов. Однако возросшие в последние годы возможности математического моделирования с применением современных вычислительных технологий существенно расширяют круг адекватно описываемых и решаемых проблем. В связи с этим представляется необходимым исследовать эффекты полной нелинейности для интенсивных возмущений в стратифицированной жидкости как самостоятельно, так и в проекции на кинематические и динамические характеристики таких процессов. Универсальным инструментом для исследования всех рассматриваемых нами процессов в наиболее широком диапазоне параметров являются все же исходные уравнения гидродинамики стратифицированной жидкости. Численная реализация таких уравнений представляет собой на порядок более сложную задачу, чем для упрощенных систем, поэтому здесь предпочтительно использование международных общепризнанных программных комплексов, неоднократно протестированных и апробированных для различных сочетаний внешних гидрологических условий. Исследования динамики озер с использованием международных полнонелинейных численных моделей только начинают появляться [10, 23].

Подводя итоги, нужно сказать, что специфика волновых процессов в локальных закрытых водоемах требует уточнения и применения адекватных современных математических моделей, учитывающих особенности стратификации, рельефа дна, нелинейность, дисперсию и диссипацию волн. Региональные же аспекты этой проблематики изучены вообще весьма слабо, за исключением самых крупных российских озер.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования динамики внутренних гравитационных волн в замкнутом бассейне с плавной температурно-соленостной стратификацией. Задача является отчасти модельной, однако прообразом для формирования расчетной области и гидрологических полей в ней послужило озеро Шира (Россия, республика Хакасия), в котором существование локализованных интенсивных внутренних волн подтверждено непосредственными инструментальными наблюдениями [29]. Численное моделирование начальной задачи для исходных полнонелинейных уравнений вязкой стратифицированной жидкости с учетом горизонтальной неоднородности среды и взаимодействия с границами проводилось с помощью современной трехмерной модели MITgcm (Massachusetts Institute of Tehnology General Circulation Model) для системы уравнений Навье-Стокса, разработанной в Массачусетском технологическом институте (США). Основное внимание уделено анализу динамики полей горизонтальной и вертикальной скорости с точки зрения их пространственной структуры, особенно вблизи границ области. Полученные данные в дальнейшем могут быть использованы для анализа процессов перераспределения примесей, транспорта жидких и взвешенных частиц, определяющих их динамических процессов, формирования донного профиля, а также воздействия на береговые зоны и гидротехнические сооружения.

### Инструмент и методы вычислений

В рамках настоящей работы проведено численное моделирование начальных возмущений различной формы для расчетной области, приближенной к реальной батиметрии озера Шира, методами программного комплекса MITgcm. Стоит заметить, что уже была предпринята попытка исследования данного объекта, результаты приведены в работе [30], где представлены результаты моделирования внутрижидкостных течений с учетом ветровых воздействий на поверхности на основе уравнений мелкой воды. Целью же нашей работы является исследование поля скоростей в придонном пограничном слое, возникающее в результате эволюции начального возмущения пикноклина, с использованием полнонелинейной численной модели.

Теоретические обоснования, более подробные описания математической модели, а также методов численного решения можно найти в работах [31–33]. В статье [32] содержатся официально опубликованные результаты по разработке системы уравнений, лежащих в основе MITgcm, методов её решения, а так же описание возможностей по распределению нагрузки расчётов между несколькими узлами вычислительного комплекса. Работа [33] представляет собой источник исчерпывающей информации о программном комплексе в целом, начиная с примеров использования, масштабов применимости, и заканчивая руководством по разработке дополнительных модулей для комплекса. Тем не менее, далее в статье все же будет приведено краткое описание теоретических основ MITgcm.

Данная работа посвящена численному моделированию динамики внутренних гравитационных волн в стратифицированном озере методами полнонелинейной численной модели MITgcm. Возможность осуществления этого продемонстрирована в работах [34, 35], причём обе они касаются именно нелинейных внутренних волн, что важно для настоящего исследования, поскольку в рассматриваемом водоёме по результатам наблюдений известны факты их появления. В работе [34] представлены результаты исследования внутренних волн в озере Каюга (США, Нью Йорк) с использованием MITgcm. Наряду с этим в [3] отражена возможность численного моделирования динамики внутренних уединённых волн методами того же комплекса.

Программный комплекс MITgcm предназначен для изучения геогидродинамических процессов широкого спектра масштабов: от конвекции в небольших водоёмах (в том числе и

в опытовых лотках) и до глобальных циркуляционных структур и термохалинных течений. Благодаря двухуровневой архитектуре, разделяющей реализацию численной схемы и уникальный программный интерфейс для организации распределенных вычислений, комплекс MITgcm обладает уникальной гибкостью и переносимостью на различные вычислительные платформы.

Используемая система позволяет описывать динамику несжимаемой жидкости в уравнениях Навье-Стокса с учетом приближения Буссинеска в пространстве размерности 3+1. Непосредственно уравнения с описанием каждой переменной могут быть найдены в [32, 36]. Используемый комплекс позволяет моделировать негидростатическую динамику жидкости [32, 36]. Реализуется это методом разделения давления  $\phi$  на три составляющих:

$$\phi(x, y, r) = \phi_S(x, y) + \phi_h(x, y, r) + \phi_{nh}(x, y, r), \quad (1)$$

где  $\phi_S$  – давление на поверхности жидкости,  $\phi_h$  – гидростатическое давление,  $\phi_{nh}$  – негидростатическое давление. Причём производная по вертикальной координате от гидростатического давления уравновешивается плавучестью, в то время как производная от негидростатического давления принимает непосредственное участие при расчёте вертикальной составляющей скорости, наравне со слагаемыми, отвечающими за адвекцию, вязкость, ускорение Кориолиса. В случае же гидростатики вертикальная составляющая скорости рассчитывается по формуле:

$$w = -\int_0^z \nabla_h V_h dz', \quad (2)$$

где  $w$  – вертикальная составляющая скорости,  $z$  – вертикальная координата,  $V_h$  – горизонтальные составляющие скорости,  $\nabla_h$  – оператор градиента, действующий только в горизонтальной плоскости.

Именно возможность негидростатических расчётов позволяет наиболее точно описывать динамику внутренних волн с учетом дисперсии. Однако в этом случае расчёты сильно замедляются, так как на каждом шаге помимо основной системы уравнений необходимо решать трёхмерное эллиптическое уравнение для негидростатического давления с учётом промежуточных составляющих скорости. Таким образом, математическая модель, лежащая в основе программного комплекса, позволяет моделировать динамику несжимаемой жидкости с учётом диффузии и диссипации, вращения Земли, с учётом эволюционирующей поверхности и атмосферного давления.

Что касается метода численного решения, то наиболее подробно он описан в [36]. Здесь же достаточно отметить, что решение численной схемы разбито на несколько этапов и отличается в случае гидростатических и негидростатических расчётов, а так же условий на поверхности. Если кратко, то явные слагаемые (вязкость, диффузия, адвекция, внешнее воздействие и ускорение Кориолиса) рассчитываются методом Адамса-Бешфорта, коэффициент которого можно задавать среди входных параметров. На его основе находятся промежуточные значения потоковых переменных (составляющие скорости). Затем происходит вычисление эволюции свободной поверхности (двумерное эллиптическое уравнение) и корректировка промежуточных потоковых переменных, которые уже в свою очередь задействованы для решения трёхмерного эллиптического уравнения относительно негидростатического давления. И уже при его участии считаются окончательные значения скорости на следующем временном шаге. Наконец, с учётом уже найденных характеристик потока происходит вычисление термохалинных переменных. Такой подход называется «методом разделения переменных».

Пространственная дискретизация реализована в рассматриваемом комплексе в виде сетки Аракавы, где на сторонах каждой ячейке расчётной области задаются скорости, а в ее

центре параметры, определяющие плотность, температуру и солёность. В результате исследователям предоставляется возможность использовать в расчётах не только декартову, но сферическую или криволинейную системы координат.

И, наконец, для вычисления плавучести (плотности) внутри модели возможно использовать несколько видов уравнений состояния, среди которых наиболее распространены линейное и формулировка UNESCO [37]. Первое удобно использовать в случаях, когда в качестве начального распределения известно уже готовое поле плотности, а второе – если даны профили солёности и температуры.

### Настройки модели и начальные данные

Объект исследования представляет собой закрытый водоём приблизительных размеров  $5 \times 9$  км. Особенность бассейна заключается в том, что при отсутствии явной связи с океаном вода является солёной. В озеро впадает одна река Сон, однако опреснение происходит лишь на небольшом участке около устья и на общую динамику внутренних гравитационных волн влияет слабо, поэтому в дальнейших расчётах её влиянием можно пренебречь. Для упрощения озеро считалось замкнутым, то есть все границы были твёрдыми, не было притоков и стоков. Поверхность жидкости – свободная. В то же время жидкость считалась вязкой: коэффициент горизонтальной вязкости полагался  $0.4 \text{ м}^2/\text{с}$ , а вертикальной –  $0.009 \text{ м}^2/\text{с}$ . Стоит отметить, что натурные данные относительно этой величины неизвестны, числа взяты из аналогичного примера расчётов, поставляемого с программным комплексом. Эффекты вращения Земли не учитывались в связи с небольшими размерами озера.

Параметры расчётной области подбирались таким образом, что удовлетворять необходимому условию устойчивости Куранта-Фридриха-Леви [33]:

$$S_a = \frac{|\vec{u}| \delta t}{\delta x} < S_{CFL} \quad , \quad (3)$$

где  $u$  – максимальное значение скорости по соответствующей координате,  $\delta t$  – шаг по времени,  $\delta x$  – шаг по координате. Для численной схемы, используемой в расчётах, коэффициент  $S_{CFL}$  равен 0.5. Шаг по времени принимался равным 30 с, общее расчётное время 48 часов. Количество точек по осям  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ , соответственно, равнялось 250, 197, 55 точек, размеры расчётной области:  $L_x = 10000$  м,  $L_y = 7000$  м,  $H = 22$  м. Отсюда шаги по координатам принимались:  $dx = 40$  м,  $dy = 35.5$  м,  $dz = 0.4$  м.

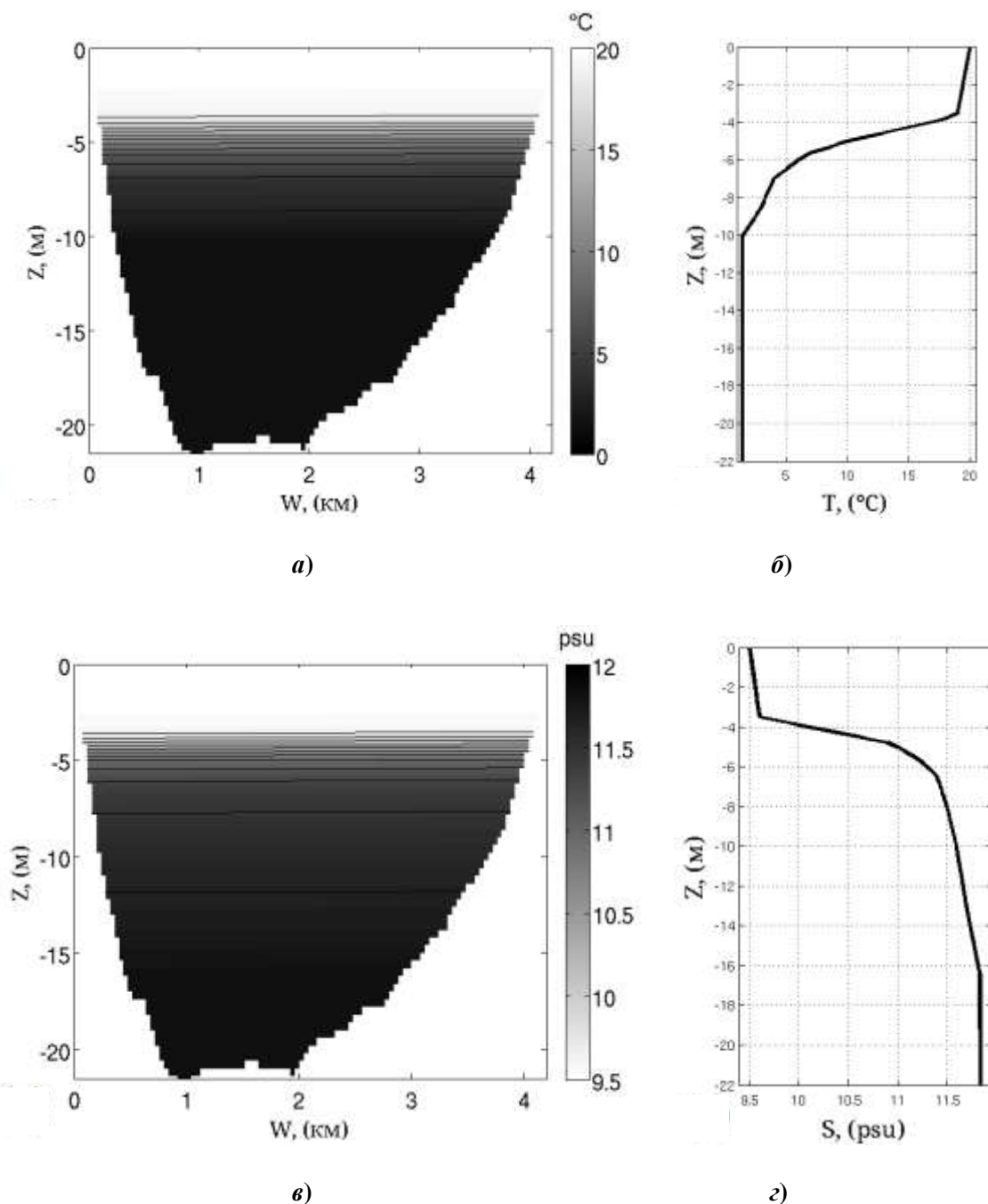
Исходные данные, по которым задавались модельные поля температуры, солёности и батиметрия выбирались в соответствии с материалами работы [29]. На их основе были сгенерированы входные данные для модели: на рис. 2 отображено распределение невозмущенных полей температуры и солёности, а также профили этих величин, а на рис. 3 – батиметрия. Полного массива точек донной поверхности не было в распоряжении авторов, поэтому для задания трёхмерной батиметрии осуществлялась интерполяция имеющегося среза и периметра озера, взятого со спутникового снимка карт Google.

Расчёты проводились для четырёх случаев начальной формы изотермических и изохалинных поверхностей. Форма начальных смещений термоклина и халоклина в первых трех случаях была цилиндрической с направляющими, форма которых показана на рис. 4, *а-в*, вдоль длинной оси озера (это направление показано стрелкой на рис. 3, *а*) и образующими, параллельными его короткой оси. В первом случае выбраны линейно-наклонные плоские термоклины и халоклины (рис. 4, *а*). Во втором случае направляющая выбрана синусоидальной с длиной волны, равной двум длинным осям озера (рис. 4, *б*). Такие начальные возмущения соответствуют одноузловой внутренней сейше. В третьем эксперименте смещение задавалось в виде прообраза двухузловой внутренней сейши (рис. 4, *в*). Интересно было

также проследить эволюцию сложного возмущения гидрологических полей в озере и проанализировать генерируемые ими скорости. Начальное возмущение четвертого вида представлено на рис. 4,  $z$  и определялось выражением

$$\eta(x, y) = a \frac{\sin^2 x + \sin^2 y}{\sqrt[3]{x^2 + y^2}}, \quad (4)$$

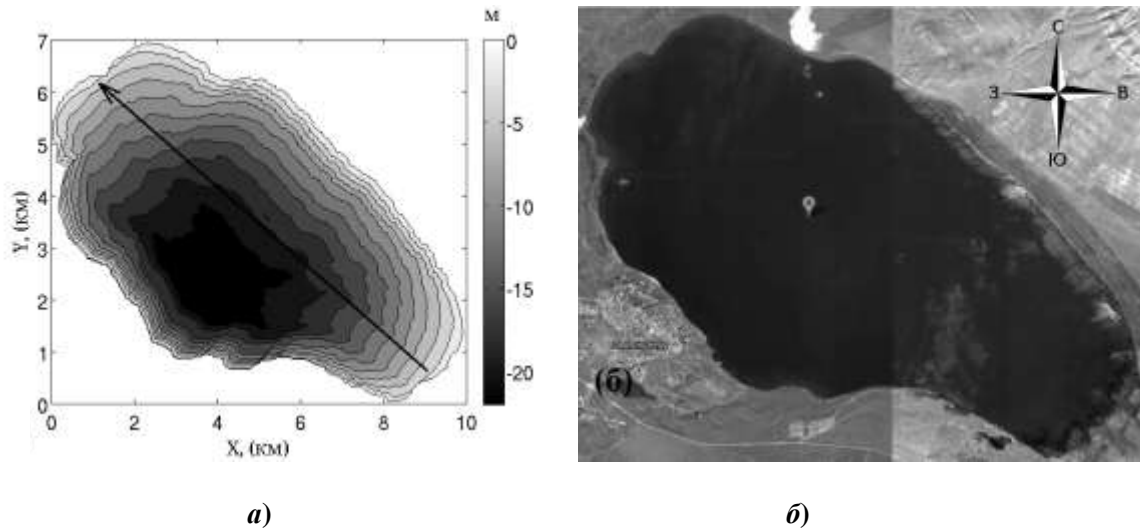
где  $a = 1,87$  нормировочный коэффициент соответствующей размерности. Амплитуда наибольшего смещения совпадает с максимальной амплитудой возмущений по данным [29] и равна 2.3 м.



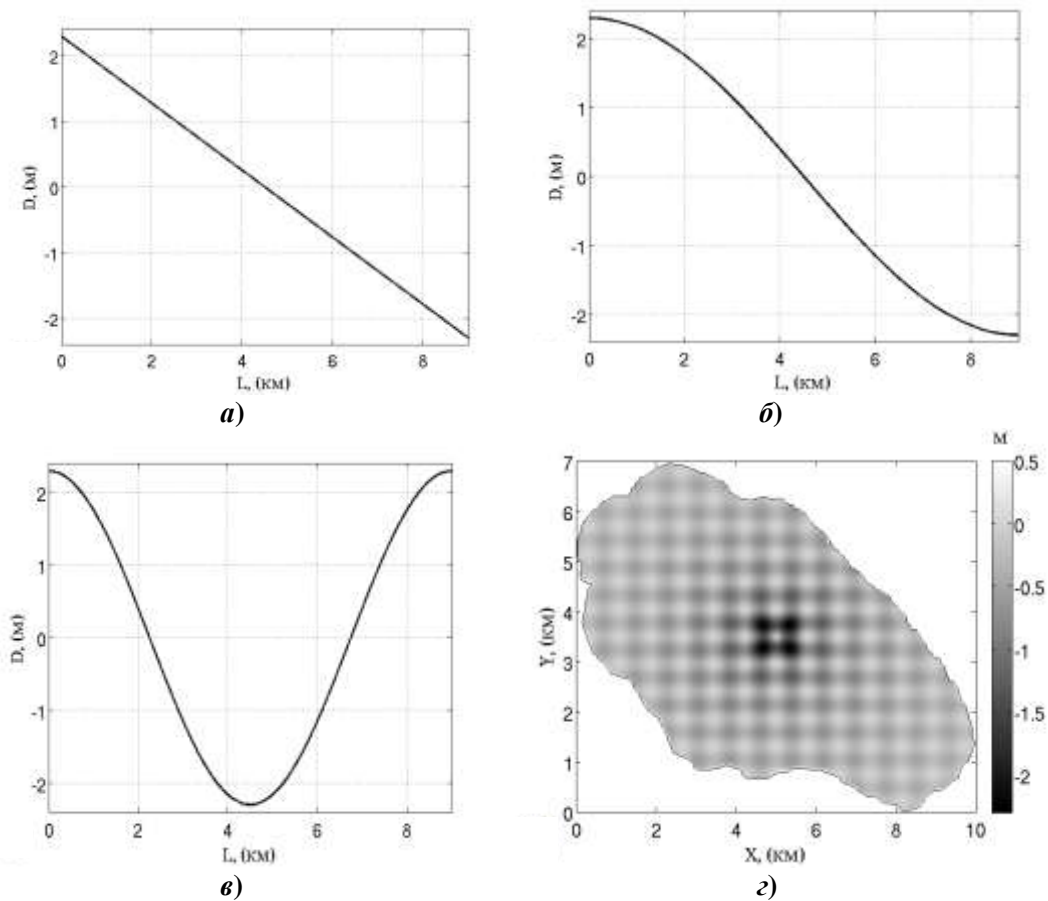
**Рис. 2. Распределение невозмущенных полей трейсеров и их профили в поперечном сечении озера:**

$a$  – распределение температуры,  $b$  – профиль температуры,

$c$  – распределение солёности,  $d$  – профиль солёности



**Рис. 3. Батиметрия расчётной области:**  
*a* - принятая в модели, *б* – спутниковый снимок озера Шира (РФ, республика Хакасия)



**Рис. 4. Профили смещения термоклина и халоклина (*D* – смещение, *L* – координата вдоль длинной оси озера, *X*, *Y* – координаты расчётной области по осям абсцисс и ординат соответственно):**  
*a* – плоское наклонное смещение, *б*, *в* – синусоидальное начальное возмущение, *г* – смещение, определяемое формулой (4)

Смещения термоклина и халоклина в общем случае рассчитывались по формуле

$$K(x, y, z) = K_0(z - \eta(x, y)) \quad (4)$$



где  $x, y, z$  – декартовы координаты точки,  $K$  – двумерное возмущенное поле температуры или солёности,  $K_0$  – невозмущенные профили этих трейсеров, показанные на рис. 2,  $b, z, \eta(x, y)$  – величина смещения изотермических (изохалинных) поверхностей для соответствующего эксперимента.

В начальный момент времени поверхность озера была задана горизонтальной плоскостью, при расчетах она считалась свободной.

В нашем случае озеро имеет переменную глубину, и стратификация является непрерывной, однако приближенно можно ориентироваться на классификацию течений в прямоугольном бассейне при двухслойной стратификации [11], согласно которой случаи 1–3 находятся в области, соответствующей режиму, где присутствуют сверхкритические течения, приводящие к образованию боров и сдвиговой неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Такой режим в реальном озере возникает после воздействия сильного ветра, приводящего к тому, что термоклин может даже пересекать поверхность озера.

### Результаты численного моделирования

На рис. 5 – рис. 7 показана эволюция во времени поля температуры вдоль озера и поля придонной скорости для различных начальных условий. Как уже отмечалось, для режима с начальными условиями № 1 и № 2 характерно образование внутренних боров, которые хорошо заметны в поле температуры после 14 часов от начала колебаний. Вслед за бором распространяется утолщение термоклина, представляющее собой волны второй бароклинной моды. Для начального условия № 3, соответствующего двухузловой сейше, образуются такие же возмущения, но распространяющиеся одновременно в обе стороны, причем процесс их формирования происходит существенно быстрее, чем в предыдущих случаях. Начальное условие № 4 генерирует цилиндрически расходящиеся возмущения, которые рефрагируют, отражаются от границ и быстро затухают.

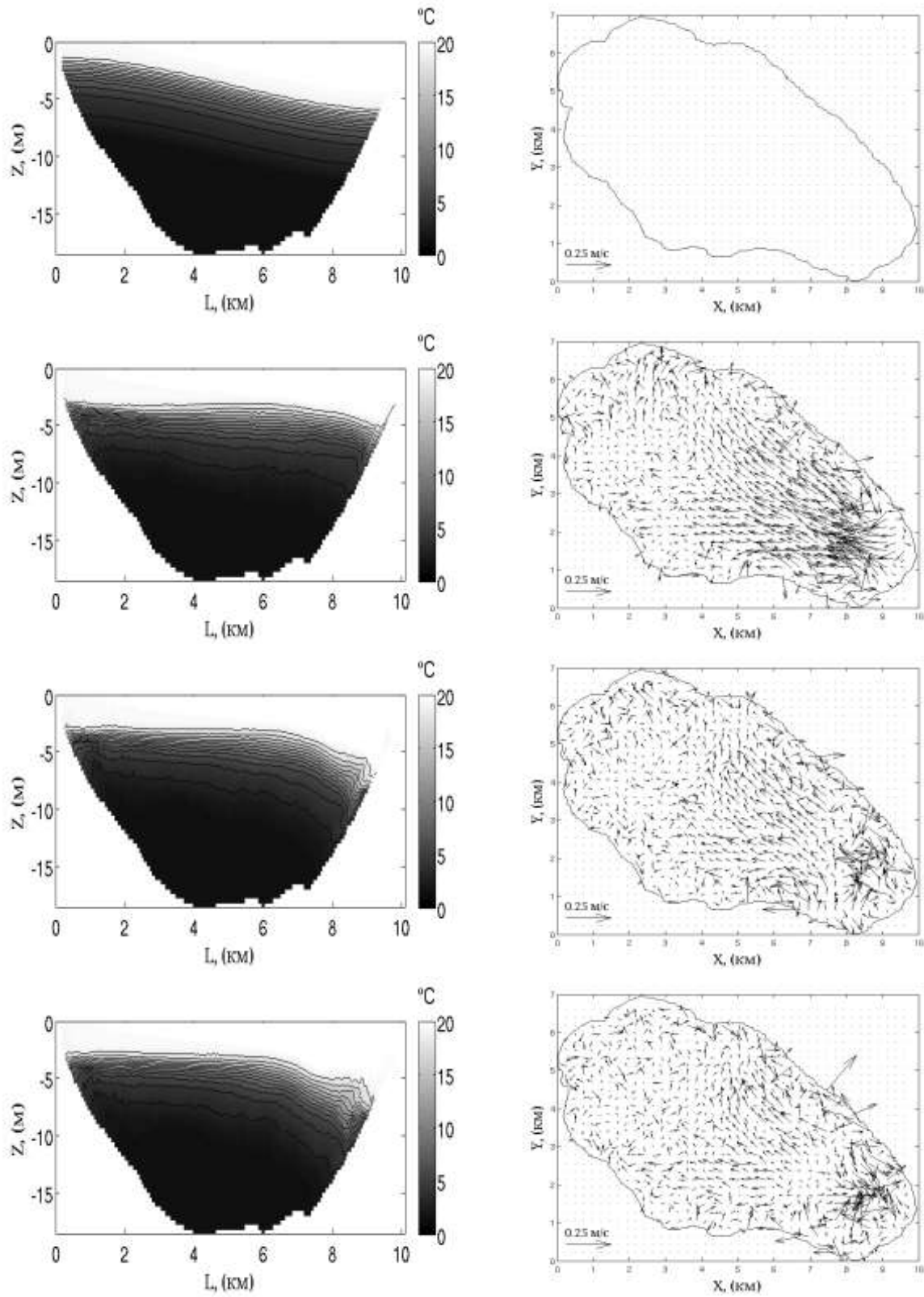
Распределения вектора скорости, показанные для этих расчетов, говорят о том, что трехмерные топографические эффекты являются весьма существенными для представленных ситуаций, и возникающие потоки имеют сложную пространственную структуру.

Исследуем максимальные значения модуля вектора придонной скорости для всех представленных экспериментов. Эти результаты отображены на рис. 8. Как видно из представленных графиков, локальное усиление скорости придонного течения происходит практически во всех мелководных прибрежных зонах; подверженной наиболее сильному кратковременному воздействию в наиболее обширной по площади области можно считать юго-восточную часть озера, причём это касается всех четырех рассмотренных случаев. Сильные течения также возникают в районе северо-восточного побережья. То есть наиболее подвержены воздействию индуцированных бароклинных потоков прибрежные, относительно неглубокие области, расположенные вдоль длинной оси озера, вдоль которой происходят колебания. В случае двухузловой внутренней сейши необходимо отметить увеличение размеров областей, где возможны сильные течения.

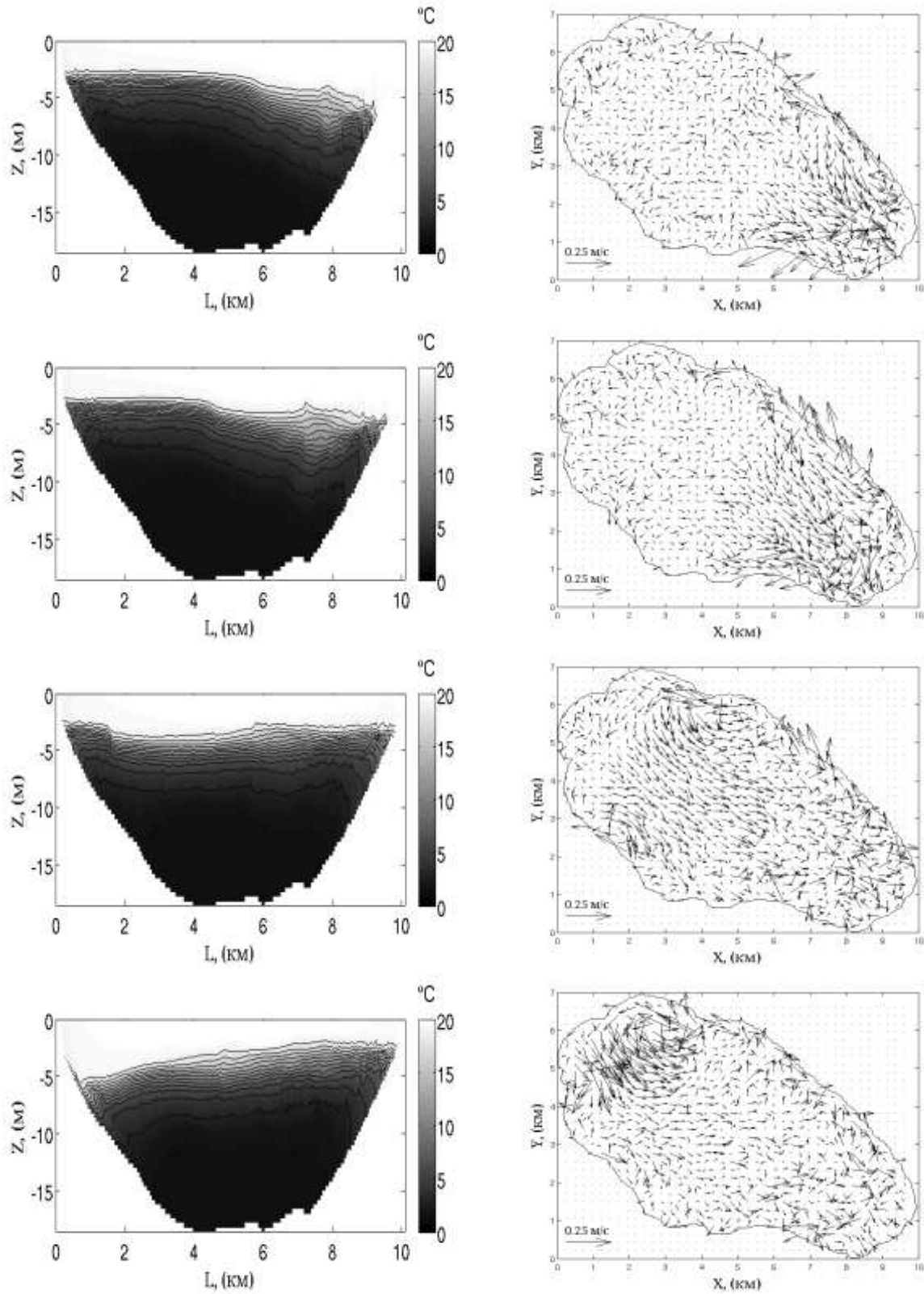
Однако по рис. 8 нельзя судить о локализации зон конвергенции и дивергенции, так как наличие максимальных скоростей в определённой области в общем случае не может служить доказательством появления там наиболее интенсивных волновых движений в течение долгого промежутка времени. Ведь только в случае долговременных волнений могут возникать достаточно серьёзные процессы транспорта донного и взвешенного материала. В таком случае достаточно удобно пользоваться вероятностным распределением превышения абсолютных значений скорости определённого значения, это даёт представление о преимущественных скоростных полях в определённой зоне за весь период расчётного времени.

Далее будут представлены графики для всех четырёх экспериментов, но одновременно для двух показательных скоростей. Поля распределения вероятностей будут отличаться в зависимости от того, относительно какой скорости они рассматриваются. Для этого результаты на рис. 9 – рис. 12 будут продемонстрированы одновременно для двух пороговых зна-

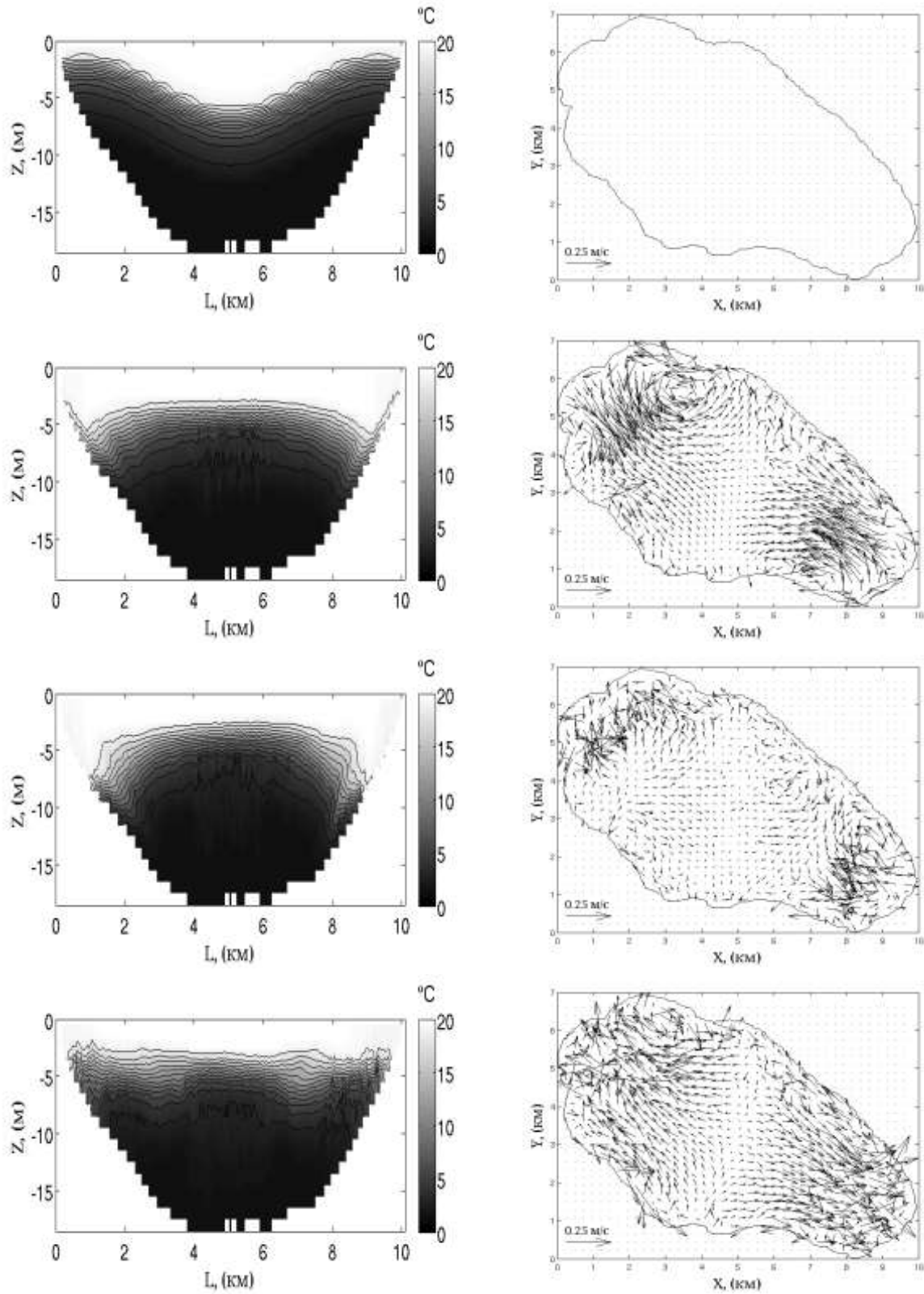
чений: 0.05 м/с и 0.1 м/с. В случае достаточно мелких частиц донного материала скорости в 0.05 м/с вполне достаточно для того, чтобы инициировать его движение.



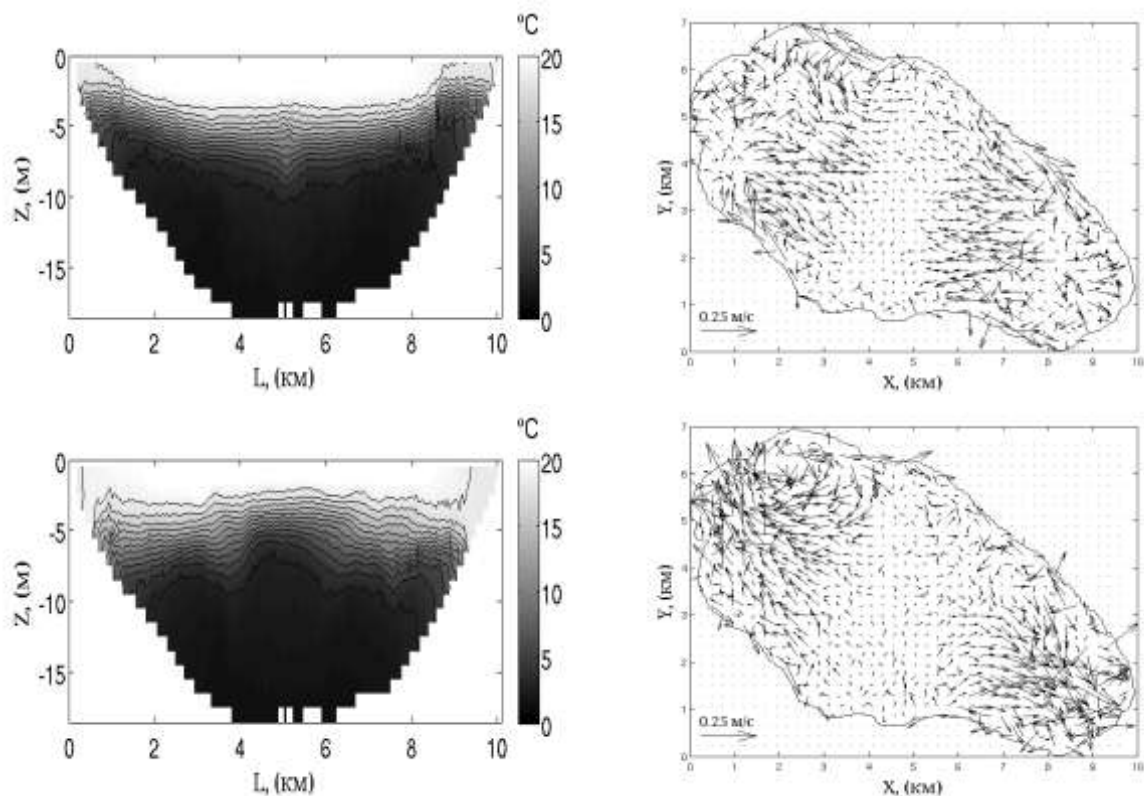
**Рис. 5.** Распределение температуры на вертикальном разрезе вдоль озера и распределение вектора придонной скорости в различные моменты времени, сверху вниз:  $t = 0$ ; 43200 (12 ч); 46800 (13 ч); 48600 (13.5 ч); 52200 (14.5 ч); 55800 (15.5 ч); 64800 (18 ч); 72000 (20 ч). Начальное условие № 2



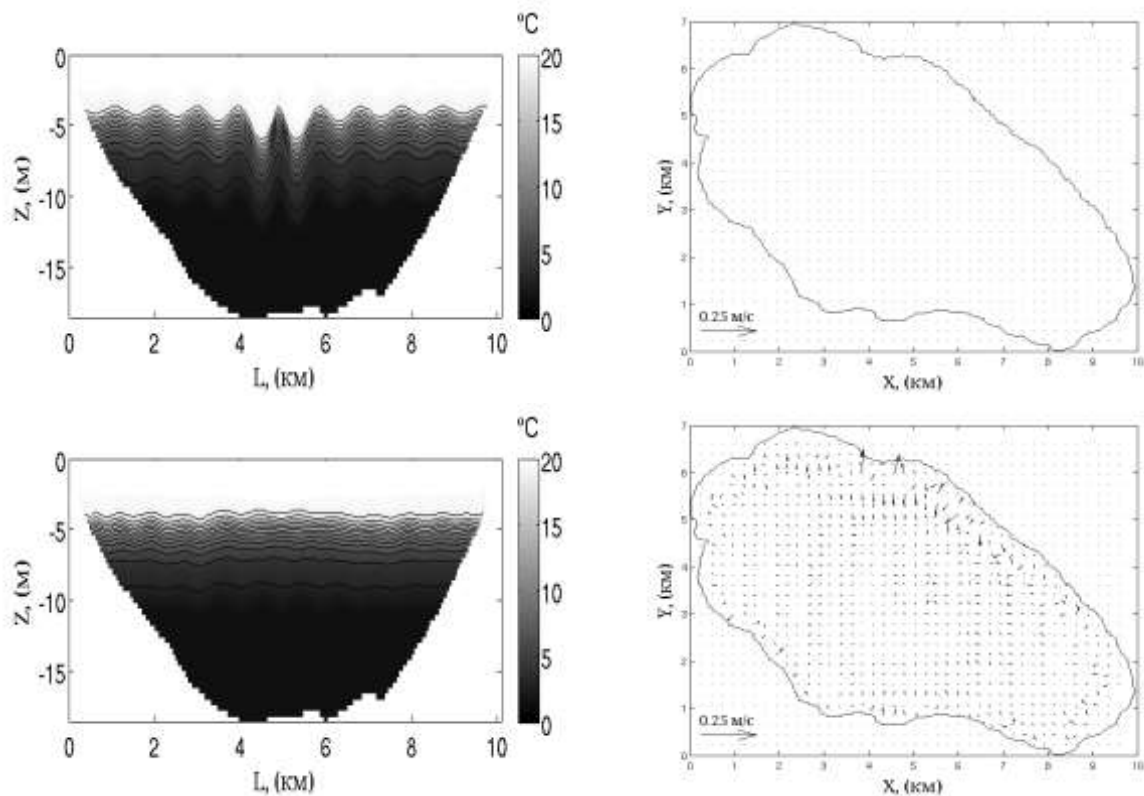
**Рис. 5 (окончание).** Распределение температуры на вертикальном разрезе вдоль озера и распределение вектора придонной скорости в различные моменты времени, сверху вниз:  $t = 0$ ; 43200 (12 ч); 46800 (13 ч); 48600 (13.5 ч); 52200 (14.5 ч); 55800 (15.5 ч); 64800 (18 ч); 72000 (20 ч). Начальное условие № 2



**Рис. 6.** Распределение температуры на вертикальном разрезе вдоль озера и распределение вектора придонной скорости в различные моменты времени, сверху вниз:  $t = 0$ ; 10800 (3 ч); 14400 (4 ч); 21600 (6 ч); 34200 (9.5 ч); 50400 (14 ч). Начальное условие № 3



**Рис. 6 (окончание).** Распределение температуры на вертикальном разрезе вдоль озера и распределение вектора придонной скорости в различные моменты времени, сверху вниз:  $t = 0$ ; 10800 (3 ч); 14400 (4 ч); 21600 (6 ч); 34200 (9.5 ч); 50400 (14 ч). Начальное условие № 3



**Рис. 7.** Распределение температуры на вертикальном разрезе вдоль озера и распределение вектора придонной скорости в различные моменты времени, сверху вниз:  $t = 0$ ; 5400 (1.5 ч); 16200 (4.5 ч). Начальное условие № 3

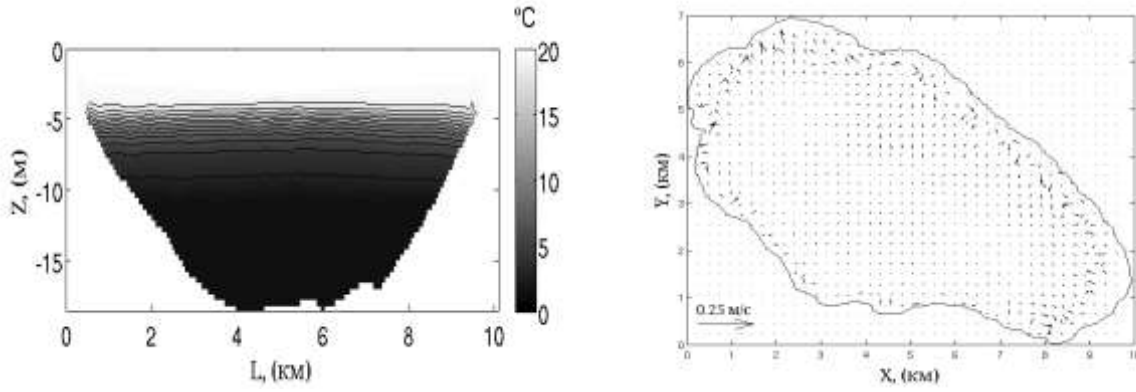


Рис. 7 (окончание). Распределение температуры на вертикальном разрезе вдоль озера и распределение вектора придонной скорости в различные моменты времени, сверху вниз:  $t = 0$ ; 5400 (1.5 ч); 16200 (4.5 ч). Начальное условие № 3

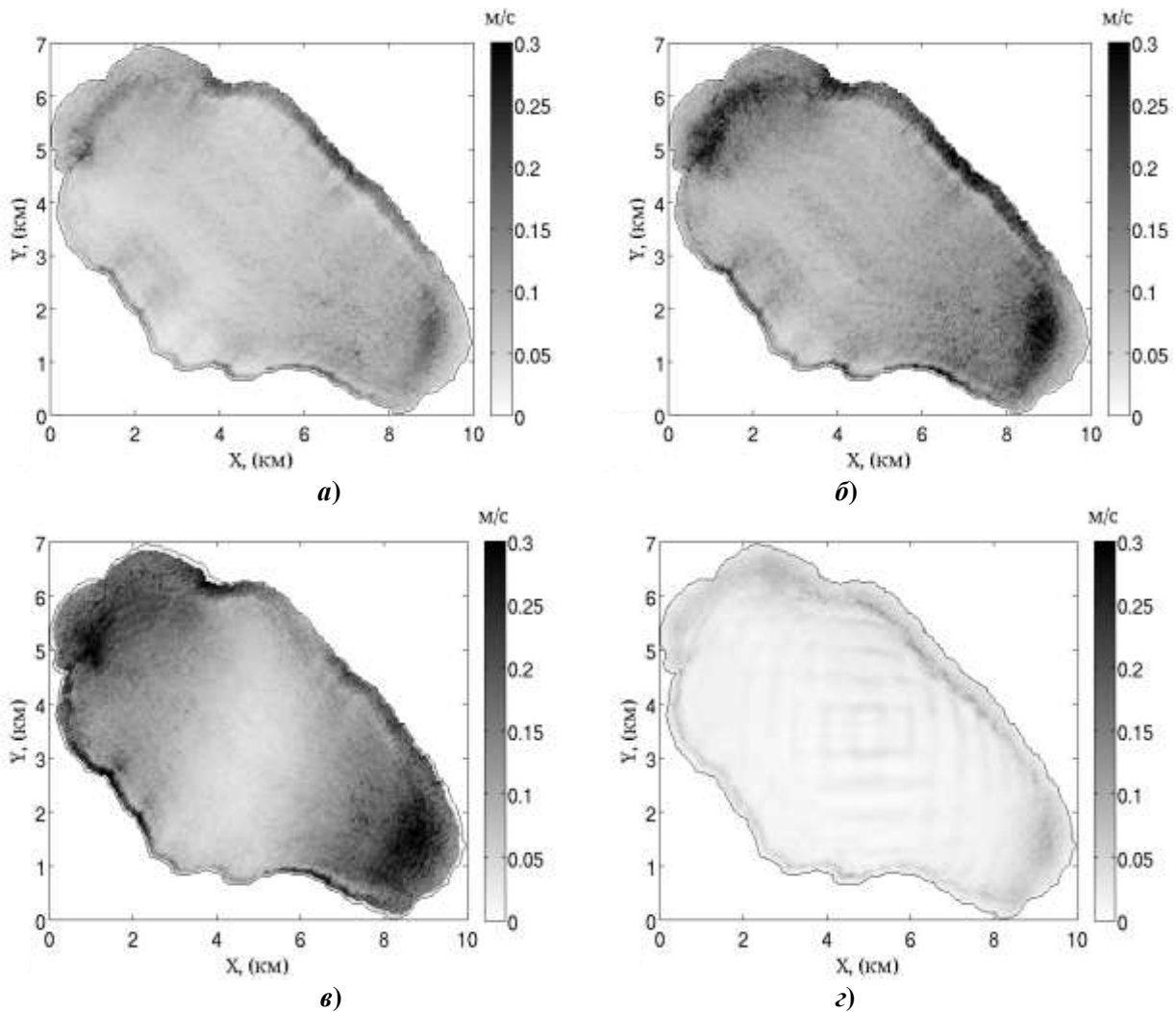


Рис. 8. Максимальные абсолютные значения вектора скорости придонного течения: *а* – линейно-наклонный термоклин и халоклин; *б*, *в* – синусоидальное смещение, *г* – эксперимент 4

Из рис. 9 – рис. 10 видно, что в случае эволюции одноузловой сейши наиболее интенсивные бароклинные движения возникают в северо-восточной части озера. То есть в течении приблизительно тридцати восьми часов там присутствовали потоки со скоростью, большей 0.05 м/с. Однако результаты на рис. 10 демонстрируют те же области интенсивных скоростей, что и рис. 8, *в*, за исключением небольшой части западного побережья. В этом районе присутствовали максимальные скорости, однако долгого волнового воздействия здесь не

наблюдается (рис. 11). Одновременно с этим ситуация в четвертом случае подтверждает выводы согласно рис. 10, и здесь наиболее интенсивные процессы размыва осуществляются в юго-восточной области. Однако они очень непродолжительны, и в данном случае не смогут спровоцировать сильные транспортные процессы.

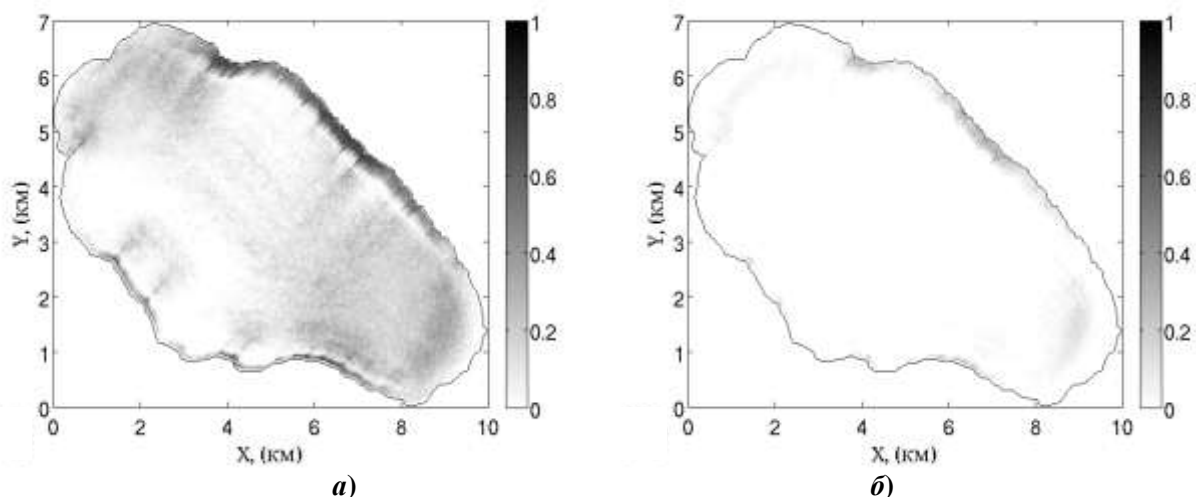


Рис. 9. Распределения вероятностей превышения абсолютных скоростей для первого эксперимента: *a* – скорости выше 0.05 м/с; *б* – скорости выше 0.1 м/с

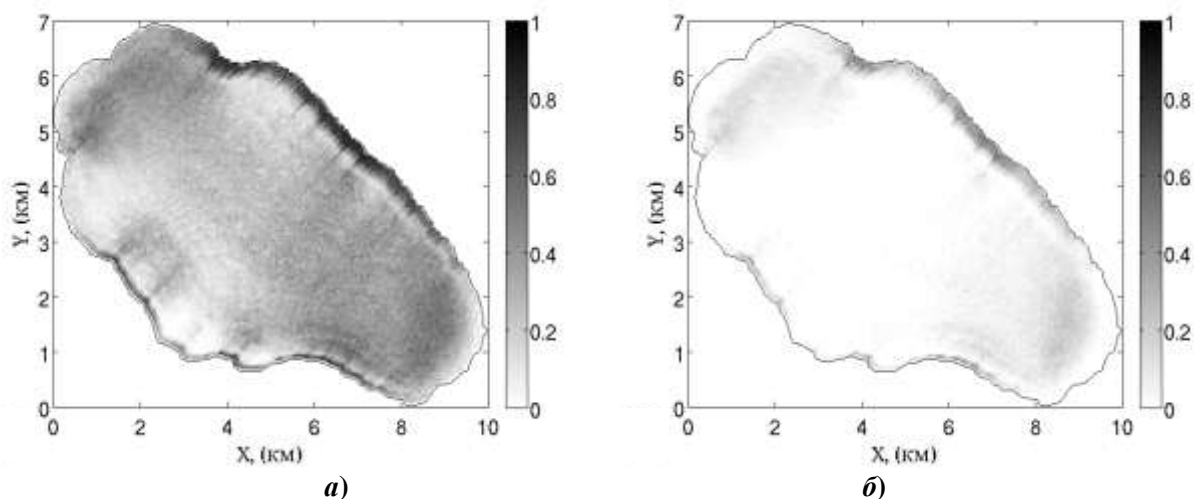


Рис. 10. Распределения вероятностей превышения абсолютных скоростей для второго эксперимента: *a* – скорости выше 0.05 м/с; *б* – скорости выше 0.1 м/с

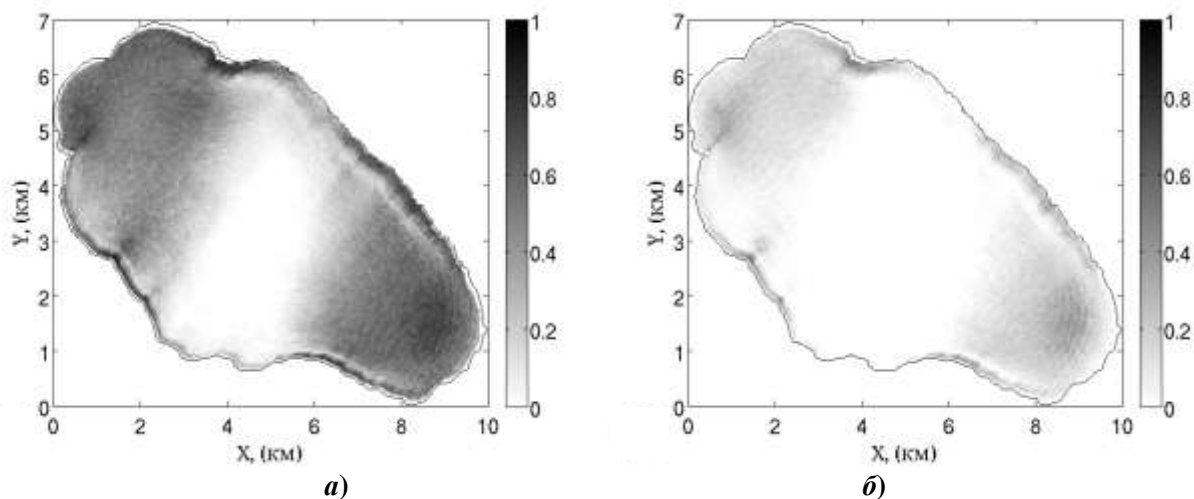
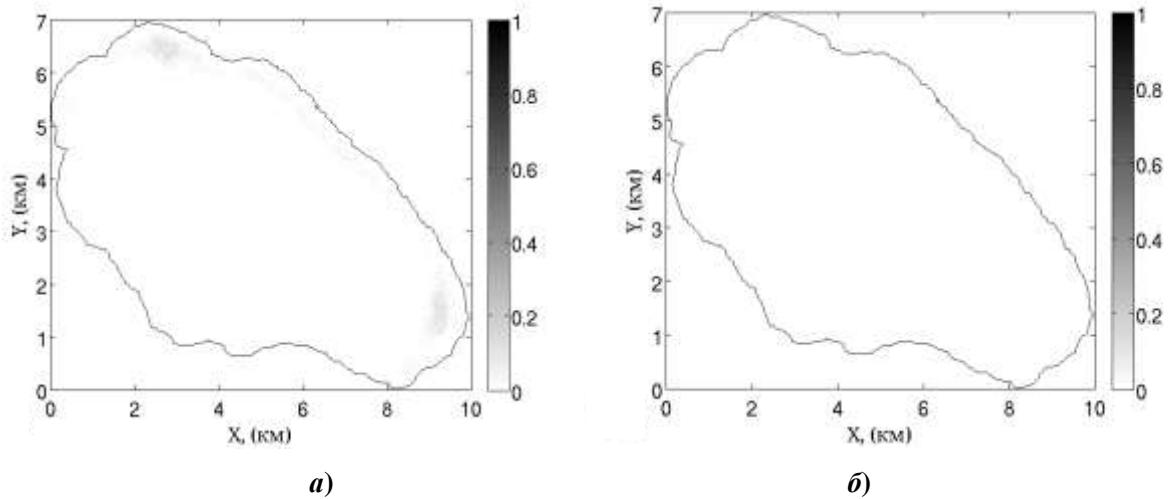


Рис. 11. Распределения вероятностей превышения абсолютных скоростей для третьего эксперимента: *a* – скорости выше 0.05 м/с; *б* – скорости выше 0.1 м/с



**Рис. 12. Распределения вероятностей превышения абсолютных скоростей для четвёртого эксперимента: а – скорости выше 0.05 м/с; б – скорости выше 0.1 м/с**

Тем не менее, рис. 10 – рис. 12 подтверждают тот факт, что во втором и в третьем экспериментах волновые процессы более интенсивные, нежели в остальных. Это демонстрирует высокое значение вероятностей превышения скоростей на рис. 10 и рис. 11. Однако их отличие заключается в том, что в случае двухузловой сейши площадь областей, где возникающие скорости превышают нижнюю границу пороговых значений с вероятностью 0.6 больше, чем во втором эксперименте. Одновременно с этим во втором эксперименте наблюдается район, где скорости волн с вероятностями 0.8 больше 0.05 м/с. Это говорит о том, что при эволюции двухузловой внутренней сейши процессы размыва будут более обширны, в то время как их интенсивность во втором эксперименте выше, то есть в этом случае они более локализованы в районе северо-восточного побережья.

Наряду с этим в четвёртом эксперименте все волны, возникающие в результате эволюции множественных возмущений термоклина и халоклина, сравнительно быстро затухают. Здесь можно выделить лишь юго-восточную и северо-западную части озера, где около четырнадцати часов за все расчётное время наблюдались скорости выше 0.05 м/с, но как видно из рис. 9, б, все это время они были ниже 0.1 м/с.

Таким образом, в совокупности экспериментов можно сказать, что наиболее подверженными воздействию потоков вблизи дна будут северо-западная и юго-восточная части озера. Там вероятнее всего будут происходить интенсивные процессы транспорта наносов – поднятие донного материала и перенос взвешенных частиц. При возникновении одноузловой сейши трехмерные эффекты приводят к тому, что наиболее интенсивные потоки будут наблюдаться на дне вблизи северо-восточного побережья.

Проведенные расчеты помогают выделить области (юго-западная и центральная части озера), характеризующиеся низкими скоростями придонных течений, соответственно их можно классифицировать как области низкого риска, связанного с эрозией донного материала. Они будут также возможными зонами аккумуляции донных наносов.

### Заключение

В настоящей работе проведены расчёты динамики начального возмущения поля плотности в модельном озере с использованием современной международной поллонелинейной численной модели.

В результате моделирования было показано, что при эволюции рассмотренных начальных возмущений генерируются сложные распределения полей придонных скоростей, проанализированы географические позиции экстремумов этих распределений.

При построении региональной системы планирования экологического развития и хозяйственной деятельности целесообразным было бы проведение более детальных численных



экспериментов, базирующихся на уточненных натуральных данных, поскольку в этом случае можно более точно выделить границы областей потенциальной аккумуляции и эрозии донных материалов в озере.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также при поддержке гранта РФФИ 10-05-00199.

#### Библиографический список

1. **Филатов, Н.Н.** Гидродинамика озер / Н.Н. Филатов. – М.: Наука, 1991. 196 с.
2. **Stevens, C.** Wind forcing of internal waves in a long stratified lake / C. Stevens [et al.] // *Dyn. Atmos. Oceans*. 1996. V. 24. P. 41–50.
3. **Farmer D.M.** Observations of long nonlinear waves in a lake // *J. Phys. Oceanogr.* 1978. V. 8. P. 63 – 73.
4. **Hutter, K.** Large scale water movements in lakes / K. Hutter [et al.] // *Aquatic Sciences*. 1991. V. 53. P. 100 – 135.
5. **Imberger J.** Flux paths in a stratified lake: a review // *Physical processes in lakes and oceans. Coastal and estuarine studies*, 1998, V. 54. P. 1 – 18.
6. **Thorpe, S.A.** Turbulence and mixing in a Scottish loch // *Phil. Trans. R. Soc. Lond., A* 1977. V. 286. P. 125 – 181.
7. **Saggio, A.** Internal wave weather in a stratified lake / A. Saggio, J. Imberger // *Limnol. Oceanogr.* 1998. V. 43. P. 1780 – 1795.
8. **Lorke, A.** High-frequency internal waves in the littoral zone of a large lake / A.Lorke, F. Peeters, E.Bauerle // *Limnol. Oceanogr.* 2006. V. 51. № 4. P. 1935 – 1939.
9. **Preusse, M.** Internal waves and the generation of turbulence in the thermocline of a large lake / M. Preusse, F. Peeters, A.Lorke // *Limnol. Oceanogr.* 2010. V. 55. № 6. P. 2353 – 2365.
10. **Hutter, K.** (Ed.) *Nonlinear internal waves in lakes*. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 277 p.
11. **Horn, D.A.** The degeneration of large-scale interfacial gravity waves in lakes / D.A. Horn, J. Imberger, G.N. Ivey // *J. Fluid Mech.* 2001. V. 434. P. 181 – 207.
12. **Maderich, V.** Laboratory experiments on intrusive flows and internal waves in a pycnocline / V.Maderich, G.J. Heijst, A. Brandt // *J. Fluid Mech.* 2001. V. 432. P. 285 – 311.
13. **Horn, D.A.** Internal solitary waves in lakes – a close problem for hydrostatic models / D.A. Horn, J. Imberger, G.N. Ivey // *Proceedings of Aha Halikoa Hawaiian Workshop, January 19-22. University of Hawaii, Manoa*. 1999. P. 95 – 101.
14. **Michallet, H.** Experiments on mixing due to internal solitary waves breaking on uniform slopes / H. Michallet, G.M. Ivey // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 13467 – 13477.
15. **Huttemann, H.** Baroclinic solitary water waves in a twolayered fluid system with diffusive interface / H. Huttemann, K. Hutter // *Experiments in Fluids*. 2001. V. 30. P. 317 – 326.
16. **Vlasenko, V.I.** Numerical experiments on the breaking of solitary internal waves over slope-shelf topography / V.I. Vlasenko, K. Hutter // *J. Phys. Oceanogr.* 2002. V. 32. P. 1779 – 1793.
17. **Hodges B.R., Imberger J., Saggio A., Winters K.B.** Modeling basinscale internal waves in stratified lake // *Limnol. Oceanogr.* 2000. V. 45. P. 1603 – 1620.
18. **Wang, Y.** Methods of substructuring in lake circulation dynamics / Y. Wang, K. Hutter // *Advances in Water Resources*. 2000. V. 23. P. 399 – 425.
19. **Wang, Y.** Wind induced baroclinic response of Lake Constance / Y.Wang, K. Hutter, E. Bauerle // *Ann. Geophysicae*. 2000. V. 18. P. 1488 – 1501.
20. **Vlasenko, V.I.** Transformation and disintegration of strongly nonlinear internal by topography in stratified lakes / V.I. Vlasenko, K. Hutter // *Annal. Geophys.* 2002. V. 20. P. 1779 – 1793.
21. **Stashchuk, N.** Numerical modelling of disintegration of basin-scale internal waves in a tank filled with stratified water / N. Stashchuk, V. Vlasenko, K. Hutter // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2005. V. 12. P. 955 – 964.
22. **Sakai, T.** A weakly nonlinear model for multi-modal evolution of wind-generated long internal waves in a closed basin / T. Sakai, L.G. Redekopp // *Nonlin. Processes Geophys.* 2009. V. 16. P. 487 – 502.
23. **Терлецкая, Е.** Сильно-нелинейные внутренние сейши в удлиненных стратифицированных озерах и феномен «озерных монстров» / Е. Терлецкая, В. Мадерич, И. Бровченко //

- Прикладная гидромеханика. 2010. Т. 12(84). № 4. С. 1 – 5.
24. **Umlauf, L.** Comparing two topography-following primitive equation models for lake circulation / L. Umlauf, Y. Wang, K. Hutter // *J. Comp. Physics*. 1999. V. 153. P. 638 – 659.
  25. **Margvelashvili, N.** 3D modelling of the mud and radionuclide transport in Chernobyl cooling pond and Dnieper-Boog Estuary / N. Margvelashvili [et al.] // *Fine Sediments Dynamics in the Marine Environment Proc. of INTERCOH-2000*. ed. J.C. Winterwerp and C. Kranenburg, Elsevier, 2002. P. 595 – 610.
  26. **Mak Kinnan J.A., Gregg M.C.** Mixing on the late-summer new England shelf-solibores, shear and stratification // Preprint. AGU, 1999. № 4. 19 p.
  27. **Vlasenko, V.** Structure of large-amplitude internal solitary waves / V. Vlasenko, P. Brandt, A. Rubino // *J. Phys. Ocean*. 2000. V. 30. P. 2172–2185.
  28. **Рувинская, Е.А.** Исследование структуры уединенных внутренних волн большой амплитуды в трехслойной жидкости / Е.А. Рувинская, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // *Вестник МГОУ, серия «Физика – математика»*. 2011. № 2. С. 61–74.
  29. **Paka, V.** Research and development of new instrumentation for studying mixing in the Baltic Sea / V. Paka [et al.] // *Book of Abstracts of 8<sup>th</sup> Baltic Sea Science Congress (22-26, August 2011, St. Petersburg, Russia)*. 2011. P. 118.
  30. **Гаврилова, Л.В.** Расчёт динамики течения малых озёр на примере озера Шира / Л.В. Гаврилова, Л.А. Компаниец // *Вычислительные технологии*. 1999. Т.4 № 6. P. 58–67.
  31. **Семин, С.В.** Моделирование двумерных и трехмерных бароклинных возмущений в стратифицированных бассейнах методами полнонелинейной численной модели // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. – Нижний Новгород. 2011. №3(90). С. 51 – 62.
  32. **Marshall J.** Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling / J. Marshall [et al.] // *J. Geophysical Res*. 1997. V. 102(C3). № 37. P. 5753 – 5766.
  33. **Adcroft A.** Numerical Algorithms for use in a Dynamical Model of the Ocean // PhD thesis. Imperial College .London, 1995. 116 p.
  34. **Boegman, L.** Three-dimensional simulation of NLIW generation, propagation and breaking in Cayuga Lake / L. Boegman, A. Dorostkar // *7th Int. Symp. on Stratified Flows*. 2011. P. 1 – 8.
  35. **Grisouard, N.** Numerical simulations of the local generation of internal solitary waves in the Bay of Biscay / N. Grisouard, C. Staquet // *Nonlin. Processes Geophys*. 2010. V. 17. P. 575 – 584.
  36. **Adcroft, J.** MITgcm User Manual / J. Adcroft [et al.] // MIT Department of EAPS. 2011. P. 464.
  37. **Fofonoff, P.** Algorithms for computation of fundamental properties of seawater / P. Fofonoff, Jr. R. Millard // *Unesco Technical Papers in Marine Science* 44. 1983. P. 54.

*Дата поступления  
в редакцию 02.05.2012*

**S.V. Semin<sup>1</sup>, O.E. Kurkina<sup>2,1</sup>, A.A. Kurkin<sup>1</sup>, A.R. Giniyatullin**

## **NUMERICAL MODELING OF DYNAMICS OF A STRATIFIED LAKE**

The Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev<sup>1</sup>,  
National Investigate University Higher School of Economics<sup>2</sup>

**Purpose:** Numerical modeling of internal baroclinic disturbances of different shapes in a model lake with variable depth, analysis of velocity field of wave-induced current, especially in the near-bed layer.

**Approach:** The study is carried out with the use of numerical full nonlinear nonhydrostatic model for stratified fluid.

**Findings:** The full nonlinear numerical modeling of internal wave dynamics in a stratified lake is carried out. The calculated distributions of near-bed velocities are analyzed; the significance of 3D effects for the velocity fields is emphasized; the regions of maximal (where internal waves are the main driving factor for sediment resuspension and erosion processes on the bed) and minimal velocities are marked out.

**Originality:** The results are new and can have practical application for many applied problems, especially ecological and economical, concerned with the processes of propagation of natural and anthropogenic pollutions in natural basins and the investigation of water quality, as well as with influence upon engineering structures and sediment transport.

*Key words:* numerical modeling, full nonlinear nonhydrostatic model, internal waves.

УДК 519.63, 536.46

Д.А. Масленников, Л.Ю. Катаева, И.Е. Белоцерковская

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОЖАРАХ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено численное моделирование распространения излучения на основе нескольких моделей. Выполнена аналитическая оценка диффузионного приближения излучения, а также анализ излучения от точечного источника на основе метода Рунге. Проведён сравнительный анализ динамики лесного пожара при использовании различных моделей излучения. Сделана оценка запаздывания распространения излучения для предложенного авторами диффузионного приближением в зависимости от параметров вычислительной сетки и оптических свойств среды.

*Ключевые слова:* радиационный теплоперенос, лесные пожары, диффузионная модель излучения, численное моделирование.

**Введение**

Для эффективной борьбы с пожарами необходимо понимать их поведение на различных этапах развития, с учётом характера процессов, протекающих в ходе пожара. Для моделирования данного явления используются модели различной степени подробности. Полуэмпирические модели [1, 2] позволяют моделировать пожар с достаточной для оперативного прогнозирования скоростью, но не всегда достаточно точно. Физические модели [3, 4] слабее подвержены данному недостатку. Они основываются на физических законах, хотя и с некоторыми упрощениями, такими как группирование химико-физических процессов, пренебрежение зависимостью процесса от вертикальной координаты, постоянная скорость ветра, приближённые модели излучения.

Процессы выделения тепловой энергии в результате процессов горения, поглощения в ходе процесса сушки, а также переноса путём конвекции, кондукции и излучения характеризуют динамику лесных пожаров и являются наиболее важными. Как известно, [5] радиационный теплоперенос преобладает над конвективным уже при температуре 400 К. Однако моделирование излучения является более сложной задачей, вследствие того, что лучистая энергия от нагретой поверхности распространяется на расстояние нескольких метров, при этом конвективный и диффузионный теплообмен может иметь место только в непосредственной близости от нагретой среды.

**Анализ существующих моделей излучения**

Существуют различные подходы к моделированию излучения. Наиболее простой заключается в использовании априорной модели для формы факела пламени, с параметрами, зависящими от фактической реализации динамики пожара, например, в работе [6] рассматривается цилиндрическая форма факела пламени. Такой подход обеспечивает низкие вычислительные затраты на моделирование излучения, но при этом игнорирует фактическую форму факела пламени, которая может существенно деформироваться под действием неоднородного рельефа. Подобные модели излучения целесообразно использовать при рассмотрении динамики пожара в горизонтальной плоскости.

Другой подход при моделировании излучения основан на внесении различных упрощений в закон распространения излучения [7–8]. Так, в работе [7] интенсивность переноса излучения представляется в виде двух первых членов соответствующих рядов по сферическим функциям, а в работе [8] получена зависимость для интегральной степени черноты

слоя. С другой стороны модель излучения также может быть упрощена путём представления излучения как диффузионного процесса [9], скорость которого пропорциональна кубу температуры. Такой способ учёта излучения, будем называть локально-диффузионной моделью излучения. Уравнение сохранения энергии, учитывающее данную модель, имеет следующую форму:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left( \left( \sum_{i=1}^3 \rho_i \Phi_i c_{pi} + \rho_5 c_{p5} \right) T \right)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_5 c_{p5} U T)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_5 c_{p5} W T)}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( (\lambda_t + \sigma k_s T^3) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\lambda_t + \sigma k_s T^3) \frac{\partial T}{\partial y} \right) - q_2 R_2 + q_3 R_3 + q_5 R_5, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $c_{p5}, \rho_5$  – удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля газовой фазы;  $q_i, R_i$  – удельная теплота и массовая скорость реакций ( $i=2$  – испарения влаги,  $i=3$  – горения конденсированных продуктов пиролиза,  $i=5$  – горения летучих продуктов пиролиза);  $\rho_i, \Phi_i$  – плотность и объёмные доли ( $i=1$  – сухое органическое вещество РГМ,  $i=2$  – влага,  $i=3$  – конденсированные продукты пиролиза);  $T$  – температура среды;  $\lambda_t$  – коэффициенты динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии соответственно;  $C_\alpha$  – массовые концентрации компонентов газовой фазы ( $\alpha=1$  – кислород,  $\alpha=2$  – горючие компоненты продукта пиролиза,  $\alpha=3$  – инертные компоненты газовой фазы, не реагирующие компоненты продукта пиролиза и водяного пара);  $U, W$  – проекции скорости по осям  $x, z$  соответственно;  $k_s$  – спектральный коэффициент поглощения;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

При использовании такого подхода дальность распространения излучения ограничивается расстоянием, равным размером шага расчётной сетки. Таким образом, погрешность, вносимая данным способом моделирования излучения, будет расти при измельчении сетки, но при использовании достаточно грубой сетки, влияние описанного недостатка на динамику пожара становится достаточно слабым.

Более полно излучение моделируется при помощи дифференциальной модели [3].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left( \left( \sum_{i=1}^3 \rho_i \Phi_i c_{pi} + \rho_5 c_{p5} \right) T \right)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_5 c_{p5} U T)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_5 c_{p5} W T)}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) - q_2 R_2 + q_3 R_3 + q_5 R_5 + k_s (c U_R - 4 \sigma T_s^4) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial y} \right) - k_s (c U_R - 4 \sigma T_s^4) = 0, \quad (3)$$

где  $U_R$  – плотность потока излучения;  $k_\Sigma$  – коэффициент ослабления;  $c$  – скорость света.

Физический смысл уравнения (3) заключается в мгновенном распространении излучения, что является обоснованным с учётом соотношения скорости света, масштабов пространства и времени, в которых рассматривается процесс. Согласно [10], основным источником погрешности данной модели является неточность коэффициента ослабления и спектрального коэффициента поглощения для конкретной среды.

Хотя описанная модель позволяет рассчитывать распространение лучистой энергии с достаточно высокой точностью, она требует большого объёма вычислений в связи с необходимостью использования итерационного процесса на каждом временном шаге. Таким образом, выбор модели сводится к компромиссу между количеством вычислений и точностью результата моделирования.

### Модификация дифференциальной модели излучения и анализ её свойств

Авторами предлагается диффузионное приближение, получаемое путём дополнения уравнения (3) фиктивной диффузией следующим образом:

$$v \frac{\partial U_R}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial y} \right) - k_s (cU_R - 4\sigma T^4), \quad (4)$$

где  $v$  – величина обратно пропорциональная скорости диффузии.

При  $v \rightarrow 0$  решение уравнения (4) сходится к решению уравнения (3). Однако с ростом  $v$  увеличивается время запаздывания распространения лучистой энергии. Погрешность от использования искусственной диффузии, как было показано в уравнении (4), ограничивается запаздыванием распространения лучистой энергии, тогда как её пространственное распространение остаётся практически неизменным.

Ввиду линейности уравнений (3) и (4), излучение от источника любой конфигурации сводится к суперпозиции излучений точечных источников. Используя этот факт, можно исследовать влияние диффузионного приближения на излучение точечного источника при нулевых начальных условиях без учёта граничных условий. Действие мгновенной точечной вспышки эквивалентно начальному условию в виде дельта функции, поэтому рассмотрим задачу Коши в следующей форме:

$$\frac{\partial U_R}{\partial t} = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial U_R}{\partial y} \right) \right) - \left( \frac{3k_\Sigma k_s}{v} \right) U_R. \quad (5)$$

$$U_R(t=0, x, y) = \delta(0, x, y). \quad (6)$$

Решение поставленной задачи Коши будем искать в виде:

$$U_R(x, y, t) = W(x, y, t) \exp \left( - \frac{3k_\Sigma k_s}{v} t \right), \quad (7)$$

что приводит к уравнению

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right), \quad (8)$$

и его решению:

$$W(x, y, t) = \frac{v}{4\pi t} \exp \left( - v \frac{x^2 + y^2}{4t} \right), \quad (9)$$

подтверждающему консервативность уравнения, то есть  $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W dx dy = \text{const}$

Из уравнения (2) видно, что  $k_s c U_R$  – мощность нагрева среды за счёт потока лучистой энергии – пропорциональна его величине, тогда как из дифференциальной модели излучения (3), также как из её диффузионного приближения (4) следует, что поглощение лучистой энергии средой пропорционально его величине. Таким образом, в задаче Коши (5)–(6) суммарный поток излучения по всей рассматриваемой плоскости на любой момент  $t_0 > 0$ , пропорционален энергии, в распространении которой имела место задержка на время не меньшее чем  $t_0$ , долю которой можно найти с помощью следующего соотношения:

$$D(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_R(x, y, t) dx dy \left( \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_R(x, y, 0) dx dy \right)^{-1}. \quad (10)$$

Учитывая (7) и консервативность уравнения (8), выражающуюся соотношением вида  $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W dx dy = \text{const}$ , путём несложных преобразований получим:

$$D(t) = \exp\left(-\frac{3k_{\Sigma}k_s}{\nu}t\right) \quad (11)$$

Таким образом, для минимизации задержки в распространении излучения следует выбирать минимальное  $\nu$ . Авторы предлагают находить его значение на основе критерия устойчивости по Куранту использованной явной схемы:

$$\tilde{U}_{Ri,j} = U_{Ri,j} + \Delta t \frac{U_{Ri-1,j} - 4U_{Ri,j} + U_{Ri+1,j} + U_{Ri,j-1} + U_{Ri,j+1}}{\nu \Delta x^2} - 3k_{\Sigma}k_s \left( U_{Ri,j} - 4\frac{\sigma T_{i,j}^4}{c} \right) \frac{\Delta t}{\nu}, \quad (12)$$

где тильда относится к переменным, определяемым на следующем шаге по времени. Критерий устойчивости позволяет использовать следующее соотношение для определения коэффициента фиктивной диффузии

$$\nu = \frac{5\Delta t}{\Delta x^2}. \quad (13)$$

При моделировании лесного пожара использовались следующие значения величин, влияющих на запаздывание распространения излучения  $k_{\Sigma} = 0.05$ ,  $k_s = 0.6$ ,  $\Delta x = 1$ ,  $\Delta t = 0.0005$ . В табл. 1 показана доля лучистой энергии, в распространении которой имела место задержка на заданное время.

Таблица 1

Задержка в распространении лучистой энергии, в зависимости от времени

Время от момента вспышки	0,05	0,1	0,15	0,25	0,35
Доля запаздывающей лучистой энергии	0,165	0,027	0,0045	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$3,372 \cdot 10^{-6}$

Из данных, показанных в табл. 1, следует, что диффузионное приближение даёт приемлемую, в рамках масштабов рассматриваемых задач, задержку при определённых ранее параметрах.

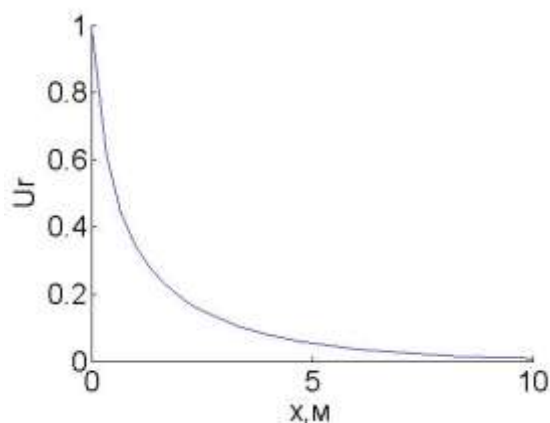
Для оценки погрешности схемы (12) был использован метод сгущающихся сеток, основанный на измельчении сетки в три раза по каждой из координат. Погрешность рассчитывается как модуль разности между значением искомой функции каждой ячейки исходной сетки и среднеарифметическим значением на соответствующем ей блоке 3\*3 ячеек измельчённой сетки. Число шагов по времени выбиралось таким образом, чтобы можно было пренебречь эффектами запаздывания, с учётом соотношений (11), (13). В качестве оцениваемой величины использовалась сумма плотности потока излучения по времени в каждой точке расчётной области  $E_{i,j} = \sum_n U_{Ri,j}^n$ , которая с точностью до постоянного множителя соответствует

плотности энергии от вспышки. Здесь нижние индексы  $i, j$  соответствуют дискретным пространственным координатам, верхний индекс  $n$  соответствует дискретному времени. Для оценки доли тепловой энергии, распространившейся не в ту ячейку расчётной области,

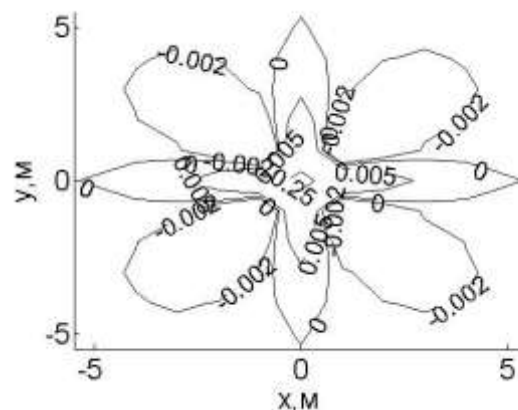
используется соотношение  $\delta E = \frac{1}{2} \left( \frac{\sum_{i,j} \Delta E_{i,j}}{\sum_{i,j} E_{i,j}} \right)$ , где  $\Delta E_{i,j}$  – погрешность, определённая по методу сгущающихся сеток в блоке. В проведённом численном эксперименте она составляет 1,4%, причём ячейка, в которой произошла вспышка, вносит наибольший вклад в погрешность.

На рис. 1 представлена зависимость относительной мощности излучения от расстояния до источника. За единицу принята мощность излучения в самом источнике. На рис. 2 по-

казана оценка погрешности, определяющая вклад каждого блока в общую погрешность, и выражающаяся с соотношением  $\varepsilon_{i,j} = \left( \Delta E_{i,j} \right) / \left( \sum_{i,j} \left| \Delta E_{i,j} \right| \right)$ .



**Рис. 1.** Зависимость относительной мощности излучения от расстояния до источника



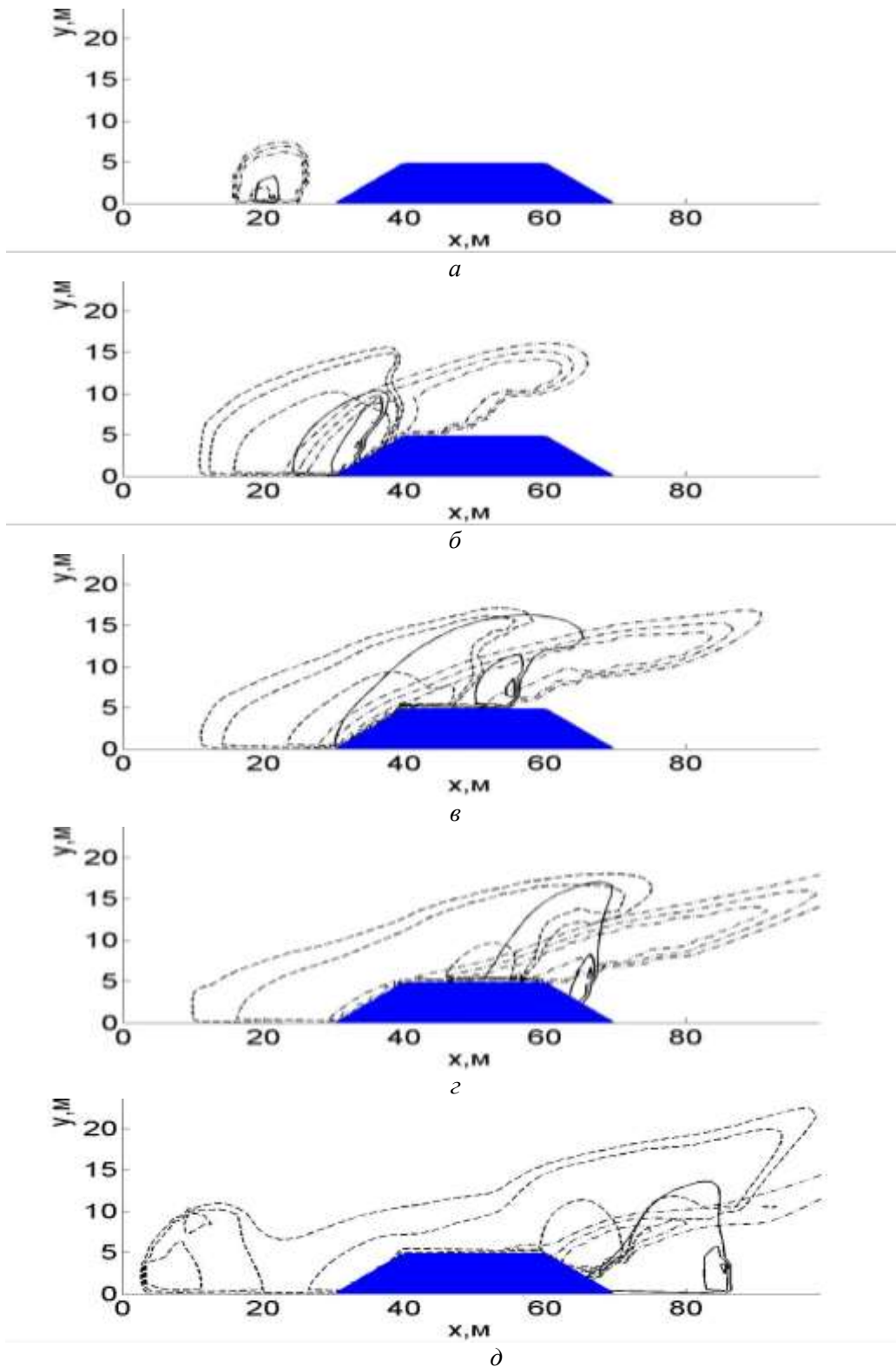
**Рис. 2.** Распределение вклада блоков в общую погрешность энергии излучения

Исследование структуры погрешности показывает, что наибольшая погрешность имеет место в начале отсчёта, также наблюдается преобладание погрешности в диагональных направлениях. Неточность распространения под углом к направлению сетки описана в работе [11], однако погрешность данного эффекта в приемлемых пределах.

Проведённый анализ тестовых примеров диффузионного приближения и его численной реализации показал, что используемая модификация модели излучения, а также численная схема, реализующая её, обеспечивают приемлемый уровень точности.

### Оценка эффективности диффузионного приближения

Для оценки характера влияния модели излучения было проведено сравнение результатов расчётов, выполненных на основе модели локальной диффузии, модели диффузионного приближения, а также без учёта излучения. Источником пожара являлся очаг, размером в одну ячейку расчётной области (квадрат со стороной 1 м), в котором в течении 5 с поддерживается температура 1200 К. На рис. 3 показано распределения температур для этих моделей на моменты времени 3, 10, 14, 18, 25 с соответственно. Для каждой модели построены изолинии на уровнях 1000 К, 1500 К, 2000 К, для каждой модели используется свой тип линии. Внешняя изолиния для каждой модели соответствует температуре 1000 К, а внутренние, если они есть, соответствуют температурам 1500 К и 2000 К в порядке вложенности. Из рис. 3, а видно, что отсутствие излучения в модели приводит к быстрому распространению изначального источника в первые секунды пожара за счёт конвекции. На рис. 3, б показано, что отсутствие излучения приводит к более быстрому распространению пожара. При использовании диффузионной модели скорость распространения и температура во фронте пожара ниже, что связано с более адекватным расчётом оттока тепла посредством излучения. На рис. 3, в наблюдается формирование заднего фронта пожара при использовании локально-диффузионной модели. Такого эффекта не наблюдается, если не учитывать излучение. При использовании более точной модели, задний фронт также не формируется вследствие распространения излучения на расстоянии нескольких ячеек, в отличие от модели локальной диффузии. На рис. 3, г-д видно, что быстрее всего пожар распространяется по подветренному слою при моделировании диффузионного приближения, а наиболее медленно в отсутствие теплопереноса посредством излучения. Описанный эффект связан с формированием вихря с подветренной стороны, направляющего потоки нагретого газа вверх.



**Рис. 3. Распределение температур в различные моменты времени. Сплошная линия соответствует диффузионному приближению, пунктирная – локально-диффузионной модели, штриховая - модели, не учитывающей излучение:**

*а* соответствует моменту времени  $t=3$  с; *б* -  $t=10$  с; *в* -  $t=14$  с; *г* -  $t=18$  с; *д* -  $t=25$  с

На рис. 4 показаны контуры температуры и мощности излучения. Пунктирные линии соответствуют температуре, причем внутренний контур построен для 1000 К, внешний для



700 К. Сплошная линия показывает контур мощности излучения, цифрами указаны значения этой величины в  $\text{кВт}/\text{м}^2$ . В момент  $T=3$  с, мощность излучения достаточно низкая в связи с сравнительно низкой температурой источника и его малых размеров. Видно, что контур излучения несколько отличается от контура температуры. В момент  $T=14$  с, можно видеть, что в центральной части фронта пожара достигается большая мощность излучения, чем по краям, несмотря на сопоставимый уровень температур.

Данные отличия обусловлены особенностью диффузионной модели излучения, учитывающей распространение лучистой энергии от нагретой поверхности на расстояние.

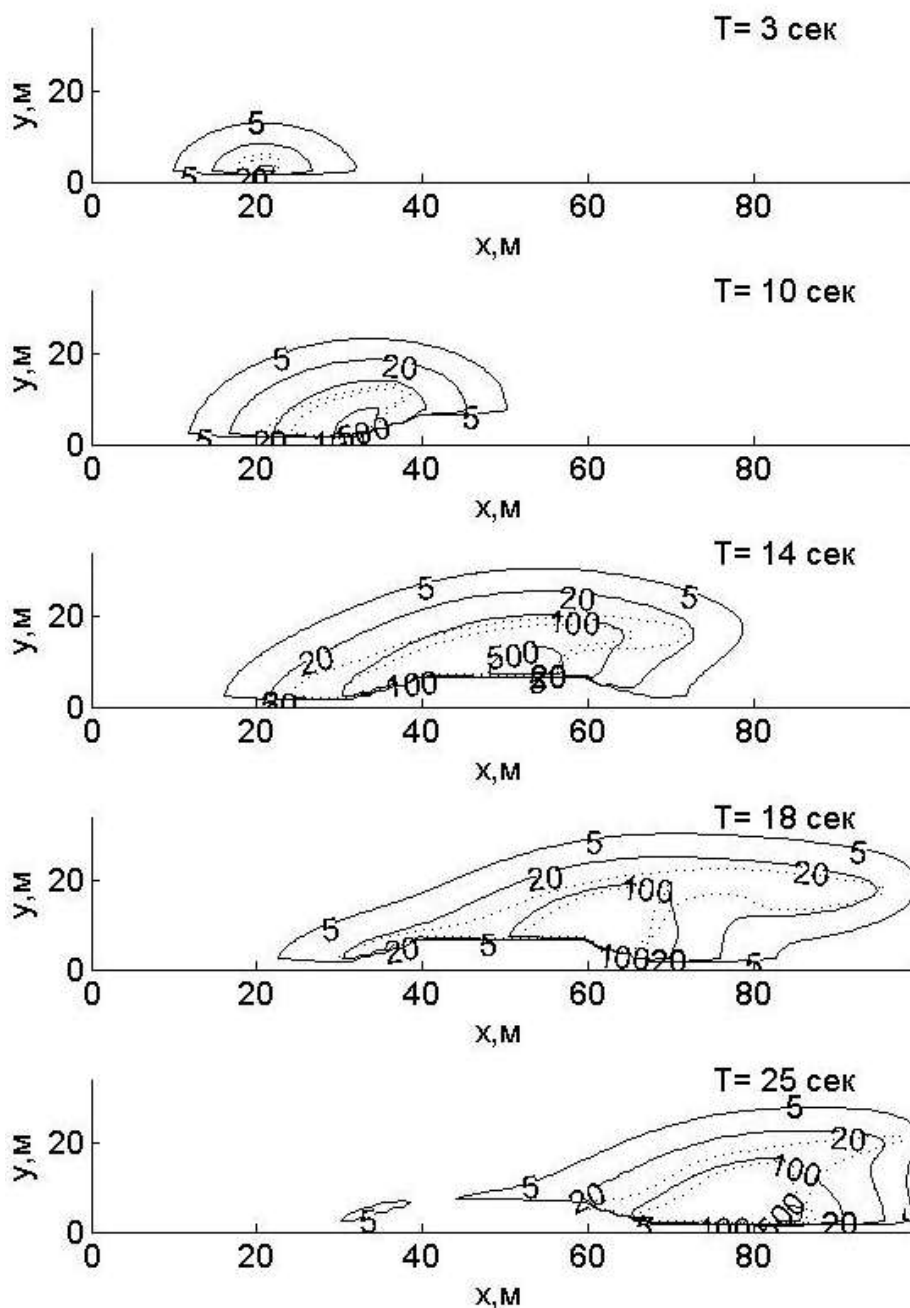
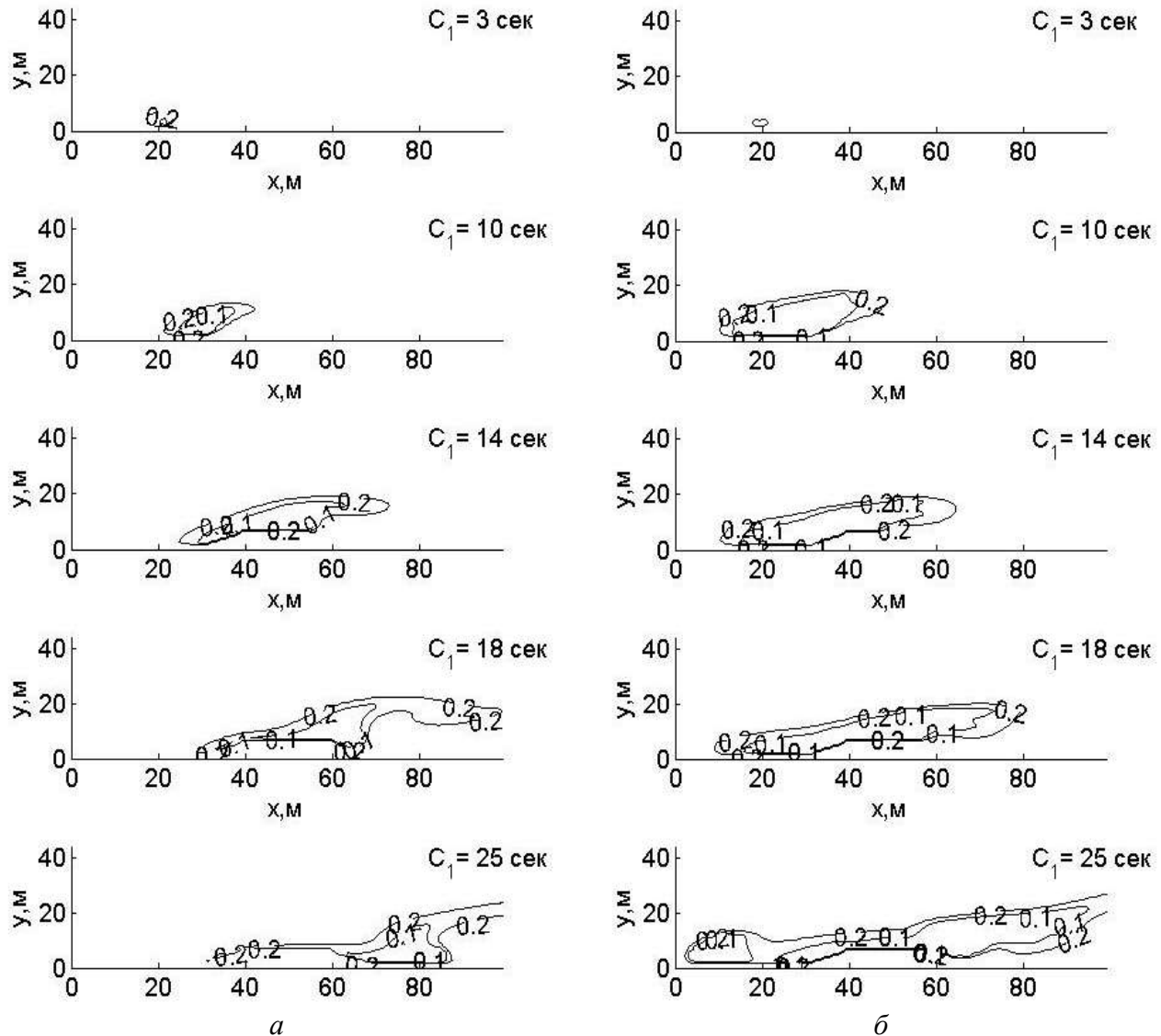


Рис. 4. Распределение мощности излучения ( $\text{кВт}/\text{м}^2$ ) (сплошная линия) и температур (пунктирная линия) на различные моменты времени

На рис. 5 показано распределение кислорода для диффузионного приближения и локально-диффузионной модели. Локально-диффузионная модель показывает несколько большее поглощение кислорода за счёт меньшего оттока тепла.

На рис. 6 показано распределение концентраций инертных газов для диффузионного приближения (а) и локально-диффузионной модели (б).



**Рис. 5. Распределение концентраций кислорода на различные моменты времени:**  
а – диффузионного приближения; б – локально-диффузионной модели

Согласно рис. 5 расчёты по локально-диффузионной модели показывают большую ширину фронта при большей высоте области низкой концентрации. Начиная с 18 с, на рис. 5, б, видно формирование фронта пожара с тыльной стороны, связанное с меньшим рассеиванием тепла за счёт излучения.

Форма линий уровня концентрации инертных газов на рис. 6 с незначительными отличиями повторяет форму линий уровня концентрации кислорода. Это связано с низкой концентрацией летучих продуктов пиролиза, и как следствие близкой к единице суммарной концентрации кислорода и инертных газов.

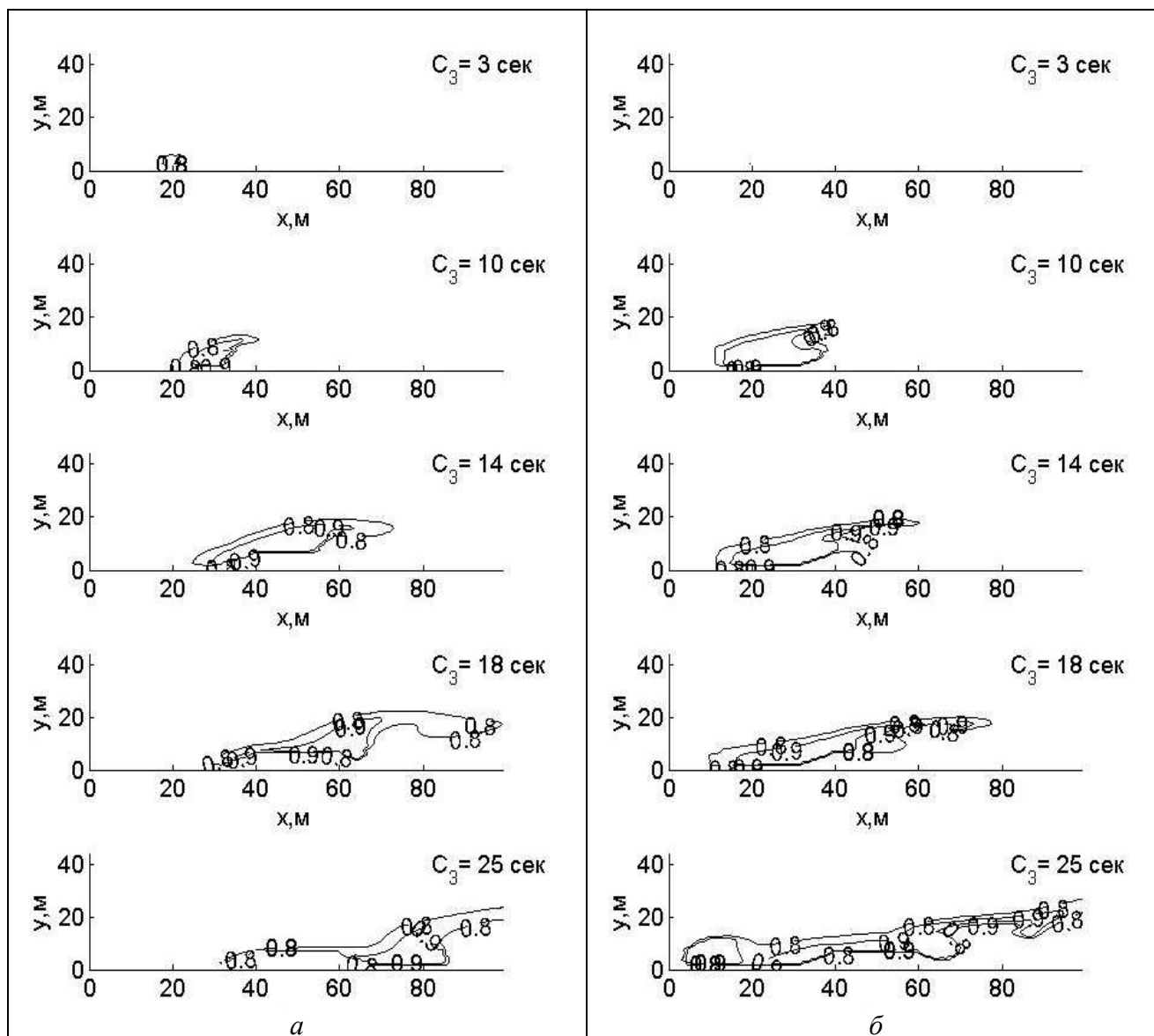


Рис. 6. Распределение концентраций инертных газов на различные моменты времени: а – диффузионного приближения; б – локально-диффузионной модели

### Выводы

В настоящей работе дан количественный и качественный сравнительный анализ влияния учёта излучения на основе различных моделей на динамику лесного пожара. Показано, что диффузионное приближение, предложенное авторами, с одной стороны качественно и количественно правильно отражает процесс распространения излучения от точечного источника, а с другой стороны, по сравнению с полной моделью, является более простым в реализации и во много раз менее затратным по времени счёта. С другой стороны, согласно проведённым численным экспериментам, вычислительные затраты на расчёт плотности потока излучения и его влияния на температуру среды составляют 7% от затрат на расчёт всей модели.

В работе продемонстрировано применение диффузионного приближения для решения задачи о динамике пожара. На основе полученных результатов численных расчётов можно утверждать, что выбор модели оказывает существенное влияние на основные характеристики динамики пожара, такие как скорость его распространения, ширина и направление движения фронта пожара. Численные расчёты показали недостатки локально-диффузионной модели и преимущества диффузионного приближения.

Найдена зависимость погрешности, вносимой диффузионным приближением, от со-

отношения временного и пространственных шагов и оптических свойств среды. Анализ погрешности диффузионного приближения показал его эффективность при достаточно мелком шаге по времени.

### Библиографический список

1. **Richards, G.D.** The properties of elliptical wildfire growth for time dependent fuel and meteorological conditions. Comb. Sci. Tech. 92:145-171, 1993.
2. **Finney, M.A.** FARSITE: Fire Area Simulator model development and evaluation. Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1998.
3. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. Новосибирск: Наука, 1992.
4. **Clark, T.L.** Description of a coupled atmosphere-re model / T.L. Clark, J. Coen, and D. Latham // International Journal of Wildland Fire, 13(1):4963. 2004.
5. К.Ю. Литвинцев. Совершенствование методов моделирования лучистого теплообмена и оптических свойств среды применительно к высокотемпературным технологическим процессам и пожарам: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2012.
6. **Клейменов, А.В.** Моделирование характерных зон пожаротушения для произвольного направления факела пламени / А.В. Клейменов, А.В. Глухов // Успехи современного естествознания. 2010. № 9 С. 211–212.
7. **Пилюгин, Н.Н.** Динамика ионизированного излучающего газа / Н.Н. Пилюгин, Г.А. Тирский М.: Изд.-во МГУ, 1989. – 312 с.
8. **Перминов, В.А.** Математическое моделирование возникновения верховых и массовых пожаров: дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2010.
9. **Русин, С.П.** Об использовании диффузионного приближения переноса тепла излучением при экспериментальном исследовании частично прозрачных пористых сред / С.П. Русин, В.Э. Пелецкий // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2007. №3.
10. **Зигель, Р.** Теплообмен излучением: [пер. с англ.] / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М.: Мир, 1975. – 934 с.
11. **Рыжов, А.М.** Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях. Методические рекомендации / А.М. Рыжов. – М.: ВНИИПО, 2003.

Дата поступления  
в редакцию 20.05.2012

**D.A. Maslennikov, L.Yu. Kataeva, I.E. Belotserkovskaya**

### FEATURES OF RADIATION OF FOREST FIRES

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** Radiation determines considerable part of total heat propagation during forest fires; however propagation of radiant energy is not limited to close proximity to heated areas in contrast to the convection and diffusion. Existing models of radiation are not enough precision or have high computational complexity. The purpose is designing radiation model, providing adequate results with acceptable computational time.

**Design/methodology/approach:** The main idea of this paper is modification of the model of radiation propagation by adding fictive term, which shown in the left part of equation (1)

$$v \frac{\partial U_R}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial y} \right) - k_s (cU_R - 4\sigma T^4) \quad (1)$$

As a result of adding fictive component, the iterative process is no longer necessary for equation (1) solution, but delay in radiation propagation was introduced. This model was named as diffusion approximation of radiation.

**Findings:** Analytical evaluation of the diffusion approximation of radiation performed, as well as analysis of the radiation from a point source. Dynamics of forest fire in depends of chosen radiation model done. The estimation of the delay spread of radiation based on the parameters of grid computing, and optical properties of the area obtained.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further researches in the modeling of radiation.

**Originality/value:** Obtained radiation model is suitable to physical models of forest fires, those include hydrodynamics.

*Key words:* radiative heat transfer, forest fires, radiation diffusion model, numerical simulation.

## ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 004.75

Д.В. Жевнерчук, А.В. Аристов, Ю.В. Герасимов

### СЕМАНТИЧЕСКАЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ В ДИАЛОГОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Чайковский технологический институт,  
Ижевский государственный технический университет, г. Чайковский

Определен технический базис, гарантирующий интероперабельность информационных систем на уровне данных и команд. Разработана методика взаимодействия информационных систем, функционирующих на разных программно-аппаратных платформах. Предложен метод эмуляции оператора для обеспечения взаимодействия информационных систем с низкой степенью интероперабельности. Предложена архитектура системы трансляции пользовательских управляющих сигналов между информационными системами.

*Ключевые слова:* интероперабельность, открытая система, интерфейс, архитектура, кроссплатформенность.

#### Введение

Сегодня технология открытых систем (ТОС) [1, 2, 3, 4] является перспективным и приоритетным государственным направлением научных исследований. Открытая система должна удовлетворять свойствам *расширяемости, переносимости приложений и данных, масштабируемости и интероперабельности*. Кроме того, она должна быть построена на основе совокупности ряда информационных стандартов, доступ к которым не ограничен техническими, юридическими или иными механизмами. Одной из ключевых характеристик открытых систем является интероперабельность, которая определяет способность систем взаимодействовать с другими системами [2]. В работе [5, 6] предлагаются методы, которые позволяют оценить возможность включения программного компонента в открытую систему. Во многих работах отмечается, что для включения программного компонента в открытую систему требуется привести его к стандартизованному профилю [3]. Это может потребовать модификации программного кода системы.

#### Постановка задачи

Объектом исследования является среда интеграции информационных систем, функционирование которой происходит в двух режимах:

- приложение как диалоговый сервис;
- приложение как знание-ориентированный сервис.

Во всех режимах среда должна быть расширяема по произвольным информационным системам, чтобы обеспечить передачу данных и управляющих сигналов между клиентскими и серверными платформами.

В первом случае к ядру среды дополнительно предъявляется требование передачи интерфейса пользователя клиентской платформе. Для универсальных инструментов должны быть доступны диалоговые средства, предоставляющие доступ ко всем функциям системы. Если на основе приложения развернут узкоспециализированный инструмент, то среда предоставляет некоторое подмножество диалоговых средств.

Во втором случае интегрированные в среду приложения используются для решения конкретной задачи посредством агентных систем, запрашивающих у пользователя или других систем постановку задачи в формализованном виде.

Таким образом, требуется разработать методику построения мультирежимных сред интеграции информационных систем, а также найти технический базис для обеспечения интероперабельности программных компонент на уровне обмена данными.

### Методика

Среда интеграции информационных систем должна обладать свойствами открытой системы и должна уметь подключать информационные системы независимо от их степени интероперабельности. На рис. 1 представлена архитектура серверной части.

Для решения проблемы **кроссплатформенности** предлагается использовать уровень виртуальных машин [8]. Благодаря этому появляется возможность обрабатывать на одной аппаратной платформе информационные системы, функционирующие на основе API разных операционных систем. Вся вычислительная нагрузка ложится на серверный программно-аппаратный комплекс, именуемый далее вычислительное облако. Таким образом, облако представляет собой совокупность произвольных аппаратных платформ с установленными виртуальными машинами и / или операционными системами. Такое решение обеспечит функционирование произвольной информационной системы. Для взаимодействия информационных систем с внешней средой (другие ИС и пользователи) существует множество интерфейсов:

- интерфейсы объектов (распределенных объектов);
- сервисы;
- java интерфейсы;
- интерфейсы импорта/экспорта;
- пользовательские интерфейсы.

На рис. 1 представлена схема многоуровневой архитектуры серверной части.

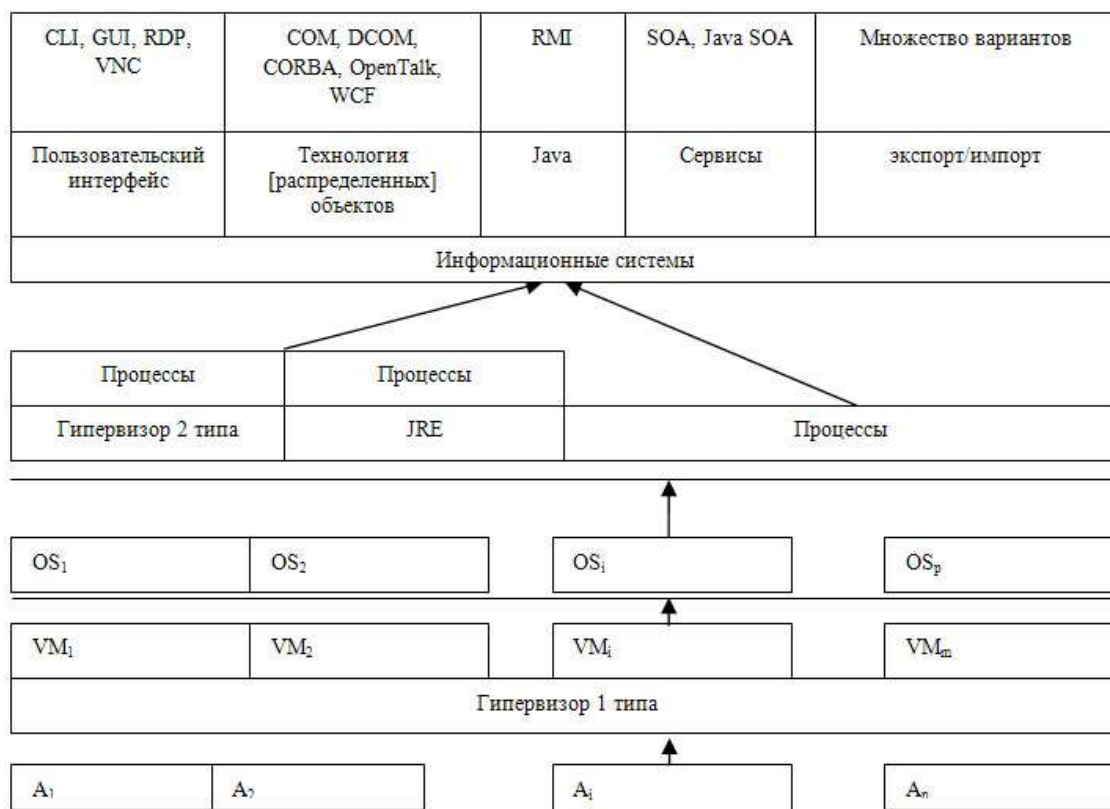


Рис. 1. Многоуровневая архитектура серверной части

API современных операционных систем, расширяющие функциональность библиотеки и утилиты позволяют автоматизировать взаимодействие с ИС, используя любой из перечисленных интерфейсов, включая интерфейс пользователя (user interface, UI).

Клиентские системы в рамках концепции рассматриваются, как тонкие и ультратонкие и предназначены для приема от пользователя данных и управляющих сигналов, передачи их на сервер, а также для вывода возвращаемых с сервера результатов. Общая структура клиентской платформы представлена на рис 2.



Рис. 2. Архитектура клиентской части

Пользовательский интерфейс на клиенте может быть построен с применением Web технологий, языков и средств разработки высокого уровня, API операционных систем. Отдельно на рисунке выделен подход, при котором UI транслируется в форме потокового видео в плеер, поддерживающий функции ввода данных и управляющих сигналов.

Для решения проблемы переносимости интерфейса пользователя предлагается использовать механизм виртуализации (рис. 3). Суть его состоит в следующем. Для всех серверных информационных систем создается формальное описание поддерживаемых интерфейсов, включая пользовательские, Web-сервисы, объектные/компонентные и др. Строится карта графического интерфейса пользователя, которая содержит информацию о дереве форм и элементах форм. Дополнительно формируется список доступных сервисов, которые могут быть запрошены пользователем. С каждым сервисом связываются интерфейсы и подмножество элементов GUI, необходимое для взаимодействия с пользователем.

При запросе сервиса информационной системы, включающего определенную группу функций, вместе с ним передается список поддерживаемых технологий построения GUI. По коду сервиса сервер определяет дерево и состав форм, формирует пользовательский интерфейс либо в потоковом видео, либо в коде, поддерживаемом клиентом. Для обеспечения переносимости пользовательского интерфейса были разработаны:

- 1) формат описания интерфейсов (карта интерфейсов) подключаемой информационной системы;
- 2) формат описания средств построения/воспроизведения UI клиентской платформы;
- 3) формат описания функциональных сервисов (карта сервисов) произвольных информационных систем;
- 4) протоколы обмена списками поддерживаемых технологий.

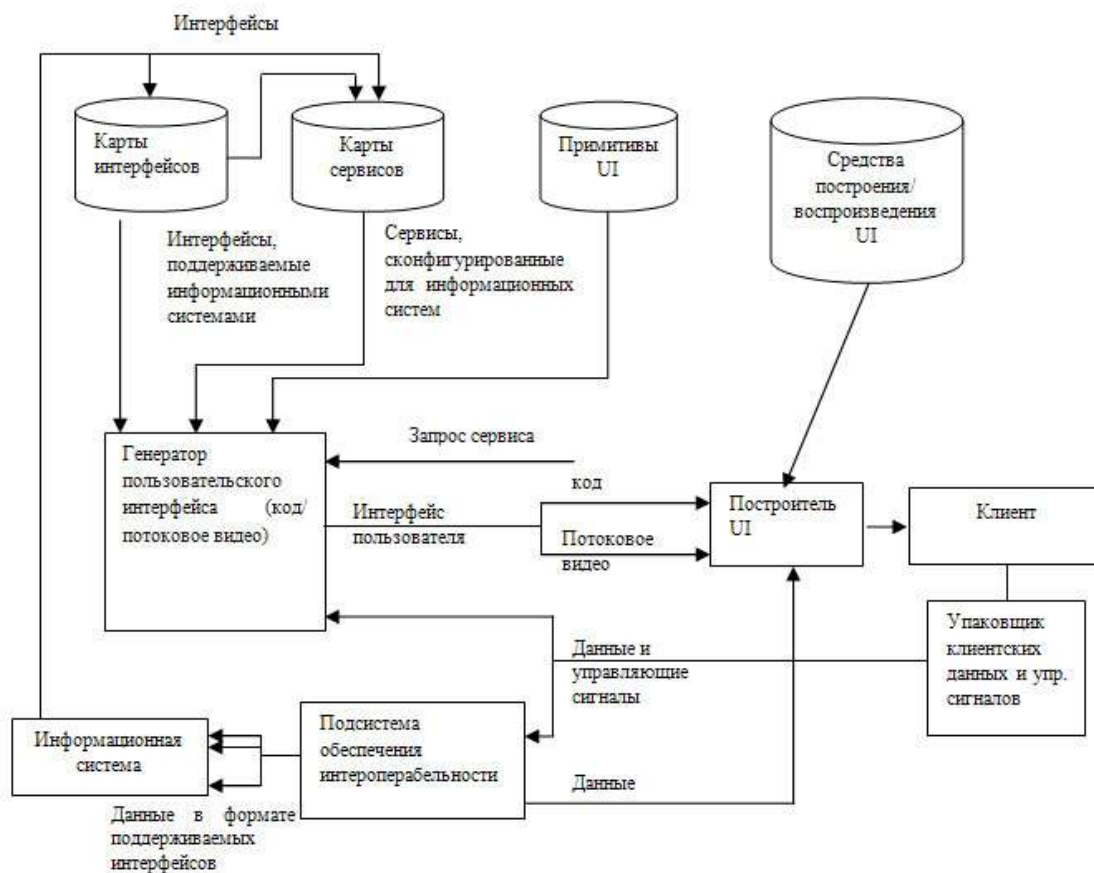


Рис. 3. Схема взаимодействия клиента и сервера

В указанных форматах содержатся:

- описание типа пользовательского интерфейса, идентификационных данных об управляющих компонентах, объектах, структурах;
- система команд с указанием формальных параметров;
- функции информационной системы с указанием формальных параметров, а также результата выполнения;
- типы управляющих сигналов, интерпретируемых информационной системой;
- связи типа «сигнал-команда-функция».

Для приема запросов к функциональным сервисам от пользователей и преобразования их к формату поддерживаемых интерфейсов предлагается использовать сервер интероперабельности.

Для обеспечения взаимодействия с программами, у которых существует только пользовательский интерфейс, используется режим эмуляции оператора. Под эмуляцией оператора будем понимать способ взаимодействия с информационной системой посредством элементов графического пользовательского интерфейса или с помощью интерфейса командной строки. Доступ к элементам GUI осуществляется с помощью API ОС, либо специализированных библиотек и утилит. Функционирующие в облаке информационные системы можно рассматривать в качестве ресурса или комплексного сервиса, запрашиваемого клиентами посредством серверов интероперабельности.

Для использования информационных систем в качестве знание-ориентированного сервиса (ресурса) введена дополнительная категория программного обеспечения – агент. Также были разработаны два интерфейса взаимодействия программного обеспечения: агент-ресурс и агент-оператор. Интерфейс агент-ресурс определяет правила обмена информацией и управляющими сигналами между системами эмуляции оператора и ресурсами. Ресурс



осуществляет обработку задания пользователя только по запросу агента. Интерфейс агент-оператор определяет правила приема и анализа пользовательского задания.

Итак, агент должен выполнять следующие функции:

- 1) прием и анализ пользовательского задания;
- 2) поиск ресурса, который обладает необходимыми сервисами;
- 3) передача параметров задачи ресурсу;
- 4) прием ответа от ресурса;
- 5) передача ответа пользователю.

В любом процессе решения задачи с применением программно-аппаратного обеспечения можно выделить три основные группы пользователей:

- пользователи-заказчики, которые осуществляют постановку задачи;
- пользователи-аналитики, которые определяют методы и средства решения задачи;
- пользователи-операторы, которые обладают знаниями и навыками владения инструментом, решают задачи и передают результат заказчикам.

Таким образом, агент представляет собой эмуляцию пользователя-аналитика и пользователя-оператора.

На рис. 4 приведена концептуальная схема знание-ориентированной сетевой среды. В общем случае пользователь передает запрос на естественном языке. Агент определяет тип задачи, формализует ее постановку. Для этого требуется создать базу знаний предметной области, позволяющую определить методы, с помощью которых может быть решена задача, определить программный ресурс, который содержит реализацию выбранных методов.

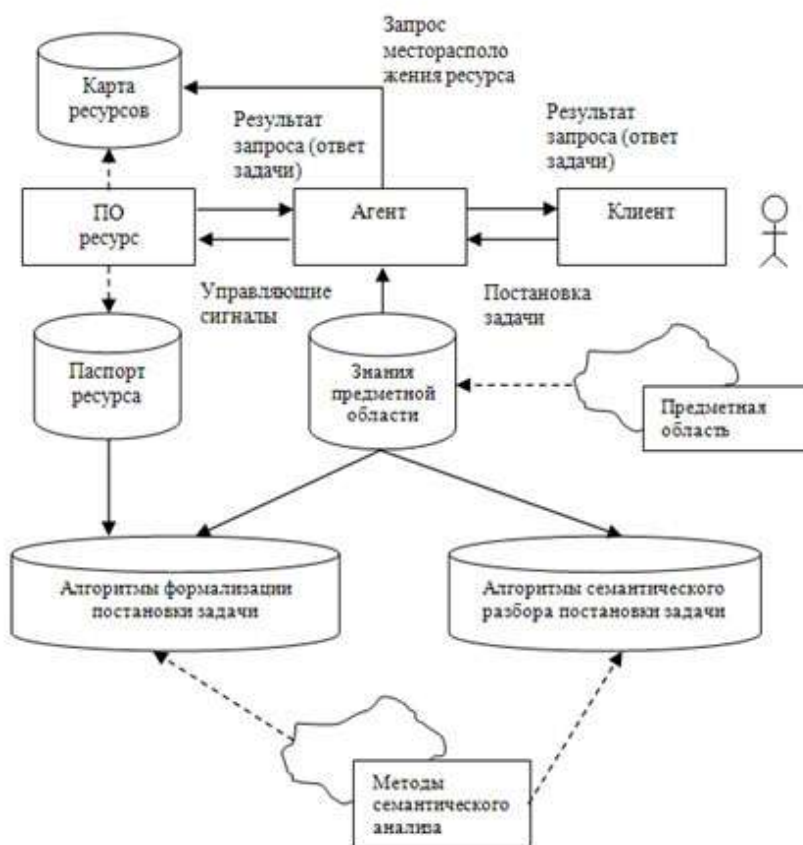


Рис. 4. Концептуальная схема знание-ориентированной сетевой среды

На основании запросов к базе знаний, происходит выбор алгоритмов семантического анализа запроса и его формализация. На следующем этапе определяется класс задачи и ресурс, который может выступить в качестве инструмента для решения этой задачи. Паспорт

ресурса позволяет определить последовательность управляющих сигналов, которую должен сгенерировать агент и передать ресурсу. В процессе определения типа задачи так же выбирается алгоритм семантического разбора постановки задачи, формулируемой пользователем-заказчиком в текстовом виде. Для выбора алгоритма база знаний содержит информацию о связи между типом задачи и алгоритмами анализа семантики текста в контексте пользовательского задания. Кроме того, выбирается алгоритм представления запроса в формате, наиболее удобном для выработки последовательности управляющих сигналов к ресурсу. Пунктирными стрелками изображены связи типа “предметная область-онтология”, а сплошными – связи типа “клиент знаний - онтология”.

### Экспериментальная часть

Предложенная методика была использована при построении тестовой среды доступа к информационным системам. Сервер 2 CPU 2,5 ГГц 4х; кэш (L1/ L2/ L3) – 128 Кб х4/ 512 Кб х4/ 6Мб; RAM 24 Гб, 4 HDD SAS 146Гб 2.; EIDE DVD+/-RW, на котором настроена виртуальная машина Oracle VirtualBox 4 и установлены 2 операционные системы: Windows XP и Mandriva Linux. На сервере выполняются приложения, поддерживающие интерфейс командной строки или графический интерфейс пользователя. Для каждого приложения создается xml файл с описанием интерфейсов. Отдельно реализована группа модулей для формирования клиентских скриптов, выполняющих построение GUI в браузере. В качестве основы построения GUI использовались javascript (jQuery) и HTML. Для связи с приложениями на сервере был настроен Apache 2.0 и реализованы модули на PHP 5.0. Передача запросов на сервер выполняется в асинхронном режиме с помощью ajax-запросов. Язык PHP поддерживает доступ к интерфейсу командной строки Windows и winAPI. WinAPI используется для доступа к оконным элементам приложений, управления активными окнами, эмуляции клавиатуры и мыши. Для управления приложениями в среде Linux был использован интерфейс командной строки, а также утилита xDoTool [9] для управления окнами и эмуляции клавиатуры и мыши. Серверные php модули получают от браузерных клиентов идентификатор сервиса, который описан в xml файлах. На основании идентификатора определяется запрашиваемое приложение, поддерживаемые интерфейсы и состав окон GUI. Формируемый клиентский скрипт содержит код виджетов, а также ajax запросов для передачи параметров на сервер. Серверные php модули формируют команды CLI, поддерживаемые приложениями и выполняют их. Если приложение поддерживает GUI, то на основе передаваемых параметров эмулируются клики мыши и нажатия клавиш в окне приложения. Результаты, отображаемые в оконных элементах, считываются API или xDoTool, в зависимости от того, какая ОС обрабатывает приложение, затем упаковываются в ajax ответ, возвращаются запрашившему клиентскому модулю и выводятся в браузер.

### Вывод

Предложенная методика может быть применена для:

- интеграции разнородных программно-аппаратных информационных систем в единое вычислительное облако;
- построения сервис-ориентированной интерактивной среды;
- построения знание-ориентированной среды, с четким делением приложений на ресурсы и агенты.

Был построен тестовый вариант среды интеграции информационных систем, тестирование среды проводилось для ОС Windows XP (процесс калькулятор) и Mandriva Linux (процесс SpeedCrunch). На клиентских системах использовались те же операционные системы. Для управления калькулятором в качестве интерфейса использовался GUI и API WIN32, с помощью которого осуществляется доступ к оконным элементам, а также эмуляция управляющих сигналов. Для управления SpeedCrunch использовалась утилита xDoTool.

**Библиографический список**

1. ISO/IEC TR 10000-1: 1995 (final text, June 1995), Information technology - Framework and taxonomy of International Standardized Profiles - Part 1: General Principles and Documentation Framework.
2. **Батоврин, В.К.** Обеспечение интероперабельности – основная тенденция в развитии открытых систем / В.К. Батоврин, Ю.В. Гуляев, А.Я. Олейников // Информационные технологии и вычислительные системы. 5/2009.
3. **Сухомлин, В.А.** Методологический базис открытых систем // Открытые системы. 1996. N 4.
4. Технология открытых систем / под ред. А.Я. Олейникова. – М.: Янус-К, 2004.
5. **Батоврин, В.К.** Способ количественной оценки интероперабельности / В.К. Батоврин, А.С. Королев // Информационные технологии и вычислительные системы. 5/2009.
6. **Петров, А.Б.** Методика сравнительной оценки интероперабельности информационных систем / А.Б. Петров, Н.А. Стариковская // Информационные технологии и вычислительные системы. 5/2009.
7. **Журавлев, Е.Е.** Интероперабельность в e-science / Е.Е. Журавлев, А.Я. Олейников // Информационные технологии и вычислительные системы. 5/2009.
8. **Гуляев, А.К.** Виртуальные машины: несколько компьютеров в одном / А.К. Гуляев. – Питер, 2006. – 224 с.
9. **Sissel, J.** XDoTool - fake keyboard/mouse input, window management, and more, 2011 г. , <http://www.semicomplete.com/projects/xdotool/#id270150>

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2012*

**D.V. Zhevnerchuk, A.V. Aristov, Y.V. Gerasimov**

**SEMANTIC INTEROPERABILITY OF DIALOG INFORMATION SYSTEMS**

**Subject:** The subject of this study is the exchange of information between the programs that operate on different platforms and with different interfaces.

**Purpose:** The aim is to create architecture and methods for constructing of the software with the properties of openness.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on virtualization of computer resources, methodology of open systems in computer science and design of network software systems.

**Findings:** The results can be applied to the design and development of scalable, extensible integrated information systems whose components operate on different hardware and software platforms.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research semantic interoperability of software with different interfaces.

**Originality/value:** All applications are integrated into the system can operate in a dialog or knowledge-oriented modes and represent the services documented with cross-platform data formats. The study defined technical basis to ensure interoperability of information systems at the level of data and commands, developed a method for the interaction of information systems that operate on different hardware and software platforms. Method is emulating an operator to ensure the interoperability of information systems with a low degree of interoperability.

*Key words:* interoperability, open systems, interface, architecture, cross-platform.

УДК 004.932

А.А. Полетаев, О.Н. Корелин

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АРИФМЕТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ JPEG2000 НА ОСНОВЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЯМИ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТОВ И ПАРАМЕТРАМИ R-D КРИВЫХ

Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены особенности алгоритма сжатия изображений JPEG2000, исследованы возможности оптимизации алгоритма, исследованы зависимости длины R-D кривых для разных блоков вейвлет-коэффициентов на примере отдельно взятого класса изображений.

*Ключевые слова:* арифметическое кодирование, битовые плоскости, подбор длины R-D кривых, вейвлет-коэффициенты, JPEG2000.

В области цифровой обработки изображений, специализирующейся на уменьшении объема данных, наряду с классическими алгоритмами значительное применение получили алгоритмы, основанные на стандартах JPEG и JPEG2000. Достоинством таких алгоритмов является высокая степень сжатия, которая достигается за счет представления данных в форме, наиболее удобной для сжатия. Применение таких алгоритмов позволяет значительно сократить затраты на хранение информации и время, требуемое на ее передачу по сети.

Более современные алгоритмы стандарта JPEG2000 обладают определенными достоинствами перед нашедшими широкое распространение на практике алгоритмами JPEG – они более приспособлены для быстрой передачи данных по сети, обеспечивают лучшее качество сжатия при той же степени уменьшения размера данных, применяя в своей основе вейвлет-преобразование данных. Важной чертой алгоритмов является то, что они реализуют сжатие с потерями, так что отбрасывается часть незначительных для восприятия человека данных, значительно определяющая размер изображения. Варьирование количества отбрасываемых данных позволяет достичь практически любой требуемой степени сжатия.

Несмотря на все преимущества алгоритмов стандарта JPEG2000, сжатие требует значительных затрат времени, которые приходится на стадию преобразования данных и стадию кодирования преобразованных данных. Поскольку стадия кодирования отнимает большую часть времени, особый интерес представляет найти способы уменьшения временных затрат на нее.

Стандарт JPEG2000 нацелен как на обеспечение максимально многогранного и в то же время оптимального подхода к сжатию изображений, так и на обеспечение больших возможностей, скорости и удобства передачи данных по сети. Важной особенностью стандарта является возможность масштабирования потока данных по разрешению и по качеству [1]. Масштабируемость позволяет разбить процесс декодирования потока данных на этапы, каждый из которых будет улучшать качество или увеличивать разрешение промежуточного изображения. Это свойство является очень полезным при передаче данных по сети, поскольку пользователь может получить и увидеть промежуточный результат при передаче только части данных. Второй важной особенностью стандарта является то, что он может эффективно кодировать как изображения с индексированными цветами, так и с непрерывными спектром, обеспечивая, в зависимости от выбора, сжатие с потерями или без потерь.

Процесс кодирования состоит из пяти последовательных этапов, представленных на рис. 1.

Сдвиг яркости в паре с этапом преобразования цветового пространства позволяют повысить степень сжатия исходного изображения. В ходе этапа преобразования цветового пространства осуществляется переход к пространству YCbCr, наиболее подходящему для вейвлет-преобразования.



Рис. 1. Схема процесса кодирования

Данные, полученные в результате вейвлет-преобразования, обладают значительно меньшей энтропией и потому поддаются сжатию гораздо лучше. Дискретное вейвлет-преобразование изображения представляет из себя двумерную фильтрацию данных при помощи низкочастотного (L-фильтр) и высокочастотного фильтров (H-фильтр). К столбцам и строкам изображения при фильтрации применяются четыре варианта сочетаний низкочастотного и высокочастотного фильтров, что дает в итоге четыре блока вейвлет-коэффициентов (LL, LH, HL, HH), размер каждого из которых в два раза меньше исходного набора данных<sup>1</sup> (рис. 2). Блок данных, полученный в результате низкочастотной фильтрации и строк и столбцов, представляет сглаженную копию исходного изображения, уменьшенную вдвое (блок LL). Следующий уровень преобразования всегда применяется к этому блоку. Три остальных блока (LH, HL, HH) содержат детали, которые дополняют уменьшенную копию изображения при ее восстановлении. Такими деталями могут быть, например, резкие перепады яркости на исходном изображении. На основании того факта, что выбранные для преобразования вейвлеты выделяют определенные детали, для кодирования можно подобрать наиболее эффективный кодер. Аналогично для определенного класса изображений можно подобрать наилучший набор вейвлетов. Все этапы, следующие за этапом вейвлет-преобразования, реализуют сжатие и кодирование данных. Поскольку на них приходится большая часть времени, то они и являются наиболее интересными с точки зрения оптимизации скорости сжатия и степени сжатия.

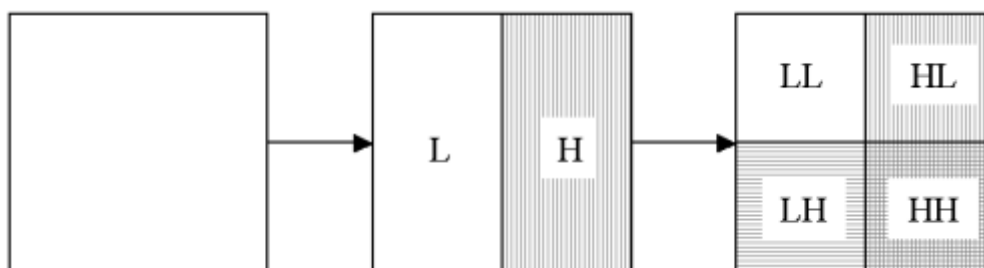


Рис. 2. Блоки коэффициентов, получаемые в ходе вейвлет-преобразования

При “сжатии с потерями” может быть задействован этап квантования вейвлет-коэффициентов. Этот этап позволяет увеличить степень сжатия за счет уменьшения точности данных. Известны две реализации, различающиеся по сложности: скалярное квантование и квантование с решетчатым кодированием. Скалярное квантование более быстрое, заключается в усечении битов младших разрядов, но обладает определенным недостатком – наличием мертвой зоны [3]. Если шаг квантования равен  $\Delta$ , а само значение  $q$  после квантования коэффициента  $s$ , вычисляется по формуле:

$$q = \text{sign}(s) * \left\lfloor \frac{|s|}{\Delta} \right\rfloor$$

<sup>1</sup> После фильтрации частотный диапазон сокращается в два раза.

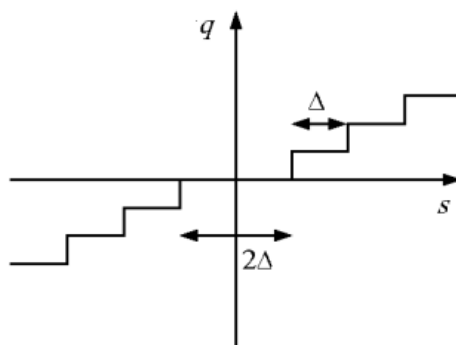


Рис. 3. Скалярное квантование

График значений можно представить аналогично рис. 3. На графике явно видно, что вблизи нуля зона квантования в два раза больше шага  $\Delta$ . Этого недостатка лишен метод квантования с решетчатым кодированием, но он более сложен и требует больше вычислительных затрат. Следует отметить, что для корректной реализации квантования потребуется ввести соответствующий шаг обратного преобразования в декодере, что потребует дополнительных временных затрат. Таким образом, трудно сделать однозначный выбор между соотношением скорости к качеству сжатия на данном этапе.

Этап энтропийного или арифметического кодирования наиболее значим с точки зрения уменьшения длины кода. Метод кодирования определяет скорость всего процесса, а также соотношение качества изображения к степени сжатия. На данном этапе формируется выходной поток закодированных коэффициентов, который является составляющей частью конечного потока данных. Коэффициенты вейвлет-преобразования кодируются арифметическим методом, с помощью вероятностной модели. Вероятностная модель строится на наличии связей, которые существуют не только между соседними коэффициентами одного уровня преобразования, но и между коэффициентами различных уровней.

Процесс кодирования оказывает основное влияние на масштабируемость конечного потока данных. Зависимости между данными, вносимые на этом этапе, могут свести на нет любые возможности масштабирования данных, включая масштабируемость по разрешению и масштабируемость по качеству [4]. Следует отметить, что данные, полученные в ходе более ранних этапов стандарта, обладают максимальной способностью к масштабированию. Следовательно, выбор метода арифметического кодирования зависит не только от требований к скорости, качеству и степени сжатия, но и от необходимых требований к масштабируемости потока данных.

Для сжатия по стандарту JPEG2000 используется несколько методов арифметического кодирования, среди которых можно выделить кодирование этажей битов и кодирование с применением нуль-деревьев. Оба метода обеспечивают наилучшие свойства масштабируемости и степени сжатия изображения, а также позволяют ввести области повышенного качества.

Принцип кодирования этажей битов состоит в построении ряда битовых плоскостей для группы вейвлет-коэффициентов. Для этого определяется разрядность максимального коэффициента  $N_{\max} = \text{ceil}(\log_2(C_{\max}))$ , где  $C_{\max}$  — значение максимального вейвлет-коэффициента. Количество битовых плоскостей равно значению  $N_{\max}$ . Для каждой битовой плоскости с номером  $n = [1..N_{\max}]$  записываются биты вейвлет-коэффициентов, соответствующие разряду  $n$ . Кроме этого, каждая битовая плоскость кодируется тремя блоками данных, которые формируются на одном из этапов кодирования: significant propagation, magnitude refinement, normalization pass. Они основаны на использовании зависимостей, поскольку большие и малые коэффициенты не перемешаны равномерно, а концентрируются в отдельных областях. Каждый из битов кодируется в ходе только одного этапа в соответствии с его вкладом, вносимым в значение коэффициентов. Отбросив блоки с наименьшими номерами, мы можем уменьшить количество градации данных, что эквивалентно квантованию.

Данный метод позволяет достичь масштабируемости по качеству и при декодировании. С учетом того, что на декодирование плоскости требуется определенное время, пользователь может задать требуемую степень качества декодирования, уменьшив количество восстанавливаемых битовых плоскостей и время вместе с количеством пересылаемых по каналу связи данных.

С другой стороны, есть возможность достичь лучшей степени сжатия, отбрасывая незначимые блоки данных в ходе кодирования. Данная идея реализована в алгоритме оптимизации длины кода. Задача данного алгоритма – найти для заданной степени сжатия наилучшее соотношение длины кода к качеству восстанавливаемого изображения. В кодируемом потоке данных определяются точки усечения, для которых составляется две оценки: величина уменьшения длины кода и величина ошибки, вносимой в изображение. При заданной степени сжатия задача сводится к определению наилучшего множества данных точек [3]. Есть несколько способов решения данной задачи, один из которых – применение R-D кривых (rate-distortion curves).

R-D кривые показывают отношение величины уменьшения среднеквадратической ошибки к количеству данных, вносимых точкой усечения. Для каждой точки определяются величины среднеквадратической ошибки –  $\Delta_{DIST}$  и длины кода  $\Delta_{RATE}$ . Отношение  $\Delta_{DIST}$  к  $\Delta_{RATE}$  дает характеристику оптимальности использования любой из точек усечения. На основании этой характеристики выбирается наилучшая точка усечения. Процесс выбора точки заключается в определении для всех частотных блоков количества блоков данных, суммарный размер которых удовлетворяет заданной степени сжатия, и имеет наименьшую среднеквадратическую ошибку. На практике выполняется поиск уровня  $L = \Delta_{DIST} / \Delta_{RATE}$ , общего для всех блоков вейвлет-коэффициентов, при котором достигается наилучшее соотношение качества к количеству кодируемой информации (рис. 4).

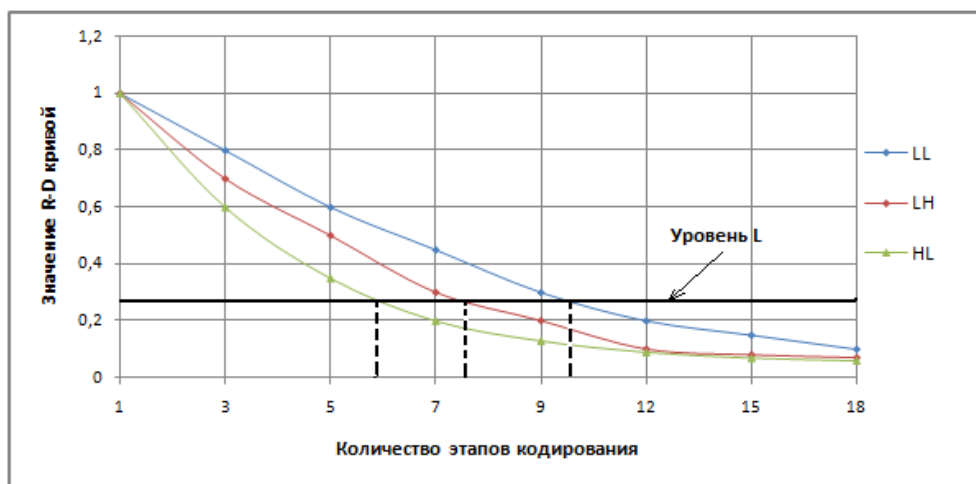


Рис. 4. Определение количества кодируемых этапов при помощи уровня L

Очевидно, что время и точность поиска определяется алгоритмом поиска уровня. В ходе исследования был выбран подход, предлагающий использование бинарного поиска уровня, который изображен на рис. 5. При таком подходе можно достигнуть меньшего времени поиска при большей точности.

Алгоритм определения точки усечения, описанный ранее, имеет недостаток – необходимость проведения всех этапов кодирования для каждой битовой плоскости перед началом поиска точки. С учетом того, что основная часть времени уходит на кодирование каждой битовой плоскости, представляет интерес критерий, по которому можно так подобрать точку усечения, чтобы был известен этап кодирования для каждого блока вейвлет-коэффициентов, на котором можно приостановить процесс. В ходе исследований [5] был найден подходящий критерий для определенного вида изображений при жестком задании степени сжатия и количества уровней вейвлет-преобразования. Тем не менее, опираясь на исследования и выво-

ды, сделанные в [5] и учитывая статистику, можно предположить, что есть некоторая зависимость между процентным соотношением размера блока вейвлет-коэффициентов LL, включенного в изображение, и размерами блоков вейвлет-коэффициентов в изображении, полученных на каждом уровне вейвлет-преобразования вне зависимости от степени сжатия. Следовательно, можно получить более универсальный критерий, который должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) подходить для одного или нескольких классов изображений;
- 2) его применимость не должна зависеть от варьирования степени сжатия;
- 3) его применимость не должна зависеть от размера изображения.

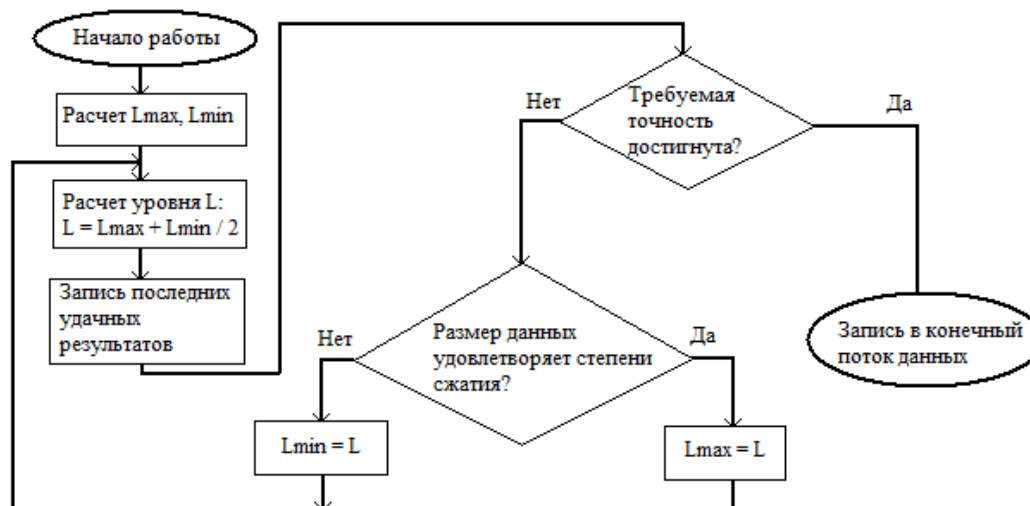


Рис. 5. Алгоритм бинарного поиска наилучшего значения уровня L

Для исследования был выбран класс текстовых изображений, являющийся одним из наиболее распространенных классов. Поскольку текстовые изображения имеют большое количество схожих деталей, было сделано предположение о том, что именно у них будут наиболее четко проявляться определенные сходства при кодировании данных. Исследование данных изображений является более наглядным, поскольку большинство из них черно-белые, а значит, они имеют только одну цветовую компоненту в пространстве YCbCr.

В ходе экспериментов были получены и проанализированы аналогично методике, предложенной в [5], графики R-D кривых для различных текстовых изображений, но для различных уровней фильтрации при помощи вейвлетов. На рис. 5 приведены типичные графики R-D кривых, а также графики увеличения длины кода, вносимого каждым блоком вейвлет-коэффициентов на различных этапах кодирования. Для графиков R-D кривых на оси абсцисс отмечено количество этапов кодирования для каждого из блоков вейвлет-коэффициентов (LL, HL, LH, HH), а по оси ординат отмечены значения величин  $\Delta_{DIST} / \Delta_{RATE}$ . Для графиков роста длины кода отмечены этапы кодирования и общая длина кода для каждого блока вейвлет-коэффициентов (LL, HL, LH, HH).

На графиках R-D кривых опущены этапы, не увеличивающие длину потока закодированных данных, так как они не несут полезной информации и всегда исключаются из процесса кодирования. Тем не менее, они отмечены на графиках увеличения длин кода для наглядности.

На графиках R-D кривых видно, что формы кривых соответствующих блоков вейвлет-коэффициентов схожи. Кроме того, заметны сходства расположения точек кривых для блоков LH, HL и HH относительно блока LL. Данный факт позволяет судить о том, что есть зависимости между коэффициентами LL и LH, HL, HH, которые могут быть использованы для определения окончательного количества этапов кодирования для каждого блока вейвлет-коэффициентов.



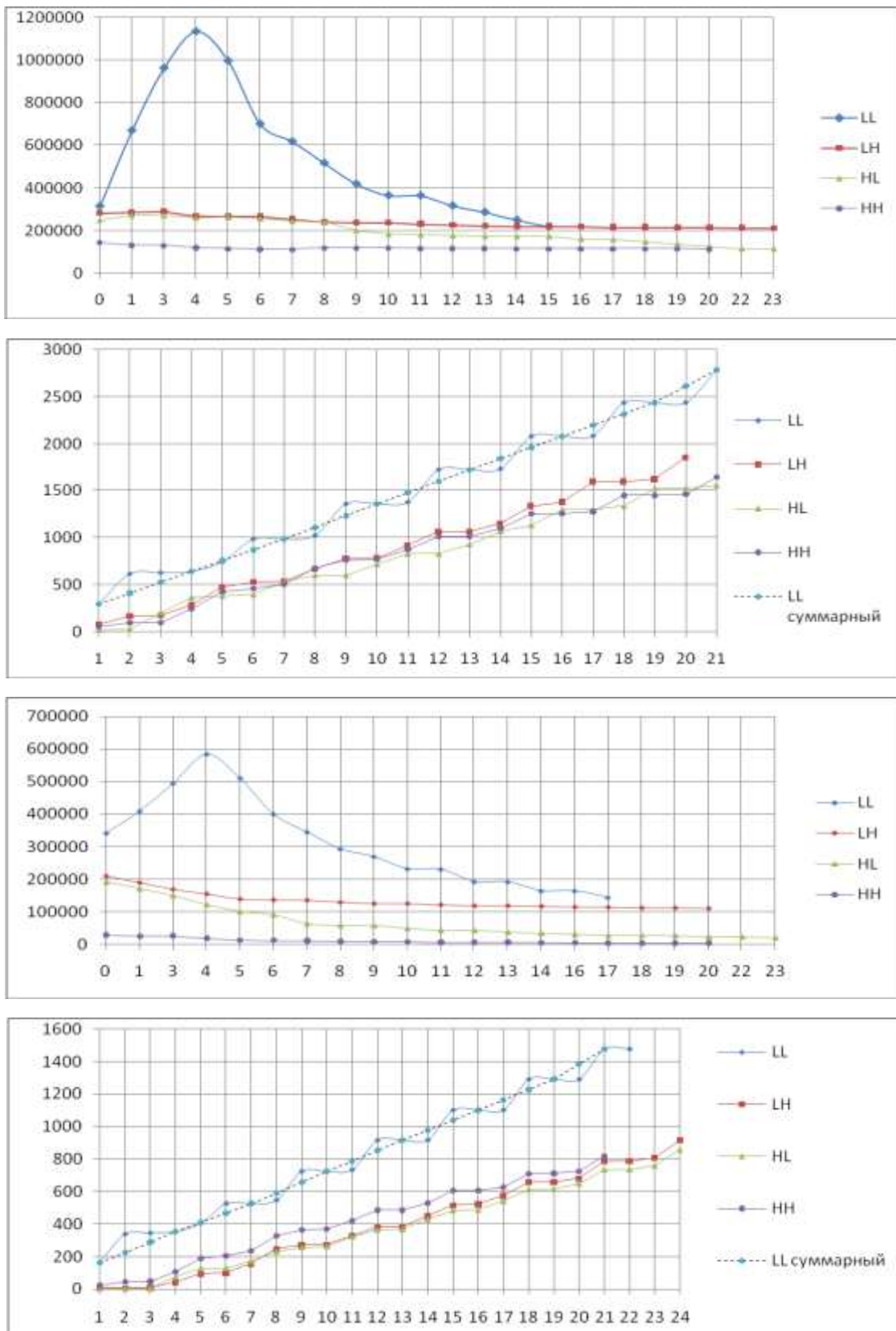


Рис. 6. Графики R-D кривых и длин кода для двух разных изображений текста

Еще одна особенность исследованных изображений показана на графиках длин кода для различного количества этапов. Увеличение длины происходит линейно, причем происходит постепенный переход функции увеличения длины кода от второго этапа к третьему.

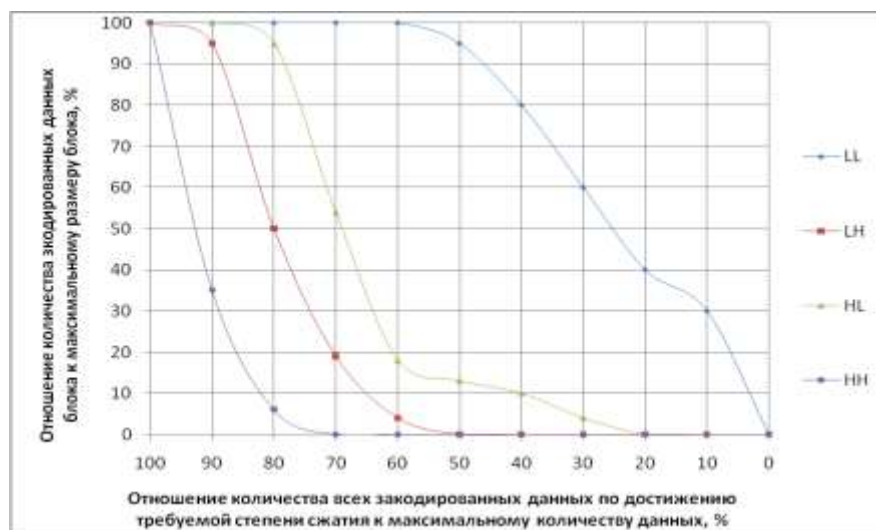
Кодирование каждой битовой плоскости происходит в три этапа (significant propaga-

tion, magnitude refinement, normalization pass), для иллюстрации общего увеличения длины кода каждой битовой плоскостью был введен еще один график “LL-суммарный”, на котором очень четко проявляется эффект линейности. Данная особенность позволяет при кодировании определить точку усечения в два шага:

- 1) грубая оценка длины кода, на которой определяется последняя кодируемая битовая плоскость;
- 2) более точная оценка, на которой для данной битовой плоскости определяется последний этап кодирования.

На основании полученных данных был проведен более точный анализ схожести расположения вейвлет-коэффициентов для изображений. Ряд испытаний с кодированием изображений с разностью степеней сжатия позволил составить усредненную функцию зависимости процентного количества данных блоков LL, LH, HL, HH в закодированном потоке от процента количества данных в конечном потоке по отношению к максимально возможному количеству данных (когда в поток полностью включены все блоки данных).

Данная функция зависимости очень хорошо иллюстрируется на следующем графике.



**Рис. 7. Функция зависимости количества закодированных данных каждого блока от общего количества закодированных данных**

С учетом того, что существует небольшой разброс данных, определяющий точность достижения заданной степени сжатия, был предложен следующий алгоритм поиска, который позволяет провести определение точки усечения в процессе кодирования, тем самым уменьшая его время. В алгоритме задействована особенность линейного увеличения длины кода при кодировании каждой битовой плоскости для предсказания максимального размера блока данных (суммарный размер с учетом кодирования всех битовых плоскостей). Для определения этой величины выполняется кодирование двух-трех битовых плоскостей каждого блока, а затем на основании размера каждой битовой плоскости определяется предполагаемый размер всего блока.

Алгоритм работает в два этапа. На первом этапе преимущественно кодируется блок LL, до тех пор, пока не достигнута требуемая степень сжатия. Параллельно каждому этапу кодирования блока LL кодируется такое количество этапов блоков LH, HL, HH, которое установлено приведенной ранее зависимостью относительно блока LL. Закодированные данные каждого блока записываются в отдельные потоки, которые в конце работы алгоритма объединяются в один. Если заданная степень сжатия не достигнута, а блок LL закодирован полностью, то алгоритм переходит на второй этап. Сначала определяется максимальный размер для каждого из оставшихся блоков на основе линейности увеличения длины данных, а затем кодирование продолжается уже относительно общего прироста длины данных для

всех блоков. Такой двухэтапный подход позволяет сократить время при определении максимальной длины данных, так как к концу кодирования блока LL обычно выполняется кодирование нескольких этапов для блоков LH, HL, HH, что позволяет практически сразу оценить максимальный размер этих блоков.

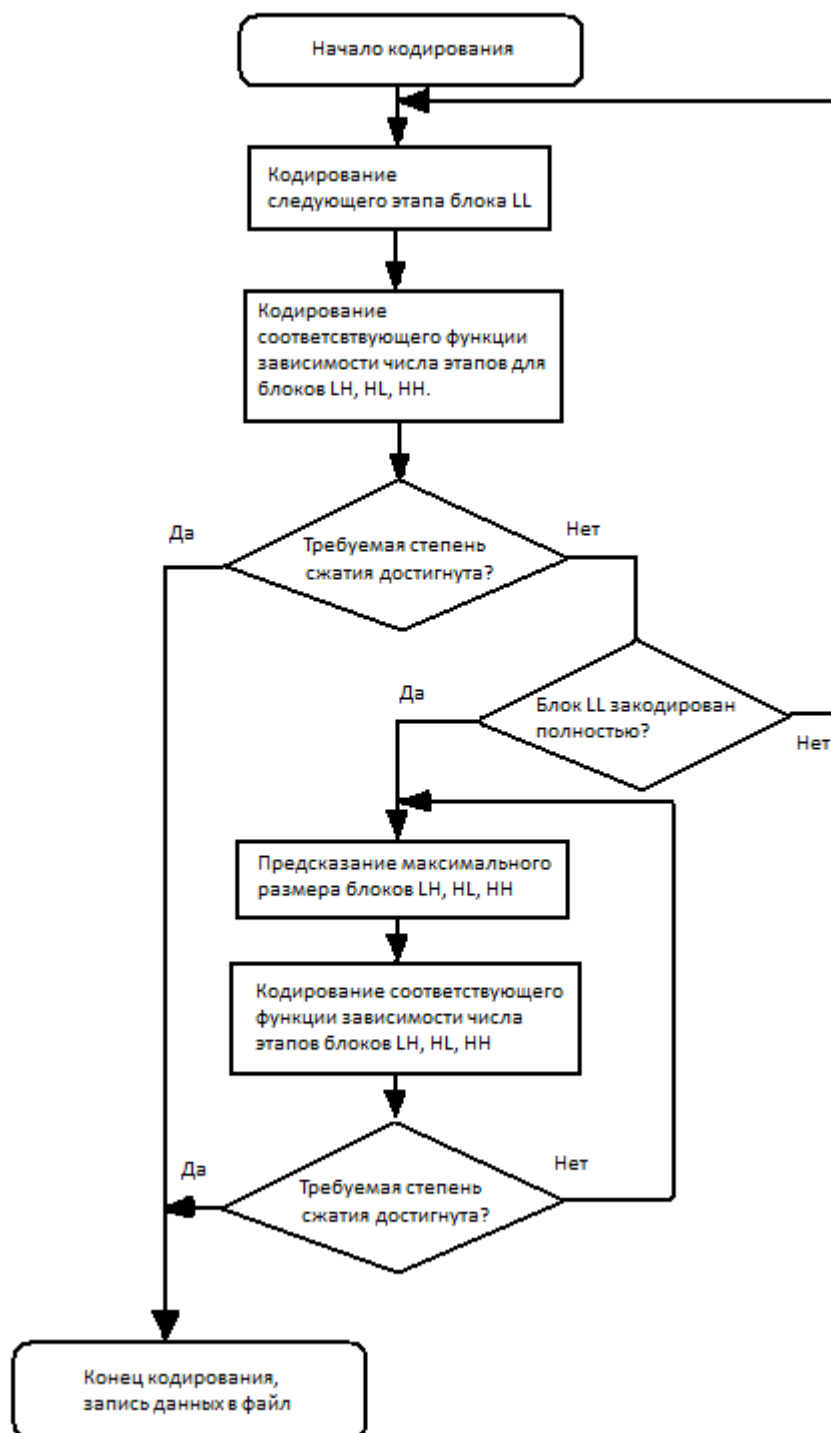


Рис. 8. Предложенный алгоритм кодирования

Данный алгоритм позволяет сократить время при кодировании на 5–10%. Преимуществом является то, что он учитывает и кодирует детали изображения: блоки LH, HL, HH именно в тех пропорциях, которые требуются для достижения хорошего качества при кодировании. Кроме того, алгоритм хорошо ведет себя и в нестандартных случаях, когда между вейвлет-коэффициентами отсутствуют зависимости, на которых построен предложенный ал-

горитм, но при этом незначительно снижается качество кодирования.

Можно сделать вывод о том, что между вейвлет-коэффициентами для определенных классов изображений, несомненно, существуют зависимости. Используя данные зависимости можно выдвинуть более совершенный подход к сжатию изображений. Предложенный алгоритм базируется на некоторых из них, и дает хорошие результаты, тем не менее, существует еще множество нерассмотренных аспектов, которые в значительной степени могли бы улучшить его эффективность.

Поскольку данный алгоритм предназначен для работы с классом текстовых изображений, то существует необходимость интеграции, а также разработки методов и способов классификации изображений. Кроме того, стандарт JPEG2000 позволяет выделить в изображении “области повышенного интереса”, которые должны быть сохранены при сжатии с максимально возможным качеством, вне зависимости от степени сжатия. Применение таких областей в совокупности с данным алгоритмом позволило бы сохранить в изображении детали, представляющие наибольший интерес.

#### Библиографический список

1. **Pennebaker, W.B.** The jpeg still image data compression standard / W.B. Pennebaker and J.L.Mitchell. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. – 638 с.
2. **Battiato, S.** A color reindexing algorithm for lossless compression of digital images / S. Battiato, G. Gallo, G. Impoco, and F. Stanco // SCCG '01 Proceedings of the 17th Spring conference on Computer graphics. 2001.
3. **Impoco, G.** JPEG2000 - A Short Tutorial / G. Impoco, Tech. Report, Visual Computing Lab. 2004.
4. **Taubman, D.** Embedded block coding in JPEG 2000 / D. Taubman, E.Ordentlich, M.Weinberg // ICIP00, page TA02.02. 2002.
5. **Сокол, А.В.** Оптимизация алгоритма сжатия изображений JPEG-2000 с помощью подбора длины R-D кривых // Исследовано в России. 2005. С. 625–634.

*Дата поступления  
в редакцию 06. 04.2012*

**A. Poletaev, O. Korelin**

#### ARITHMETIC CODING PROCESS OPTIMIZATION BASED ON CORRELATION BETWEEN WAVELET COEFFICIENTS MAGNITUDE AND PARAMETERS OF R-D CURVES FOR JPEG2000 COMPRESSION ALGORITHM

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

**Purpose:** The finding of reliable criterion for code run-length optimization problem is considered.

**Approach:** It is possible to make a preliminary decision to predict the optimal truncation points set for the optimization problem at the beginning of the arithmetic coding process. The correlation between wavelet coefficients and R-D parameters has a determined statistical distribution within the class of images. Thus, the analysis of the R-D curves at each coding stage allows beneficial manipulating and adjusting the set of truncation points to achieve the closest to the optimal value of compression rate/quality ratio.

**Findings:** As a result of study, the suitable criterion found and appropriate coding process guiding algorithm developed for text image class. Moreover, the work shows the basic approach for finding the beneficial algorithm for solving the optimization problem for any other image class.

**Research implications:** The present study provides a starting-point for further research on the optimization problem. For example, the neuron network could be involved for making more precise prediction of optimal truncation point set.

**Value:** Moreover, it is worth stressing that the criterion does not depend on demanded compression rate, image dimensions and input image quality. Additionally, this criterion is reliable within the defined image class. These factors make it suitable for using in automated text image processing systems.

*Key words:* arithmetic coding, bit-planes, R-D curves code run-length optimization, wavelet coefficients, JPEG2000.

УДК 681.3.513

Е.А. Никулин

## МАТРИЧНЫЕ МЕТОДЫ РЕКЛАСТЕРИЗАЦИИ СОСТАВНЫХ ОБЪЕКТОВ БЕЗЬЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Тема работы:** разработка алгоритмов редактирования узловых сетей, на которых строятся составные линии и поверхности Безье, произвольно изменяющих число и размерности кластеров без изменения формы сегментов.

**Цель работы:** повышение гибкости редактирования составных объектов Безье при увеличении числа и размерностей кластеров, с одной стороны, и предельно возможное упрощение их моделей, достигаемое уменьшением числа и размеров кластеров с другой.

**Метод решения.** Алгоритмы рекластеризации основаны на матричном подходе, дающем единую компактную формулу пересчета кластеров как в сторону увеличения, так и уменьшения их размеров.

**Оригинальность.** Разработанные методы позволяют увеличивать размерности кластеров на произвольные значения, а уменьшать до предельно допустимых значений без изменения формы объектов Безье.

**Выводы.** В работе получены единые матричные алгоритмы реструктуризации узловых сетей составных линий и поверхностей Безье, повышающие гибкость их редактирования.

*Ключевые слова:* кривая, поверхность, Безье, полином, сегмент, сопряжение.

Широкое распространение в САПР получили объекты (линии и поверхности) Безье благодаря простоте их построения, хорошей гибкости и редактируемости. Ввиду ослабления влияния узловой вершины характеристической сети на форму объекта при ее удалении от краев сети лучше разделить сеть большого размера на кластеры меньших (не более пятого-шестого) порядков так, чтобы каждый кластер управлял формой своего сегмента.

К примеру,  $i$ -й полиномиальный сегмент составной линии порядка  $n_i \geq 1$  может быть построен на характеристической полилинии (ХП)  $\mathbf{u}_{i0}\mathbf{u}_{i1}\dots\mathbf{u}_{in_i}$  как бинарное разложение по узловым точкам, составляющим кластерную вектор-строку  $\mathbf{U}_i = [\mathbf{u}_{i0} \ \mathbf{u}_{i1} \ \dots \ \mathbf{u}_{in_i}]$ , и базисным функциям параметра  $t$ , составляющим вектор-столбец  $\mathbf{T}_{n_i}(t) = [1 \ t \ \dots \ t^{n_i}]^T$ :

$$\mathbf{p}_i(t) = \sum_{k=0}^{n_i} \sum_{j=0}^{n_i} h_{kj} \mathbf{u}_{ik} t^j = \mathbf{U}_i \mathbf{H}_{n_i} \mathbf{T}_{n_i}(t) \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad t \in [0, 1]. \quad (1)$$

Для целых  $m \geq 1$  верхняя треугольная  $(m+1) \times (m+1)$ -матрица  $\mathbf{H}_m$  заполнена коэффициентами

$$h_{kj} = (-1)^{j-k} C_m^j C_j^k \quad \square 0 \leq k \leq j \leq m. \quad (2)$$

Гладкое сопряжение сегментов  $\mathbf{p}_i(t)$  и  $\mathbf{p}_{i+1}(t)$  достигается выбором характеристических узлов уравнивающих векторов их первых двух производных в общей точке  $\mathbf{u}_{in_i} = \mathbf{u}_{i+1,0} \equiv \mathbf{q}_i$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_i(1) &= n_i (\mathbf{q}_i - \mathbf{u}_{i, n_i-1}) = n_{i+1} (\mathbf{u}_{i+1,1} - \mathbf{q}_i) = \mathbf{V}_{i+1}(0), \\ \mathbf{A}_i(1) &= n_i (n_i + 1) (\mathbf{q}_i - 2\mathbf{u}_{i, n_i-1} + \mathbf{u}_{i, n_i-2}) = n_{i+1} (n_{i+1} + 1) (\mathbf{q}_i - 2\mathbf{u}_{i+1,1} + \mathbf{u}_{i+1,2}) = \mathbf{A}_{i+1}(0). \end{aligned} \quad (3)$$

На рис. 1 приведен пример шестисегментной составной линии Безье с порядками сегментов  $n_1 = n_2 = 5, n_3 = 6, n_4 = 4, n_5 = 1, n_6 = 3$ , гладким сопряжением сегментов в точке  $\mathbf{q}_1$  и дважды гладким сопряжением в точке  $\mathbf{q}_2$ .

Составная поверхность Безье строится на характеристической полигональной сети (ХПС), матрично разбитой на  $N \times M$  кластеров  $\mathbf{U}_{ij}$ . Параметрическая модель  $(i, j)$ -го сегмента с порядками полиномов  $n_i \times m_j$  имеет вид

$$\mathbf{p}_{ij}(t, \tau) = \mathbf{T}_{n_i}^T(t) \mathbf{H}_{n_i}^T \mathbf{U}_{ij} \mathbf{H}_{m_j} \mathbf{T}_{m_j}(\tau) \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}, \quad t \in [0, 1], \quad \tau \in [0, 1]. \quad (4)$$

На рис. 2 показана поверхность Безье, составленная из  $5 \times 4 = 20$ -ти бикубических сегментов с первым порядком гладкости их сопряжения друг с другом.

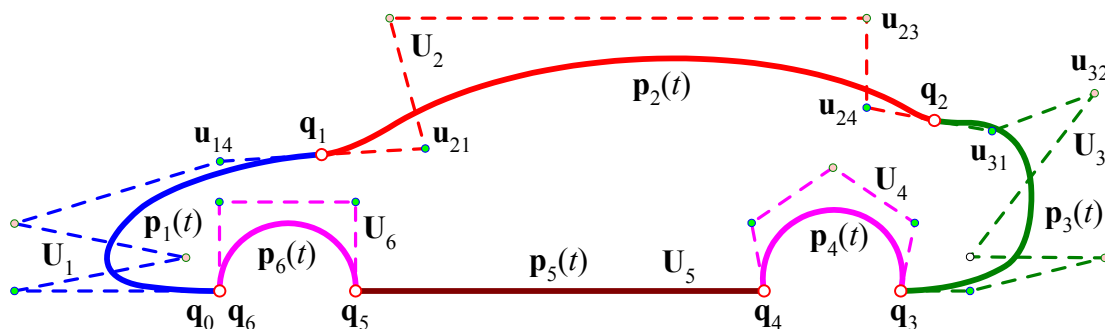


Рис. 1. Составная линия Безье

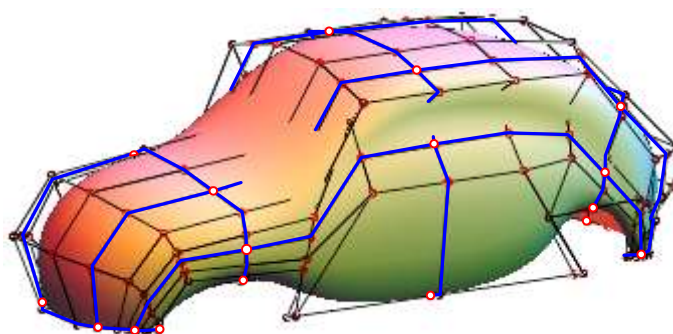


Рис. 2. Составная поверхность Безье

В [1] предложен новый, матричный метод решения одной из задач модификации объектов Безье — изменения (увеличения и уменьшения) порядков полиномов линий и поверхностей с сохранением их формы. В данной статье рассматриваются еще две модификации, связанные с *рекластеризацией* узловой сети — изменением ее структуры путем разделения одного кластера на несколько или объединения нескольких кластеров в один. Учебники по компьютерной геометрии и графике [2, 3] содержат решение лишь линейного варианта задачи разделения одного сегмента на два такого же порядка. Целью настоящей работы является получение компактных матричных решений обеих задач рекластеризации как для линий, так и для поверхностей, и к тому же с выбором порядков сегментов.

### Разделение линии Безье

Начнем с разделения линии Безье  $\mathbf{p}(t)$  порядка  $n$ , построенной на ХП  $\mathbf{U} = \mathbf{u}_0\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_n$ , на два сегмента  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$  порядков  $\nu \geq 1$  и  $\mu \geq 1$  с параметрическими моделями

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{U}\mathbf{H}_n\mathbf{T}_n(t), \quad \mathbf{p}_1(t) = \mathbf{V}\mathbf{H}_\nu\mathbf{T}_\nu(t), \quad \mathbf{p}_2(t) = \mathbf{C}\mathbf{H}_\mu\mathbf{T}_\mu(t) \quad \forall t \in [0, 1]. \quad (5)$$

Новые сегменты и их кластеры  $\mathbf{V} = \mathbf{b}_0\mathbf{b}_1 \dots \mathbf{b}_\nu$  и  $\mathbf{C} = \mathbf{c}_0\mathbf{c}_1 \dots \mathbf{c}_\mu$  граничат по *точке разделения*  $\mathbf{p}_1(1) = \mathbf{b}_\nu = \mathbf{p}_2(0) = \mathbf{c}_0$ . Рассмотрим два способа деления линии Безье и их свойства.

Ручной разрез исходной ХП по внутренней вершине  $\mathbf{u}_\nu$  с номером  $\nu \in [1, n-1]$  разбивает ее на два кластера  $\mathbf{V} = \mathbf{u}_0 \dots \mathbf{u}_{\nu-1}\mathbf{u}_\nu$  и  $\mathbf{C} = \mathbf{u}_\nu\mathbf{u}_{\nu+1} \dots \mathbf{u}_n$  порядков  $\nu$  и  $\mu = n - \nu$ . Поскольку линия  $\mathbf{p}(t)$  не проходит через внутренний узел  $\mathbf{u}_\nu$ , а линии  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$  в нем соединяются, то форма составной линии после такого деления *изменяется* (рис. 3, а). Кроме того, из-за произвольного расположения вершин  $\mathbf{u}_{\nu+1}$  и  $\mathbf{u}_{\nu+2}$  новые кластеры *не удовлетворяют* условиям гладкого сопряжения (3). В результате сопряжение новых сегментов происходит с *изломом*, т. е. с потерей гладкости.

В рамках *алгоритмического подхода* полилиния  $\mathbf{U}$  заменяется такими кластерами  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{C}$ , что составная линия  $\mathbf{p}_1(t) \cup \mathbf{p}_2(t)$  совпадает с линией  $\mathbf{p}(t)$  (рис. 3, б). Назначим параметр  $r \in (0, 1)$ , задающий *точку разделения*  $\mathbf{p}_r = \mathbf{p}(r)$ . Линии Безье трех сегментов представляют один и тот же полином в разных комбинациях параметра  $t$ :

$$\mathbf{p}_1(t) = \mathbf{p}(rt), \quad \mathbf{p}_2(t) = \mathbf{p}((1-r)t + r) \quad \forall t \in [0, 1]. \quad (6)$$

Подставив модели сегментов (5) в (6), сведем уравнения связи векторных полиномов к порядкам кластеров  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  путем изменения порядка вектора базовых функций по формуле  $\mathbf{T}_n(t) = \mathbf{E}_{n+1, m+1} \mathbf{T}_m(t)$ , в которой  $\mathbf{E}_{M, N}$  обозначает  $M \times N$ -матрицу, заполненную нулями и  $\min\{M, N\}$  единицами на главной диагонали:

$$\mathbf{B}\mathbf{H}_v \mathbf{T}_v(t) = \mathbf{U}\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, v+1} \mathbf{T}_v(rt), \quad \mathbf{C}\mathbf{H}_\mu \mathbf{T}_\mu(t) = \mathbf{U}\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, \mu+1} \mathbf{T}_\mu((1-r)t + r). \quad (7)$$

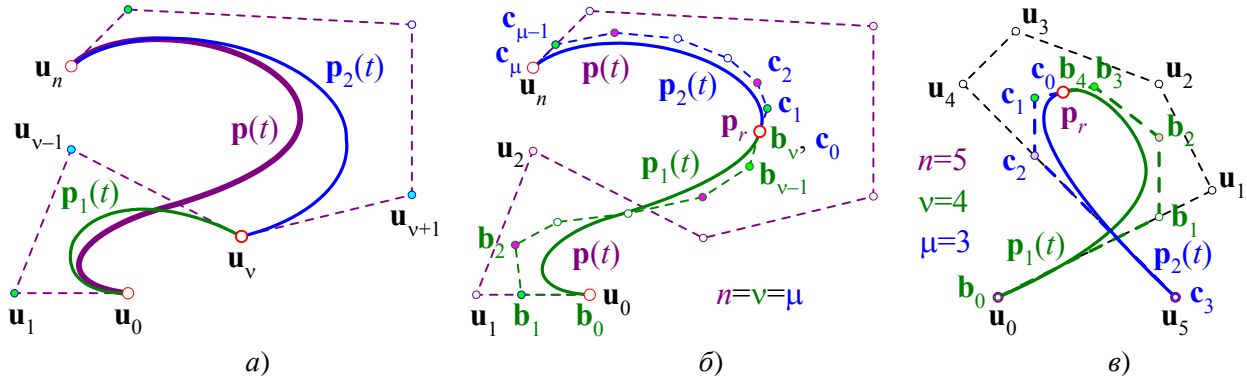


Рис. 3. Разделение линии Бэзье: *a* – ручное, *б*, *в* – алгоритмическое

Составим невырожденную матрицу преобразования  $\mathbf{T}_n(\tau) = \mathbf{D}_n(m, s) \mathbf{T}_n(t)$  из шкалы параметра  $t$  в шкалу масштабированного и смещенного параметра  $\tau = mt + s$ :

$$\begin{bmatrix} 1 \\ mt+s \\ (mt+s)^2 \\ \vdots \\ (mt+s)^n \end{bmatrix} = \mathbf{D}_n(m, s) \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ \vdots \\ t^n \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{D}_n(m, s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ s & m & 0 & \dots & 0 \\ s^2 & 2ms & m^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s^n & C_n^1 m s^{n-1} & C_n^2 m^2 s^{n-2} & \dots & m^n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Переведем с помощью этой матрицы векторы базовых функций из произвольных параметрических шкал  $rt \in [0, r]$  и  $(1-r)t + r \in [r, 1]$  в нормированную шкалу  $t \in [0, 1]$

$$\mathbf{T}_v(rt) = \mathbf{D}_v(r, 0) \mathbf{T}_v(t), \quad \mathbf{T}_\mu((1-r)t + r) = \mathbf{D}_\mu(1-r, r) \mathbf{T}_\mu(t)$$

и разрешим уравнения (7) относительно искомых векторов  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  для всех значений  $t$ :

$$\mathbf{B} = \mathbf{U}\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, v+1} \mathbf{D}_v(r, 0) \mathbf{H}_v^{-1}, \quad \mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, \mu+1} \mathbf{D}_\mu(1-r, r) \mathbf{H}_\mu^{-1}. \quad (9)$$

Обоснуем выполненные в (7) преобразования векторов базисных функций в зависимости от соотношений порядков исходного сегмента  $\mathbf{p}(t)$  и разделенных сегментов  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$ :

- при выборе порядков  $v \geq n$  и  $\mu \geq n$  замены вектора  $\mathbf{T}_n$  векторами

$$\mathbf{E}_{n+1, v+1} \mathbf{T}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_n \\ \mathbf{O}_{v-n, 1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_{n+1, \mu+1} \mathbf{T}_\mu = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_n \\ \mathbf{O}_{\mu-n, 1} \end{bmatrix}$$

возможны всегда, но реальные степени разделенных полиномов все равно останутся равными  $n$ . При этом векторы полиномиальных коэффициентов новых сегментов

$$\mathbf{B}\mathbf{H}_v = [\mathbf{B}\mathbf{H}_n \mid \mathbf{O}_{1, v-n}], \quad \mathbf{B}\mathbf{H}_\mu = [\mathbf{B}\mathbf{H}_n \mid \mathbf{O}_{1, \mu-n}]$$

будут содержать справа  $v - n$  и, соответственно,  $\mu - n$  нулевых столбцов;

- при выборе порядков  $v < n$  или  $\mu < n$  (рис. 3, *в*) замены вектора  $\mathbf{T}_n$  векторами

$$\mathbf{E}_{n+1, v+1} \mathbf{T}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_v \\ \mathbf{O}_{n-v, 1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_{n+1, \mu+1} \mathbf{T}_\mu = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_\mu \\ \mathbf{O}_{n-\mu, 1} \end{bmatrix}$$

возможны лишь при условии, что реальная степень полинома  $\mathbf{p}(t)$  не превышает значений  $v$  или  $\mu$ , а дефект степени  $d \geq n - v$  или  $d \geq n - \mu$ . Для этого вектор полиномиальных коэффициентов разделяемого сегмента должен содержать справа  $n - v$  или  $n - \mu$  нулевых столбцов:

$$\mathbf{B}\mathbf{H}_n = [\mathbf{B}\mathbf{H}_v \mid \mathbf{O}_{1, n-v}], \quad \mathbf{B}\mathbf{H}_n = [\mathbf{B}\mathbf{H}_\mu \mid \mathbf{O}_{1, n-\mu}].$$

Неравенство  $v|\mathbf{b}_v - \mathbf{b}_{v-1}| \neq \mu|\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_0|$  длин параллельных касательных векторов, хорошо заметное на рис. 3, б, означает, что полученные после деления новые сегменты Безье обладают лишь *нормированной* гладкостью сопряжения друг с другом, а также с окружающими старыми сегментами. Моделирование выявило следующие зависимости векторов двух производных полиномов  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$  в точке деления  $\mathbf{p}_r$ :

$$(1-r)\mathbf{V}_1(1) = r\mathbf{V}_2(0), \quad (1-r)^2\mathbf{A}_1(1) = r^2\mathbf{A}_2(0). \quad (10)$$

Отсюда видно, что только при выборе параметра деления  $r = 0.5$  сопряжение новых сегментов становится согласно (3) дважды гладким.

**Пример 1.** Разделить линию Безье, построенную на ХП с вершинами  $\mathbf{u}_0 = [10 \ 0]^T$ ,  $\mathbf{u}_1 = [22 \ 6]^T$ ,  $\mathbf{u}_2 = [19 \ 12]^T$ ,  $\mathbf{u}_3 = [11 \ 15]^T$ ,  $\mathbf{u}_4 = [8 \ 12]^T$  и  $\mathbf{u}_5 = [20 \ 0]^T$ , на два сегмента с параметром деления  $r = 0.6$  (рис. 3, в).

**Решение.** Сформировав из характеристических вершин и по формуле (2) матрицы

$$\mathbf{U}_5 = \begin{bmatrix} 10 & 22 & 19 & 11 & 8 & 20 \\ 0 & 6 & 12 & 15 & 12 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_5 = \begin{bmatrix} 1 & -5 & 10 & -10 & 5 & -1 \\ 0 & 5 & -20 & 30 & -20 & 5 \\ 0 & 0 & 10 & -30 & 30 & -10 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & -20 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

вычислим точку деления линии Безье, имеющей формальную степень  $n = 5$ :

$$\mathbf{p}_r = \mathbf{U}\mathbf{H}_5\mathbf{T}_5(r) = [13.6 \ 11.52]^T.$$

Два правых нулевых столбца матрицы коэффициентов полинома  $\mathbf{p}(t) = \mathbf{S}\mathbf{T}_5(t)$

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{H}_5 = \begin{bmatrix} 10 & 60 & -150 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 & -30 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

означают дефект степени полинома  $d = 2$  и его реальную степень  $n - d = 3$ .

Выбрав степени новых полиномов  $v = 4 > 3$ ,  $\mu = 3$  и сформировав по (8) матрицы

$$\mathbf{D}_4(0.6,0) = \text{diag} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.216 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1296 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_3(0.4,0.6) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.36 & 0.48 & 0.16 & 0 \\ 0.216 & 0.432 & 0.288 & 0.064 \end{bmatrix},$$

вычислим по (9) матрицы вершин кластеров разделенных сегментов (матрицы  $\mathbf{H}_4$  и  $\mathbf{H}_3$  приведены в [1])

$$\mathbf{B} = \mathbf{U}\mathbf{H}_5\mathbf{E}_{6,5}\mathbf{D}_4(0.6,0)\mathbf{H}_4^{-1} = \begin{bmatrix} 10 & 19 & 19 & 15.4 & 13.6 \\ 0 & 4.5 & 9 & 11.88 & 11.52 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{H}_5\mathbf{E}_{6,4}\mathbf{D}_3(0.4,0.6)\mathbf{H}_3^{-1} = \begin{bmatrix} 13.6 & 16 & 22 & 10 \\ 11.52 & 12 & 6 & 0 \end{bmatrix}$$

и составим полиномиальные модели линий Безье с реальными степенями, равными трем:

$$\mathbf{p}_1(t) = \mathbf{B}\mathbf{H}_4\mathbf{T}_4(t) = \begin{bmatrix} 10 + 36t - 54t^2 + 21.6t^3 \\ 18t - 6.48t^3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}_2(t) = \mathbf{C}\mathbf{H}_3\mathbf{T}_3(t) = \begin{bmatrix} 13.6 - 4.8t + 4.8t^2 + 6.4t^3 \\ 11.52 - 0.96t - 8.64t^2 - 1.92t^3 \end{bmatrix}.$$

Анализируя пары векторов двух производных в точке сопряжения

$$\mathbf{V}_1(1) = 4(\mathbf{b}_4 - \mathbf{b}_3) = [-7.2 \ -1.44] \quad \text{и} \quad \mathbf{V}_2(0) = 3(\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_0) = [-4.8 \ -0.96],$$

$$\mathbf{A}_1(1) = 12(\mathbf{b}_4 - 2\mathbf{b}_3 + \mathbf{b}_2) = [21.6 \ -38.88] \quad \text{и} \quad \mathbf{A}_2(0) = 6(\mathbf{c}_2 - 2\mathbf{c}_1 + \mathbf{c}_0) = [9.6 \ -17.28],$$

убеждаемся в их коллинеарности, но отношении длин в  $r / (1 - r) = 1.5$  и  $r^2 / (1 - r)^2 = 2.25$  раз. Это подтверждает вывод, что при коэффициенте  $r \neq 0.5$  кривая Безье разделяется на сегменты, обладающие лишь нормированной двойной гладкостью сопряжения.



### Объединение линий Безье

Рассмотрим два способа и свойства объединения двух линий Безье  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$ , построенных по (5) на узловых кластерах  $\mathbf{B} = \mathbf{b}_0\mathbf{b}_1 \dots \mathbf{b}_v$  и  $\mathbf{C} = \mathbf{c}_0\mathbf{c}_1 \dots \mathbf{c}_\mu$  порядков  $v$  и  $\mu$ , в одну линию  $\mathbf{p}(t)$ , включая выбор ее порядка  $n$  и вершин кластера  $\mathbf{U} = \mathbf{u}_0\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_n$ .

Простое соединение полилиний  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  по их общей вершине  $\mathbf{b}_v = \mathbf{c}_0$  в полилинию  $\mathbf{U} = \mathbf{b}_0 \dots \mathbf{b}_v\mathbf{c}_1 \dots \mathbf{c}_\mu$  порядка  $n = v + \mu$  дает сегмент  $\mathbf{p}(t) = \mathbf{U}\mathbf{H}_n\mathbf{T}_n(t)$ , не совпадающий с линиями  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$ , так как точка  $\mathbf{u}_v = \mathbf{b}_v = \mathbf{c}_0$  не является концевой в кластере  $\mathbf{U}$  (см. рис. 3, а). Благодаря вхождению цепочек  $\mathbf{b}_0\mathbf{b}_1\mathbf{b}_2$  и  $\mathbf{c}_{\mu-2}\mathbf{c}_{\mu-1}\mathbf{c}_\mu$  в объединение  $\mathbf{U} = \mathbf{B} \cup \mathbf{C}$  условия сопряжения линии  $\mathbf{p}(t)$  с окружающими ее сегментами сохраняются.

По второму алгоритмическому способу кластеры  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  заменяются такой характеристической полилинией  $\mathbf{U}$ , что построенный на ней сегмент Безье  $\mathbf{p}(t)$  точно совпадает с составной линией  $\mathbf{p}_1(t) \cup \mathbf{p}_2(t)$  (см. рис. 3, б, в). По сути эта задача обратна рассмотренной выше задаче разделения кластера и входит в круг задач редактирования составных линий Безье.

Если при разделении кластера параметр  $r$  задавался произвольно, то в обратной задаче его нужно каким-то образом вычислить. Поскольку линии  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$  сопряжены гладко, пусть и нормированно, то в точке  $\mathbf{b}_v = \mathbf{c}_0$  векторы направлений  $\mathbf{V}_1(1) = v(\mathbf{b}_v - \mathbf{b}_{v-1})$  и  $\mathbf{V}_2(0) = \mu(\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_0)$  коллинеарны. Их длины связаны между собой первым в (10) соотношением, из которого и находится параметр разделения:

$$r = \frac{1}{1 + \mu|\mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_0|/v|\mathbf{b}_v - \mathbf{b}_{v-1}|}. \tag{11}$$

При равенстве векторов  $\mathbf{V}_1(1) = \mathbf{V}_2(0)$  в (11) будет получено  $r = 0.5$ . Другие значения  $r$  означают не полную, а лишь *нормированную* гладкость сопряжения линий  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$ , при которой в (3) совпадают лишь направления векторов производных.

Замена двух сегментов Безье одним возможна лишь тогда, когда все три линии представляют один и тот же полином. Именно из этих свойств (6) и получены зависимости (9) между тремя кластерами  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$ . Здесь же нужно проверить *способность* кластеров  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  быть основами разных частей единого сегмента  $\mathbf{p}_1(t) \cup \mathbf{p}_2(t)$  без привлечения неизвестного пока кластера  $\mathbf{U}$ . Приведя соотношения (7) к единому порядку  $n$

$$\mathbf{B}\mathbf{H}_v\mathbf{E}_{v+1,n+1}\mathbf{T}_n(t) = \mathbf{U}\mathbf{H}_n\mathbf{D}_n(r, 0)\mathbf{T}_n(t), \quad \mathbf{C}\mathbf{H}_\mu\mathbf{E}_{\mu+1,n+1}\mathbf{T}_n(t) = \mathbf{U}\mathbf{H}_n\mathbf{D}_n(1-r, r)\mathbf{T}_n(t), \tag{12}$$

получим благодаря невырожденности матрицы (8) *тест возможности объединения* сегментов Безье  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$  в одну линию  $\mathbf{p}(t)$ :

$$\mathbf{B}\mathbf{H}_v\mathbf{E}_{v+1,n+1}\mathbf{D}_n^{-1}(r, 0) = \mathbf{C}\mathbf{H}_\mu\mathbf{E}_{\mu+1,n+1}\mathbf{D}_n^{-1}(1-r, r). \tag{13}$$

Из тех же соотношений находится искомый вектор вершин объединяющего кластера:

$$\mathbf{U} = \mathbf{B}\mathbf{H}_v\mathbf{E}_{v+1,n+1}\mathbf{D}_n^{-1}(r, 0)\mathbf{H}_n^{-1}. \tag{14}$$

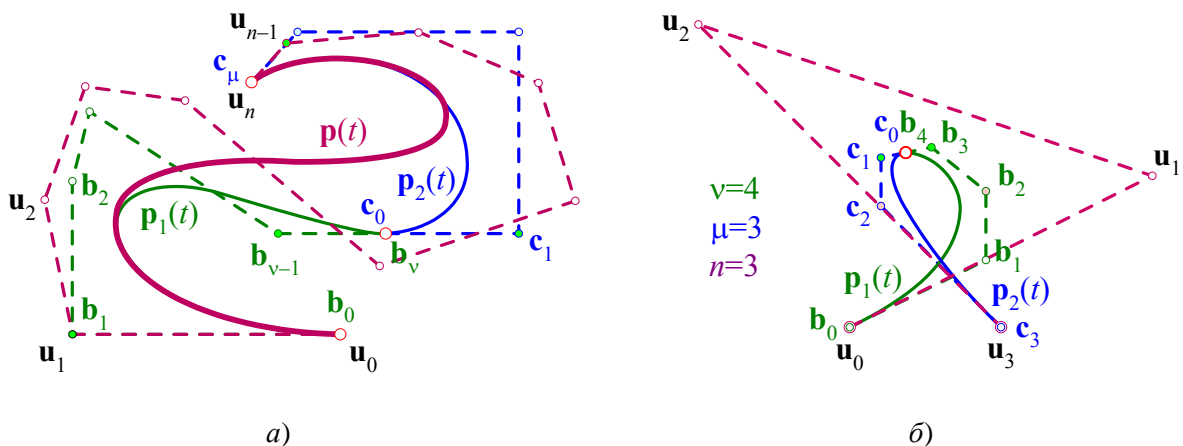


Рис. 4. Объединение линий Безье

Если полилинии  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  не удовлетворяют условию (13), то в (14) будет получен кластер линии Безье, не проходящей по исходным линиям  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$ , как показано на рис. 4, а. В расчетах с обратной матрицей (8) можно использовать ее свойство

$$\mathbf{D}_n^{-1}(m,s)=\mathbf{D}_n(m^{-1},-sm^{-1}).$$

Сделанные в (12) подстановки  $\mathbf{T}_v(t)=\mathbf{E}_{v+1,n+1}\mathbf{T}_n(t)$  и  $\mathbf{T}_\mu(t)=\mathbf{E}_{\mu+1,n+1}\mathbf{T}_n(t)$  возможны всегда при выборе порядка объединенного сегмента  $n \geq \max\{v, \mu\}$ . Наименьшее значение  $n$ , при котором задача объединения имеет точное решение (14) при условии (13), ограничено наибольшей реальной степенью полиномов  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$ .

**Пример 2.** Объединить по возможности сегменты Безье  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$  порядков  $v=4$  и  $\mu=3$  (см. рис. 3,в) в одну линию минимального порядка.

**Решение.** В примере 1 показано, что реальные степени дважды гладко сопряженных сегментов  $\mathbf{p}_1(t)$  и  $\mathbf{p}_2(t)$  равны трем. Если возможность объединения этих сегментов существует, то минимальная степень полинома  $\mathbf{p}(t)$  также будет составлять  $n=3$ .

Используя найденное там же соотношение длин касательных векторов в точке сопряжения  $|\mathbf{V}_1(1)|/|\mathbf{V}_2(0)|=1.5$ , вычислим по (11) параметр деления  $r=1/(1+2/3)=0.6$  и проведем тест (13) с обратными матрицами  $\mathbf{D}_3^{-1}(3/5,0)=\mathbf{D}_3(5/3,0)$  и  $\mathbf{D}_3^{-1}(2/5,3/5)=\mathbf{D}_3(5/3,-1)$ :

$$\mathbf{B}\mathbf{H}_4\mathbf{E}_{5,4}\mathbf{D}_3(5/3,0)=\mathbf{C}\mathbf{H}_3\mathbf{D}_3(5/3,-1)=\begin{bmatrix} 10 & 60 & -150 & 100 \\ 0 & 30 & 0 & -30 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, объединение сегментов возможно.

Вычислив по (14) матрицу вершин объединяющего кластера, построим на нем параметрическую модель линии Безье третьего порядка (рис. 4, б):

$$\mathbf{U}=\mathbf{B}\mathbf{H}_4\mathbf{E}_{5,4}\mathbf{D}_3(5/3,0)\mathbf{H}_3^{-1}=\begin{bmatrix} 10 & 30 & 0 & 20 \\ 0 & 10 & 20 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p}(t)=\mathbf{U}\mathbf{H}_3\mathbf{T}_3(t)=\begin{bmatrix} 10+60t-150t^2+100t^3 \\ 30t-30t^3 \end{bmatrix}.$$

### Разделение поверхности Безье

Распространим линейный алгоритм (6) ÷ (9) на задачу разделения поверхности Безье

$$\mathbf{p}(t,\tau)=\mathbf{T}_n^T(t)\mathbf{H}_n^T\mathbf{U}\mathbf{H}_m\mathbf{T}_m(\tau) \quad \square t, \tau \in [0, 1], \quad (15)$$

построенной на ХПС  $\mathbf{U}=\{\mathbf{u}_{ij}\}$  порядков  $n \times m$ , на четыре сегмента  $\mathbf{p}_{11}(t,\tau) \div \mathbf{p}_{22}(t,\tau)$  с моделями (4) порядков  $n_1 \times m_1 \div n_2 \times m_2$ . Целью разделения узловой сети  $\mathbf{U}$  на кластеры  $\mathbf{U}_{11} \div \mathbf{U}_{22}$  является увеличение числа и уменьшение порядков сегментов, что, в конечном итоге, повышает гибкость построенной на них составной поверхности.

Назначим параметры  $r, \rho \in (0, 1)$  и точку разделения  $\mathbf{p}_{r\rho}=\mathbf{p}(r,\rho)$ , в которой новые кластеры и сегменты соединяются углами. Деление надвое каждого параметрического интервала  $t, \tau \in [0, 1]$  дает сегменты (4), представляющие один и тот же полином в разных комбинациях параметров  $\{t,\tau\}$  и совместно покрывающие исходный сегмент  $\mathbf{p}(t,\tau)$ :

$$\mathbf{p}_{11}(t,\tau)=\mathbf{p}(rt, \rho\tau), \quad \mathbf{p}_{12}(t,\tau)=\mathbf{p}(rt, (1-\rho)\tau + \rho), \quad (16)$$

$$\mathbf{p}_{21}(t,\tau)=\mathbf{p}((1-r)t + r, \rho\tau), \quad \mathbf{p}_{22}(t,\tau)=\mathbf{p}((1-r)t + r, (1-\rho)\tau + \rho).$$

Подставив сюда модели сегментов (4) и (15), получим систему четырех уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{n_1}^T(t)\mathbf{H}_{n_1}^T\mathbf{U}_{11}\mathbf{H}_{m_1}\mathbf{T}_{m_1}(\tau)=\mathbf{T}_{n_1}^T(rt)\mathbf{E}_{n_1+1,n+1}\mathbf{H}_n^T\mathbf{U}\mathbf{H}_m\mathbf{E}_{m+1,m_1+1}\mathbf{T}_{m_1}(\rho\tau), \\ \mathbf{T}_{n_1}^T(t)\mathbf{H}_{n_1}^T\mathbf{U}_{12}\mathbf{H}_{m_2}\mathbf{T}_{m_2}(\tau)=\mathbf{T}_{n_1}^T(rt)\mathbf{E}_{n_1+1,n+1}\mathbf{H}_n^T\mathbf{U}\mathbf{H}_m\mathbf{E}_{m+1,m_2+1}\mathbf{T}_{m_2}((1-\rho)\tau+\rho), \\ \mathbf{T}_{n_2}^T(t)\mathbf{H}_{n_2}^T\mathbf{U}_{21}\mathbf{H}_{m_1}\mathbf{T}_{m_1}(\tau)=\mathbf{T}_{n_2}^T((1-r)t+r)\mathbf{E}_{n_2+1,n+1}\mathbf{H}_n^T\mathbf{U}\mathbf{H}_m\mathbf{E}_{m+1,m_1+1}\mathbf{T}_{m_1}(\rho\tau), \\ \mathbf{T}_{n_2}^T(t)\mathbf{H}_{n_2}^T\mathbf{U}_{22}\mathbf{H}_{m_2}\mathbf{T}_{m_2}(\tau)=\mathbf{T}_{n_2}^T((1-r)t+r)\mathbf{E}_{n_2+1,n+1}\mathbf{H}_n^T\mathbf{U}\mathbf{H}_m\mathbf{E}_{m+1,m_2+1}\mathbf{T}_{m_2}((1-\rho)\tau+\rho). \end{cases}$$

Наконец, четырежды применив преобразование (8), получим формулы вычисления матриц узловых кластеров разделенных сегментов:

$$\begin{cases} U_{11} = (\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, n_1+1} \mathbf{D}_{n_1}(r, 0) \mathbf{H}_{n_1}^{-1})^T \mathbf{U} (\mathbf{H}_m \mathbf{E}_{m+1, m_1+1} \mathbf{D}_{m_1}(\rho, 0) \mathbf{H}_{m_1}^{-1}), \\ U_{12} = (\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, n_1+1} \mathbf{D}_{n_1}(r, 0) \mathbf{H}_{n_1}^{-1})^T \mathbf{U} (\mathbf{H}_m \mathbf{E}_{m+1, m_2+1} \mathbf{D}_{m_2}(1-\rho, \rho) \mathbf{H}_{m_2}^{-1}), \\ U_{21} = (\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, n_2+1} \mathbf{D}_{n_2}(1-r, r) \mathbf{H}_{n_2}^{-1})^T \mathbf{U} (\mathbf{H}_m \mathbf{E}_{m+1, m_1+1} \mathbf{D}_{m_1}(\rho, 0) \mathbf{H}_{m_1}^{-1}), \\ U_{22} = (\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, n_2+1} \mathbf{D}_{n_2}(1-r, r) \mathbf{H}_{n_2}^{-1})^T \mathbf{U} (\mathbf{H}_m \mathbf{E}_{m+1, m_2+1} \mathbf{D}_{m_2}(1-\rho, \rho) \mathbf{H}_{m_2}^{-1}). \end{cases} \quad (17)$$

При разделении кластера  $\mathbf{U}$  лишь по одному параметрическому направлению его замещают не четыре, а только два новых кластера:

$$\begin{aligned} t: U_{11} &= (\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, n_1+1} \mathbf{D}_{n_1}(r, 0) \mathbf{H}_{n_1}^{-1})^T \mathbf{U}, \quad U_{21} = (\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, n_2+1} \mathbf{D}_{n_2}(1-r, r) \mathbf{H}_{n_2}^{-1})^T \mathbf{U}, \\ \tau: U_{11} &= \mathbf{U} (\mathbf{H}_m \mathbf{E}_{m+1, m_1+1} \mathbf{D}_{m_1}(\rho, 0) \mathbf{H}_{m_1}^{-1}), \quad U_{12} = \mathbf{U} (\mathbf{H}_m \mathbf{E}_{m+1, m_2+1} \mathbf{D}_{m_2}(1-\rho, \rho) \mathbf{H}_{m_2}^{-1}). \end{aligned}$$

Выбор порядков новых сегментов  $n_i$  и  $m$  определяется структурой матриц полиномиальных коэффициентов  $\mathbf{S} = \mathbf{H}_n^T \mathbf{U} \mathbf{H}_m$  и  $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{H}_{n_i}^T \mathbf{U}_{ij} \mathbf{H}_{m_j}$ :

- значения  $n_i \geq n$  и  $m_j \geq m$  возможны всегда, но реальные степени новых сегментов все равно будут равны  $n$  и  $m$ . При этом их матрицы  $\mathbf{S}_{ij}$  будут содержать снизу  $n_i - n$  нулевых строк и/или справа  $m_j - m$  нулевых столбцов:

$$\left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{S} & \\ \hline \mathbf{O}_{n_i-n, m_j+1} & \end{array} \right], \quad \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{S} & \\ \hline \mathbf{O}_{n_i+1, m_j-m} & \end{array} \right], \quad \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{S} & \mathbf{O}_{n_i+1, m_j-m} \\ \hline \mathbf{O}_{n_i-n, m_j+1} & \mathbf{O}_{n_i-n, m_j-m} \end{array} \right];$$

- выбор  $n_i < n$  или  $m_j < m$  обусловлен наличием у полинома  $\mathbf{p}(t, \tau)$  дефектов степеней  $d_i \geq n - n_i$  или  $d_j \geq m - m_j$ . Для этого матрица  $\mathbf{S}$  полиномиальных коэффициентов разделяемого сегмента должна содержать снизу  $d$  нулевых строк и/или справа  $\delta$  нулевых столбцов:

$$\left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{S}_{ij} & \\ \hline \mathbf{O}_{d, m_j+1} & \end{array} \right], \quad \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{S}_{ij} & \\ \hline \mathbf{O}_{n_i+1, \delta} & \end{array} \right], \quad \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{S}_{ij} & \mathbf{O}_{n_i+1, m_j-m} \delta \\ \hline \mathbf{O}_{d, m_j+1} & \mathbf{O}_{d, \delta} \end{array} \right].$$

Как и в (10), двойная гладкость сопряжения новых сегментов друг с другом получится только при  $r = \rho = 0.5$  — делении сегмента средне-параметрической точкой.

Испытаем разработанный алгоритм на разделении поверхности Безье из [1, рис. 3], построенной на характеристической сети узловой размерности  $10 \times 10$  (рис. 6, а). Необходимость сильного удаления околоцентральных вершин ХПС подтверждает свойство их слабого влияния на поверхность Безье при высоких порядках ее модели (15). Подобрал параметры  $r = 0.4$  и  $\rho = 0.5$ , при которых точка деления  $\mathbf{p}_{rp}$  находится на острие «носа», получим по формулам (17) четыре кластера  $U_{11} \div U_{22}$ , очень плотно охватывающих составную поверхность (рис. 6, б) в отличие от «рыхлой» исходной сети.

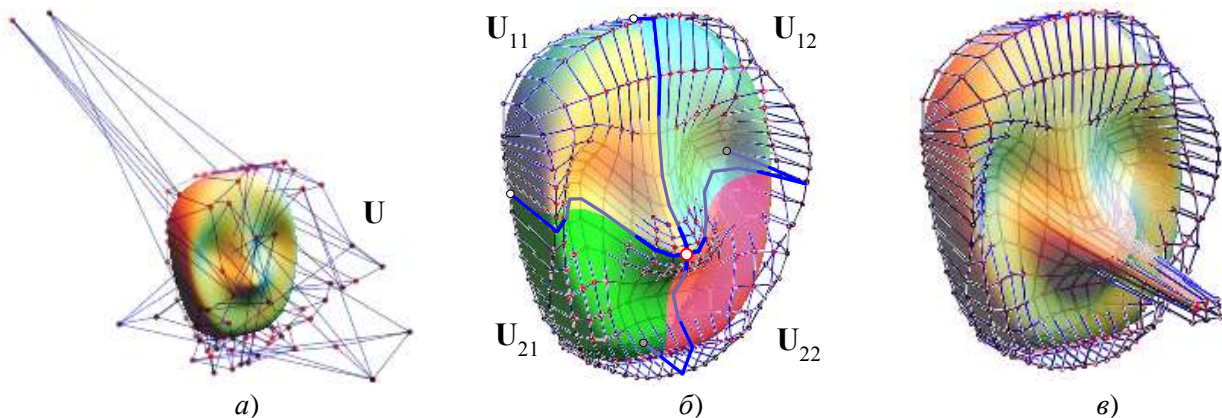


Рис. 6. Разделение поверхности Безье

Теперь, с превращением односегментной поверхности в составную, появились более мощные возможности ее редактирования. Одна из них – перемещение точки деления и окружающих ее восьми узловых точек – показана на рис. 6, в, и такой остроты «носа» нельзя достичь без разделения кластера.

**Пример 3.** Разделить на четыре сегмента минимальных степеней поверхность Безье (рис. 7, а), у которой вершины ХПС порядков  $n = m = 3$  составляют матрицу

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} [8 \ 0 \ 0] & [8 \ 0 \ -12] & [-8 \ 0 \ -12] & [-8 \ 0 \ 0] \\ [6 \ -4 \ 0] & [6 \ -4 \ -9] & [-6 \ -4 \ -9] & [-6 \ -4 \ 0] \\ [4 \ -4 \ 0] & [4 \ -4 \ -6] & [-4 \ -4 \ -6] & [-4 \ -4 \ 0] \\ [2 \ 0 \ 0] & [2 \ 0 \ -3] & [-2 \ 0 \ -3] & [-2 \ 0 \ 0] \end{bmatrix}.$$

**Решение.** Для определения минимально возможных степеней разделенных сегментов вычислим матрицу полиномиальных коэффициентов заданной поверхности:

$$\mathbf{S} = \mathbf{H}_3^T \mathbf{U} \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} [8 \ 0 \ 0] & [0 \ 0 \ -36] & [-48 \ 0 \ 36] & [32 \ 0 \ 0] \\ [-6 \ -12 \ 0] & [0 \ 0 \ 27] & [36 \ 0 \ -27] & [-24 \ 0 \ 0] \\ [0 \ 12 \ 0] & [0 \ 0 \ 0] & [0 \ 0 \ 0] & [0 \ 0 \ 0] \\ [0 \ 0 \ 0] & [0 \ 0 \ 0] & [0 \ 0 \ 0] & [0 \ 0 \ 0] \end{bmatrix}.$$

В ней есть одна нижняя нулевая строка, значит, в  $t$ -направлении поверхность является параболической с дефектом степени  $d = 1$ , в  $\tau$ -направлении – кубической, а минимальные степени новых сегментов равны  $n_1 = n_2 = n - d = 2$  и  $m_1 = m_2 = 3$ .

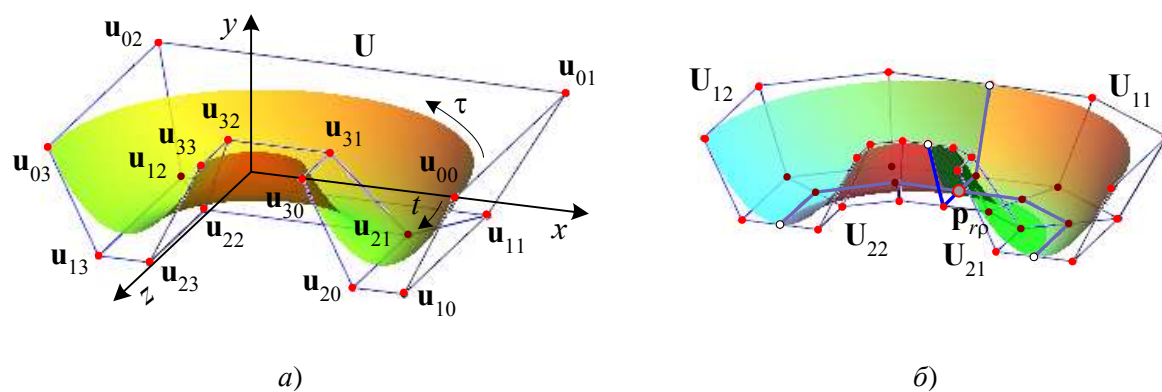


Рис. 7. Пример разделения поверхности Безье

Задав параметры разделения  $r = \rho = 0.5$  и вычислив по (17) матрицы кластеров  $\mathbf{U}_{11} \div \mathbf{U}_{22}$ , убеждаемся, что построенные на них по (4) поверхности Безье точно совпадают с исходной поверхностью (рис. 7, б).

### Объединение поверхностей Безье

Цель данной задачи – объединение кластеров в один для упрощения структуры составной поверхности без изменения ее формы путем уменьшения числа сегментов и, возможно, вершин ХПС. Она, по сути, обратна к задаче разделения кластера. Следует, однако, понимать, что объединение сегментов Безье с сохранением формы поверхности возможно при жестких ограничениях на расположение узловых вершин объединяемых кластеров.

По аналогии с (11) ÷ (14) составим алгоритм замены четырех матрично организованных кластеров  $\mathbf{U}_{ij}$  с порядками  $n_i \times m_j$  при  $i, j \in \{1, 2\}$  одним кластером  $\mathbf{U}$  порядка  $n \times m$ , поверхность которого  $\mathbf{p}(t, \tau)$  совпадает с объединением поверхностей  $\mathbf{p}_{ij}(t, \tau)$ . Используем для вычисления параметров разделения  $r$  и  $\rho$  точку  $\mathbf{p}_{rp} = \mathbf{p}_{11}(1, 1) = \mathbf{p}_{12}(1, 0) = \mathbf{p}_{21}(0, 1) = \mathbf{p}_{22}(0, 0)$  и четыре окружающие ее граничные вершины кластеров

$$\mathbf{v}_0 = \mathbf{u}_{n_1-1, m_1}^{11} = \mathbf{u}_{n_1-1, 0}^{12}, \quad \mathbf{v}_1 = \mathbf{u}_{1, m_1}^{21} = \mathbf{u}_{1, 0}^{22}, \quad \mathbf{w}_0 = \mathbf{u}_{n_1, m_1-1}^{11} = \mathbf{u}_{0, m_1-1}^{21}, \quad \mathbf{w}_1 = \mathbf{u}_{n_1, 1}^{12} = \mathbf{u}_{0, 1}^{22} :$$

$$r = \left( 1 + \frac{n_2 |\mathbf{p}_{rp} - \mathbf{v}_1|}{n_1 |\mathbf{p}_{rp} - \mathbf{v}_0|} \right)^{-1}, \quad \rho = \left( 1 + \frac{m_2 |\mathbf{p}_{rp} - \mathbf{w}_1|}{m_1 |\mathbf{p}_{rp} - \mathbf{w}_0|} \right)^{-1}. \quad (18)$$

Возможность алгоритмического объединения четырех сегментов сильно ограничена таким расположением вершин в кластерах  $\mathbf{U}_{11} \div \mathbf{U}_{22}$ , что построенные на них поверхности Безье  $\mathbf{p}_{ij}(t, \tau)$  представляют единый полином от разных комбинаций параметров  $t, \tau \in [0, 1]$ . Приведя уравнения (16) к порядкам  $n$  и  $m$ , получим соотношения

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{n+1, n_1+1} \mathbf{H}_{n_1}^T \mathbf{U}_{11} \mathbf{H}_{m_1} \mathbf{E}_{m_1+1, m_1+1} = \mathbf{D}_n^T(r, 0) \mathbf{H}_n^T \mathbf{U} \mathbf{H}_m \mathbf{D}_m(\rho, 0), \\ \mathbf{E}_{n+1, n_1+1} \mathbf{H}_{n_1}^T \mathbf{U}_{12} \mathbf{H}_{m_2} \mathbf{E}_{m_2+1, m_2+1} = \mathbf{D}_n^T(r, 0) \mathbf{H}_n^T \mathbf{U} \mathbf{H}_m \mathbf{D}_m(1-\rho, \rho), \\ \mathbf{E}_{n+1, n_2+1} \mathbf{H}_{n_2}^T \mathbf{U}_{21} \mathbf{H}_{m_1} \mathbf{E}_{m_1+1, m_1+1} = \mathbf{D}_n^T(1-r, r) \mathbf{H}_n^T \mathbf{U} \mathbf{H}_m \mathbf{D}_m(\rho, 0), \\ \mathbf{E}_{n+1, n_2+1} \mathbf{H}_{n_2}^T \mathbf{U}_{22} \mathbf{H}_{m_2} \mathbf{E}_{m_2+1, m_2+1} = \mathbf{D}_n^T(1-r, r) \mathbf{H}_n^T \mathbf{U} \mathbf{H}_m \mathbf{D}_m(1-\rho, \rho). \end{cases}$$

Отсюда вытекают, во-первых, тест возможности объединения сегментов  $\mathbf{p}_{11}(t, \tau) \div \mathbf{p}_{22}(t, \tau)$  в один сегмент  $\mathbf{p}(t, \tau)$  в виде системы трех матричных уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{11} \mathbf{H}_{m_1} \mathbf{E}_{m_1+1, m_1+1} \mathbf{D}_m^{-1}(\rho, 0) = \mathbf{U}_{12} \mathbf{H}_{m_2} \mathbf{E}_{m_2+1, m_2+1} \mathbf{D}_m^{-1}(1-\rho, \rho), \\ \mathbf{U}_{11}^T \mathbf{H}_{n_1} \mathbf{E}_{n_1+1, n_1+1} \mathbf{D}_n^{-1}(r, 0) = \mathbf{U}_{21}^T \mathbf{H}_{n_2} \mathbf{E}_{n_2+1, n_2+1} \mathbf{D}_n^{-1}(1-r, r), \\ \mathbf{U}_{21} \mathbf{H}_{m_1} \mathbf{E}_{m_1+1, m_1+1} \mathbf{D}_m^{-1}(\rho, 0) = \mathbf{U}_{22} \mathbf{H}_{m_2} \mathbf{E}_{m_2+1, m_2+1} \mathbf{D}_m^{-1}(1-\rho, \rho), \end{cases} \quad (19)$$

а во-вторых, формула вычисления матрицы вершин объединяющего кластера  $\mathbf{U}$  по матрице лишь одного узлового кластера, например,  $\mathbf{U}_{11}$ :

$$\mathbf{U} = \left( \mathbf{H}_{n_1} \mathbf{E}_{n_1+1, n_1+1} \mathbf{D}_n^{-1}(r, 0) \mathbf{H}_n^{-1} \right)^T \mathbf{U}_{11} \left( \mathbf{H}_{m_1} \mathbf{E}_{m_1+1, m_1+1} \mathbf{D}_m^{-1}(\rho, 0) \mathbf{H}_m^{-1} \right). \quad (20)$$

Для объединения сегментов лишь по одному параметрическому направлению ( $t$  либо  $\tau$ ) в (18)  $\div$  (20) берутся соответствующие параметр разделения ( $r$  либо  $\rho$ ) и пара тестируемых кластеров ( $\{\mathbf{U}_{11}, \mathbf{U}_{21}\}$  либо  $\{\mathbf{U}_{11}, \mathbf{U}_{12}\}$ ).

При выводе формулы (20) подстановки  $\mathbf{T}_{n_i}(t) = \mathbf{E}_{n_i+1, n_i+1} \mathbf{T}_n(t)$  и  $\mathbf{T}_{m_j}(\tau) = \mathbf{E}_{m_j+1, m_j+1} \mathbf{T}_m(\tau)$  равносильны *всегда*, если порядки искомого сегмента  $n \geq \max\{n_1, n_2\}$  и  $m \geq \max\{m_1, m_2\}$ . Наименьшие значения  $n$  и  $m$ , при которых задача объединения при условиях (19) имеет точное решение (20), ограничено наибольшими реальными степенями полиномов  $\mathbf{p}_{ij}(t, \tau)$ .

Испытаем разработанный алгоритм на объединение четырех сегментов Безье с кластерами  $\mathbf{U}_{11} \div \mathbf{U}_{22}$  порядков  $n_1 = n_2 = 2$  и  $m_1 = m_2 = 3$  (см. рис. 7, б) в поверхность *минимальных степеней*  $n = 2$  и  $m = 3$ , определяемых максимальными степенями объединяемых сегментов в соответствующих параметрических направлениях (рис. 8).

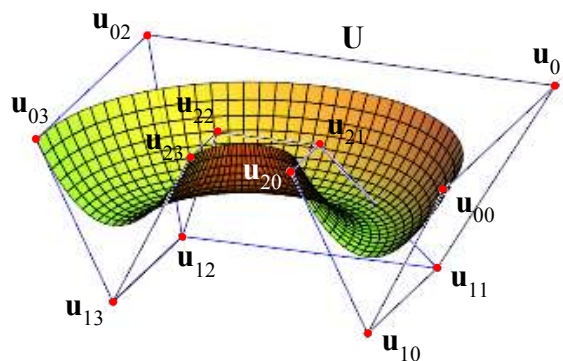


Рис. 8. Объединение поверхностей Безье

По точке  $\mathbf{p}_{rp} = \mathbf{u}_{00}^{22}$  и четырем граничным вершинам кластеров  $\mathbf{v}_0 = \mathbf{u}_{13}^{11}$ ,  $\mathbf{v}_1 = \mathbf{u}_{13}^{21}$ ,  $\mathbf{w}_0 = \mathbf{u}_{32}^{11}$  и  $\mathbf{w}_1 = \mathbf{u}_{31}^{12}$  находим по (18) параметры разделения  $r = \rho = 0.5$ . Убедившись в выполнении теста (19), находим по (20) матрицу вершин ХПС

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} [8 \ 0 \ 0] & [8 \ 0 \ -12] & [-8 \ 0 \ -12] & [-8 \ 0 \ 0] \\ [5 \ -6 \ 0] & [5 \ -6 \ -7.5] & [-5 \ -6 \ -7.5] & [-5 \ -6 \ 0] \\ [2 \ 0 \ 0] & [2 \ 0 \ -3] & [-2 \ 0 \ -3] & [-2 \ 0 \ 0] \end{bmatrix}.$$

Сравнение с узловой матрицей той же поверхности из примера 3 (см. рис. 7, а) свидетельствует об избыточности модели со степенью  $n = 3$ , которая имеет реальное значение  $n = 2$ .

### Выводы

В результате предпринятых усилий разработаны матричные алгоритмы разделения и объединения линий и поверхностей Безье. Получены условия, при которых становятся возможными как эти операции редактирования составных объектов Безье, так и получение минимальных порядков кластеров данных графических объектов.

### Библиографический список

1. **Никулин, Е.А.** Новый метод изменения порядков кривых и поверхностей Безье // Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева; НГТУ. – Н. Новгород. 2011. № 1 (86). С. 70–77.
2. Компьютерная геометрия: учеб. пособие для студ. вузов / Н.Н. Голованов [и др.]. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 512 с.
3. **Роджерс, Д.** Математические основы машинной графики / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

*Дата поступления  
в редакцию 06. 04.2012*

**Е.А. Nikulin**

### MATRIX BASED METHODS OF COMPOSITE BÉZIER OBJECTS RECLUSTERIZATION

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

**Subject:** modification algorithms for node networks which are used to create compound lines and Bézier surfaces, allowing to randomly change cluster count and dimensions keeping segment shape unchanged, are developed.

**Purpose:** on the one hand it is to increase a modification flexibility of compound Bézier objects while increasing cluster count and dimensions, on the other hand it is to simplify as much as possible their models due to reducing cluster count and dimensions.

**Methodology:** proposed reclusterization algorithms use a matrix based approach which provides a single short formula to recalculate clusters increasing their size as well as reducing it.

**Originality/value:** methods developed in the present study allow to increase cluster dimensions to any value and decrease them to limiting values keeping the Bézier object shape intact.

**Findings:** the article finds unique matrix-based algorithms for node network restructurization of compound lines and Bézier objects, which increases their utilization flexibility.

*Key words:* curve, surface, Bézier, polynom, segment, conjugation.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.9

А.И. Лаптев<sup>1</sup>, П.Э. Букин<sup>2</sup>, И.Н. Фролова<sup>2</sup>, В.В. Крайнов<sup>3</sup>

### СПОСОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ

ОАО «Гидромаш»<sup>1</sup>,  
ОАО ПКО «Теплообменник»<sup>2</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>3</sup>

Рассмотрен вопрос о единстве описания всех элементов технологической системы - станка, приспособления, инструмента, детали. Приведены функциональные схемы, предложены координатные коды для описания станка, инструмента, приспособления.

*Ключевые слова:* средства технологического оснащения, системы координат, координатные коды, базирование, формообразование.

Перед каждым предприятием машиностроительного профиля стоит задача автоматизации технической подготовки производства. В общем виде техническую подготовку производства можно представить как совокупность конструкторской подготовки производства, технологической подготовки производства и организационной подготовки производства.

Автоматизация конструкторской подготовки производства в настоящее время представлена CAD/CAE системами, которые позволяют существенно сократить сроки разработки конструкции нового изделия и повысить его качество.

Организационная подготовка производства также может быть автоматизирована системами MES, ERP, MRP.

Современные САПР ТП представляют возможности по автоматизации ведения технологической документации и автоматизации поиска техпроцессов-аналогов. На данный момент в системах САПР ТП привязка оборудования к технологическому процессу осуществляется вручную. По сути дела отсутствует автоматизация процесса выбора средств технологического оснащения для изготовления изделия. Следовательно, не правомочно говорить об автоматизации процесса технологического проектирования без автоматизации процедуры выбора средств технологического оснащения.

Для выбора средств технологического оснащения необходимо знать:

- из чего выбирать (база данных средств технологического оснащения);
- для чего выбирать (информация о детали: вид поверхности, точность, качество поверхности);
- как выбирать (процедура выбора и оптимизация выбора по заданному критерию).

Решение первого вопроса – создание баз данных средств технологического оснащения. На первый взгляд весьма простая процедура, однако содержание этих баз данных должно соответствовать некоторым требованиям, а именно:

- содержать информацию о средствах технологического оснащения в виде, обеспечивающем привязку средств технологического оснащения к детали и друг к другу (приспособления к станку, инструмента к приспособлению);

- иметь возможность легкого проведения дополнения и изменения;
- иметь привязку к системам организационной подготовки производства.

Информация о поверхностях детали должна поставляться непосредственно с САД-системы и должна автоматически приводиться к единому для всей технологической системы виду.

Предлагаемый метод автоматизации выбора средств технологического оснащения базируется на единстве описания всех элементов технологической системы (станка, приспособления, инструмента, детали).

Для описания элементов технологической системы необходимо рассмотреть структуру каждого элемента в отдельности. Анализ элементов структуры поможет выявить метод общего их описания.

Функции элементов технологической системы приведена на рис. 1–3.

Из рис. 1–3 видно, что элементы технологической системы имеют схожие функции (с точки зрения технологии), которые можно описать как функцию базирования и функцию формообразования. Цепочка выбора элементов технологической системы выглядит следующим образом:

- анализ обрабатываемой поверхности. Как итог – множество движений формообразования (так как поверхность можно получить различными способами и для различной модели инструмента – точечной, линейной, поверхностной). Сравнивая потребные движения формообразования с движениями формообразования имеющегося оборудования можно выделить множество возможного оборудования для обработки заданной поверхности или выявить невозможность обработки на имеющемся оборудовании;
- анализ технологических баз детали. Сравнивая технологические базы детали с описанием подсистемы базирования заготовки на станке, делаем вывод о возможности закрепления детали на данной единице оборудования. Тем самым сужаем множество возможного оборудования для обработки детали;
- анализ баз приспособления. Приспособление, как переходный элемент между оборудованием и инструментом (деталью), имеет два комплекта баз. Первый комплект характеризует применимость данного приспособления на данном оборудовании (т.е. возможно ли закрепить приспособление на станке), второй – применимость данного приспособления для базирования данного инструмента (детали). Поскольку выбор приспособления для базирования данного инструмента (детали). Поскольку выбор приспособления ограничивается как оборудованием, так и инструментом (деталью), целесообразно приспособление выбирать последним, после определения множеств остальных элементов технологической системы;
- анализ инструмента. Первым признаком инструмента является модель формообразования, осуществляемая этим инструментом. Модель формообразования принимается на этапе анализа обрабатываемой поверхности. Тем самым значительно ограничивается множество инструмента. Второе ограничение возникает после определения множества оборудования. Оборудование ограничивает возможные движения инструмента. Если оборудование не способно воспроизвести заданные движения формообразования, делают вывод о неприменимости данной связки оборудование – инструмент, или об использовании приспособления, восполняющего недостающие движения формообразования (револьверная головка с приводом инструмента на токарных обрабатывающих центрах).



Рис. 1. Функциональная схема станка





Рис. 2. Функциональная схема приспособления

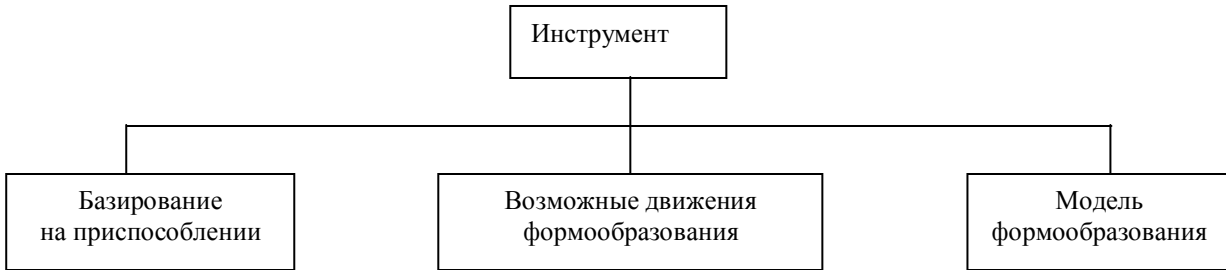


Рис. 3. Функциональная схема инструмента

Идея автоматизированного выбора средств технологического оснащения базируется на сравнении потребных баз с имеющимися, и потребных движений формообразования с имеющимися. Поскольку базы являются поверхностями, а поверхности получаются совокупностью движений направляющей и образующей, можно рассмотреть единый математический аппарат для анализа как баз, так и движений формообразования. Поскольку описания функций элементов технологической системы производятся в собственной системе координат (оборудования, инструмента или приспособления), необходимо совершать перевод собственной системы координат в глобальную. Такой перевод можно рассматривать как движение собственной системы координат до совмещения с глобальной, т.е. математический аппарат для перехода к глобальной системе координат един с аппаратом анализа баз и движений формообразования.

При рассмотрении заданных движений (станка, приспособления, систем координат) удобно представлять систему как совокупность систем координат. Начало  $O$  и оси  $X, Y, Z$  системы координат при этом увязываются с конструктивными или технологическими базами элемента технологической системы. Такими базами преимущественно являются направляющие, шпиндельные опоры, точно обработанные плоскости и цилиндрические поверхности.

Твердое тело, как известно, может иметь шесть степеней свободы. Поскольку звенья технологической системы обладают лишь одной степенью свободы в относительном движении, то с каждым звеном однозначно связывается один из приведенных в табл. 1 символов.

Таблица 1

Обозначение координатных движений

	Движение	Символ движения
Поступательное движение	Вдоль оси $X$	1
	Вдоль оси $Y$	2
	Вдоль оси $Z$	3
Вращательное движение	Вдоль оси $X$	4
	Вдоль оси $Y$	5
	Вдоль оси $Z$	6

Рассмотрим в качестве примера технологическую систему, состоящую из токарного станка, цилиндрической заготовки и нескольких резцов. Токарный станок имеет собственную систему координат, привязанную к оси шпинделя (рис. 4). В этой системе координат, движения формообразования (движения узлов станка) в соответствии с табл. 1 имеют вид: 631.

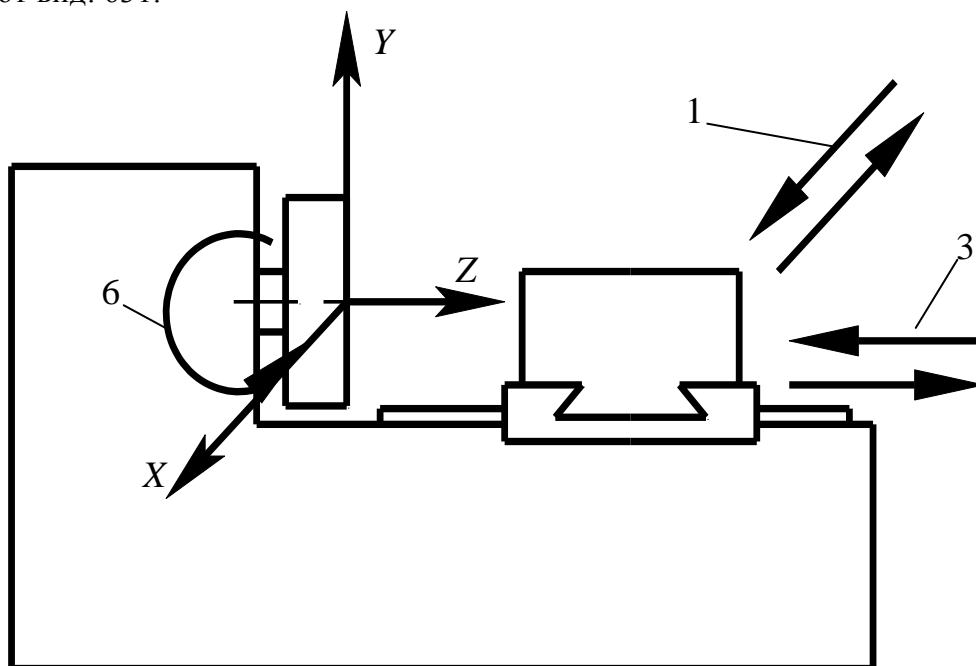


Рис. 4. Собственная система координат токарного станка и движения формообразования

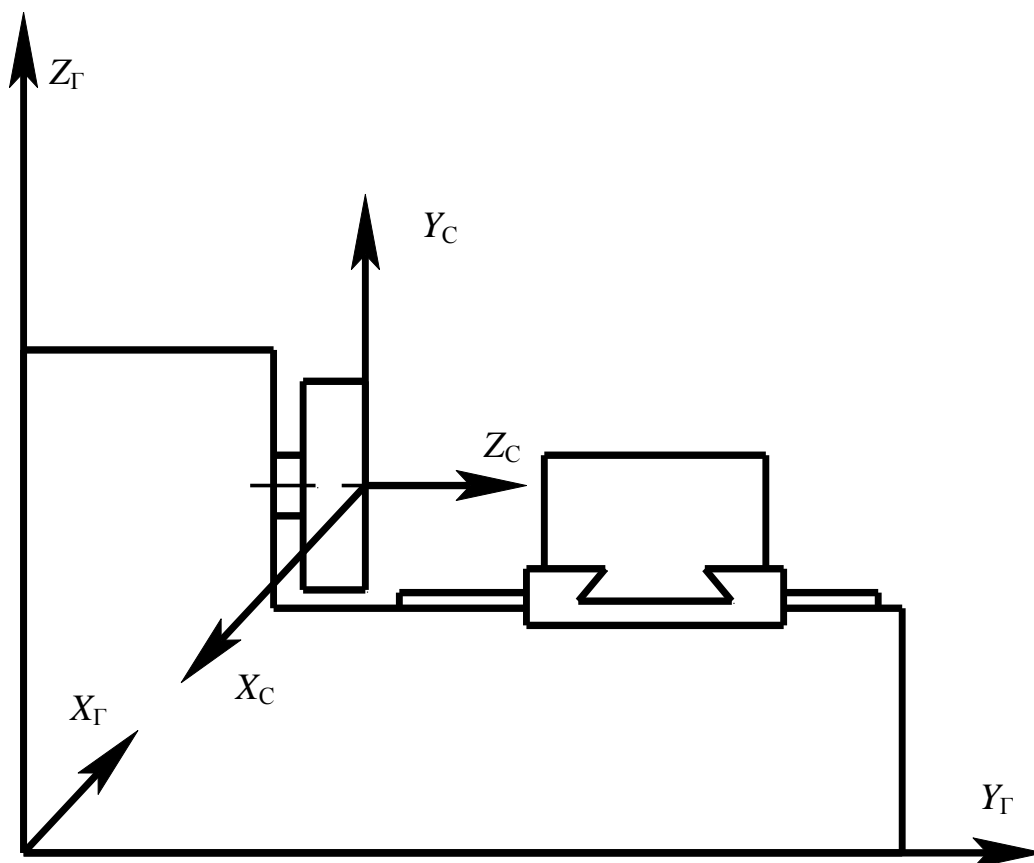


Рис. 5. Переход от собственной системы координат станка к глобальной

Базирование заготовки в патрон осуществляется по цилиндрической поверхности, которая получается совокупностью вращательного и поступательного движений. В системе координат станка такой состав движений отражается символами 63 (порядок значения не имеет, при любом сочетании заданного вращательного и поступательного движений получается цилиндрическая поверхность).

Базирование инструмента осуществляется в резцедержатель по плоским поверхностям. Плоская поверхность описывается сочетанием двух прямолинейных движений. В системе координат станка базовая плоскость ZX опишется как 13.

При переходе к глобальной системе координат система координат станка совершит поворот (один или несколько) до совмещения с глобальной. Пусть глобальная система координат ориентирована, как показано на рис. 5 (индексами С отмечена собственная система координат, индексами Г - глобальная).

Переход от собственной системы координат к глобальной осуществляется с помощью поворота собственной системы координат вокруг оси X на  $+90^\circ$ , затем поворота полученной переходной системы координат вокруг оси Z на  $180^\circ$ . Таким образом, оператор перехода к глобальной системе координат кодируется как 466 (один символ означает поворот на  $90^\circ$ ). Поворот системы координат на  $180^\circ$  не влияет на изменение координатных кодов, поэтому его можно отбросить. Оператор перехода примет вид 4.

Можно сформулировать простое правило, благодаря которому с помощью координатного кода в собственной системе координат и оператора перехода можно получить координатный код в глобальной системе координат: при повороте системы координат вокруг оси на  $90^\circ$  символы координатного кода, характеризующие движение относительно этой оси не меняются, относительно других осей меняются местами. Т.е. при повороте собственной системы координат на 4, код 631 примет вид 521. Сформулированное правило можно свести в табл. 2 для удобства использования.

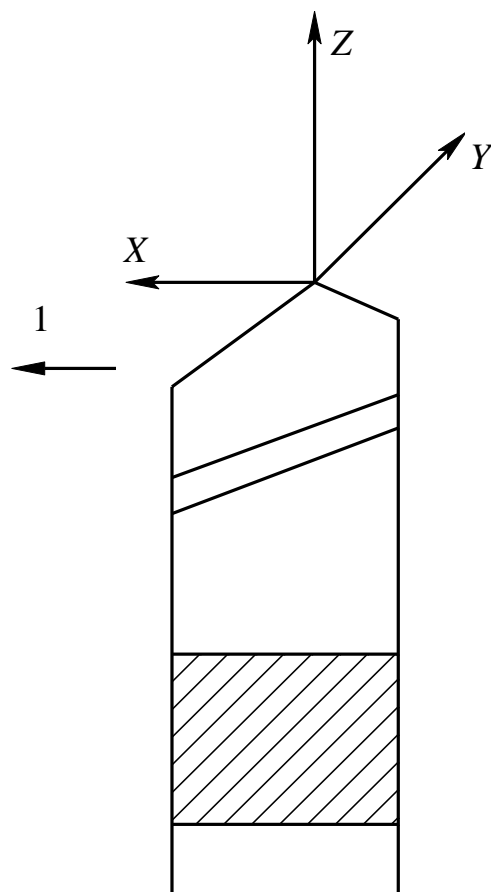
Координатный код базирования заготовки примет вид 52, базирования инструмента – 12.

Таблица 2

## Правило преобразования координатного кода

Исходный символ кода	Оператор поворота системы координат		
	4	5	6
1	1	3	2
2	3	2	1
3	2	1	3
4	4	6	5
5	6	5	4
6	5	4	6

Токарный резец с державкой прямоугольного сечения базируется по плоскостям. Систему координат инструмента примем, как показано на рис. 6. Система координат приведена в вершину резца (принято что резец производит формообразование по точечной модели. Рассмотрение модели формообразования и связанных с ней координатных преобразований выходит за рамки данной статьи). Координатный код базирования резца имеет вид 13. Координатный код разрешенных движений формообразования (возможных движений подачи) – 1. Резец устанавливается в резцедержатель станка таким образом, чтобы ось Z резца совпала с осью X собственной системы координат станка (рис. 4, 6). Оператор преобразования системы координат резца в собственную систему координат станка имеет вид 5 (рис. 7). Координатный код базирования инструмента в системе координат станка примет вид 31, координатный код разрешенных движений формообразования в системе координат станка примет вид 3.



**Рис. 6. Собственная система координат токарного резца с державкой прямоугольного сечения**

Резцовая головка с аналогичной режущей частью имеет координатный код базирования 63 (базирование по цилиндрической поверхности) в собственной системе координат инструмента и координатный код разрешенных движений формообразования 1. В собственной системе координат станка координатный код базирования инструмента примет вид 41, координатный код разрешенных движений формообразования – 3.

Проанализируем полученные данные. Сведем в табл. 3 данные по станку и инструментам. Инструмент 1 – резец токарный с державкой прямоугольного сечения, инструмент 2 – резцовая головка. Формообразующие возможности инструментов одинаковы. Однако резцовая головка имеет базирующую подсистему, несовместимую с базирующей подсистемой станка, что отражено в несовпадении координатных кодов базирующих подсистем.

Анализируя табл. 3, можно сделать вывод, что выбор средств технологического оснащения может осуществляться в автоматическом режиме. Кодирование инструмента осуществляется по каталогу (в современных каталогах указываются формообразующие возможности инструмента), как и кодирование станка. Специальных навыков для этого не требуется.

**Таблица 3**

**Анализ возможностей использования инструмента на оборудовании**

Характеристики	Координатные коды в собственной системе координат станка		
	Станок	Инструмент 1	Инструмент 2
Базирование	13	31	41
Формообразующие возможности	31	3	3

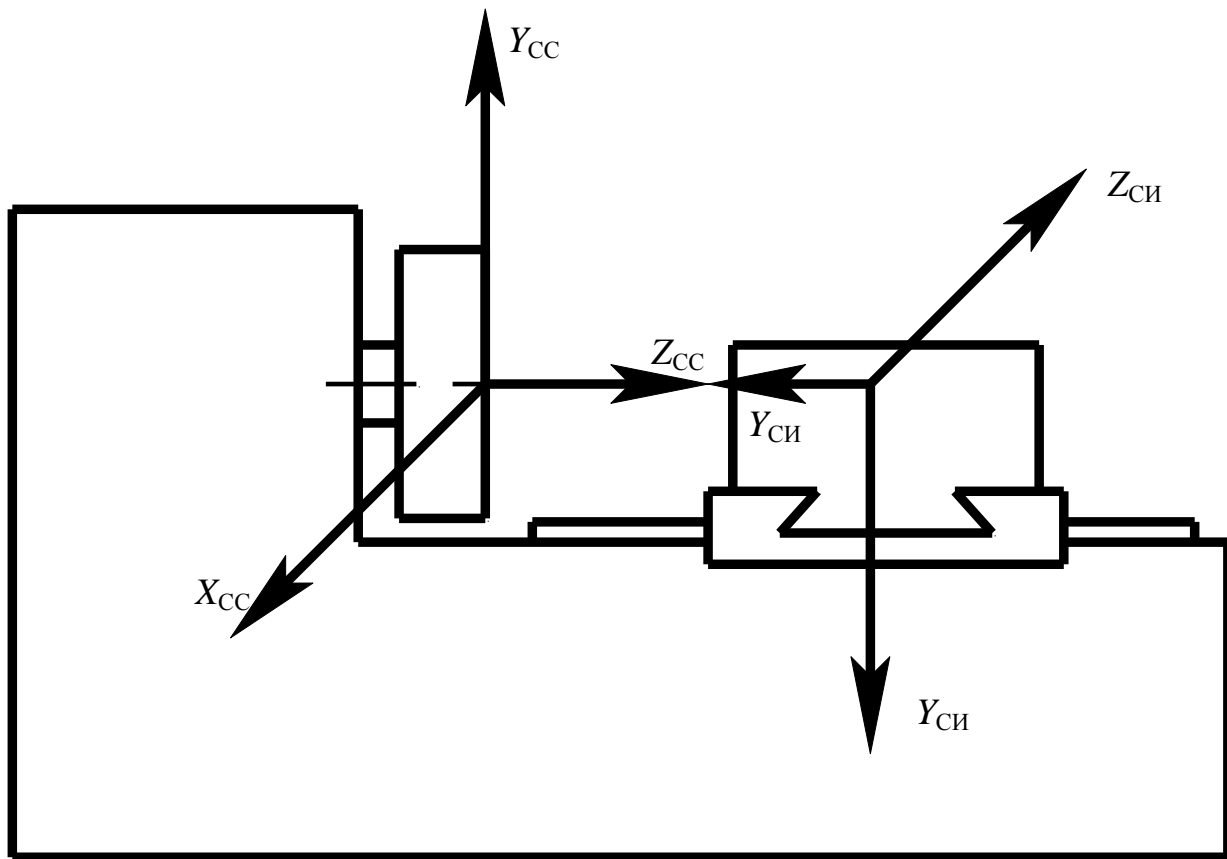


Рис. 7. Собственные системы координат станка (СС) и инструмента (СИ)

### Выводы

1. На сегодняшний день САПР ТП не автоматизирует выбор средств технологического оснащения, что значительно тормозит автоматизацию технологической подготовки производства.
2. Выбор средств технологического оснащения может осуществляться в автоматическом режиме без участия технолога при соответствующем кодировании элементов технологической системы.
3. Предложенная методика кодирования элементов технологической системы проста в использовании (для кодирования станка и инструмента нет нужды в специальных навыках, кроме навыков работы с каталогами станко-инструментальных фирм) и использует единый математический аппарат для любого элемента системы.

*Дата поступления  
в редакцию 18.04.2012*

**A.I. Laptev, P.E. Bukin, I.N. Frolova, V.V. Kraynov**

### SELECTION PROCESS AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

**Purpose:** To automate the procedure of selection of the technological equipment ( a procedure that underlines the construction of the technological process of machining) with reference to the CAD system, i. e. in the space of a unitary 3D model of the product.

---

**Method/Approach:** Tree pillars of metal-processing system ( machine tool, equipment tool, cutting tool) are encoded in a special way on the stage of adding them into the technological database. The algorithm automatically combines coordinate code of these elements, receiving a combination. The resulting combinations are compared with the coordinate source of the elementary surfaces that make up the detail/ The coincidence of these codes means that the surface can be treated with a combination of these machines, appliances and tools.

**Consequences:** Automatic selection of the machine tool, equipment tool, cutting tool available or deciding that the surface can not be machined on existing equipment. Analysis of multiple surfaces that make up the detail design process will allow them to be machined with one installed.

**Meaning:** the ability to create an algorithm of automatic design workflow process based on the 3D model of the part and database machine tool, equipment tool, cutting tool, available at the company.

*Key words:* automation, workflow, coordinate code, 3D model, machine tool, equipment tool, cutting tool.

УДК 531.535

С.Е. Пилипосян

## ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ПРОИЗВОЛЬНОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведена оценка погрешностей измерений момента инерции неоднородного твердого тела, проведенных по методу регистрации периодов колебаний.

В измерениях применяются двойной жесткий подвес, секундомер, линейка и угломер. Выявлены условия эксперимента, в которых погрешности измерений минимальны и не превышают 0,5%.

*Ключевые слова:* момент инерции неоднородного твердого тела, физический маятник, двойной жесткий подвес, погрешность измерения коррелированных случайных величин, функция Н.Е. Жуковского.

### Введение

Сложность геометрических форм и неоднородность выпускаемых изделий и механизмов затрудняют теоретический расчет важных характеристик этих тел - момента инерции и положения центра масс. В настоящее время успешно применяются различные методы, позволяющие измерить момент инерции и находить точку центра масс как для гигантских гидротурбин, самолетов, вагонов скоростных поездов, автомобилей так и для миниатюрных элементов часового механизма. Для каждого изделия (или его макета) применяется определенная методика и создается специальная установка, учитывающая его массу, размеры, форму и обеспечивающая минимальные погрешности в измерениях момента инерции.

В работе [1] показано, что метод регистрации периода колебаний для изделий или их макетов, обладающих радиусом инерции  $R_c < 0,50$  м (относительно центральной оси выбранного направления), обеспечивает большую точность, чем метод измерения приведенной длины. В приложении приведено описание методики и схема экспериментальной установки (подробнее см. [1]), позволяющих измерить момент инерции неоднородного тела с точностью не ниже 0,5 % и находить точку его центра масс с погрешностью не более чем 1 мм.

Такие измерения позволяют еще в стадии проектирования изделий (автомобилей, летательных аппаратов, вагонов, кораблей и т. д.) решить вопросы их маневренности (момент инерции) и устойчивости (положение центра масс). Высокая точность измерений требует всесторонней и точной оценки статистических и систематических погрешностей измерений, что позволяет уточнить соответствующие оценки, приведенные в работе [2].

### 1. Производные периода колебаний и чувствительность метода

Если центральная ось инерции твердого тела массы  $m$  фиксирована, то его центральный момент инерции  $J_c$  и радиус инерции  $R_c$  относительно выбранной оси являются константами:  $J_c = mR_c^2$ . Период малых колебаний такого физического маятника вокруг оси, параллельной к выбранной центральной оси и находящейся от нее на расстоянии  $a$ , имеет вид

$$T_0(R_c, a) = \sqrt{4\pi^2 R_c (a/R_c + R_c/a) / g} = \sqrt{4\pi^2 R_c (\lambda + \lambda^{-1}) / g} = \sqrt{C(\lambda + \lambda^{-1})} = T_0(R_c, \lambda), \quad (1)$$

где  $\lambda = a/R_c$  – безразмерный параметр, удобный для дальнейшего рассмотрения.

В этом случае между переменными  $a$  и  $\lambda$  устанавливается взаимно однозначная связь и для описания движения физического маятника они являются равносильными:

$$a = R_c \lambda, \quad da = R_c d\lambda, \quad \Delta a = R_c \Delta \lambda, \quad \Delta T_0 = (dT_0 / da) \Delta a = (dT_0 / d\lambda) \Delta \lambda.$$

В теории функций комплексного переменного выражение  $w = 0,5(z + 1/z)$ , где  $z = x + iy$  – комплексное число, называют функцией Н.Е. Жуковского [3], ввиду того, что он весьма

успешно применил эту функцию для решения многих важных практических задач. Из формулы (1) видно, что при  $R_c=0,125$  м, когда  $T_{min}=1$  с, период колебаний можно представить в виде

$$T_0(R_c, \lambda) = \sqrt{(4\pi^2 R_c / g)(\lambda + \lambda^{-1})} \cong \sqrt{0,5(\lambda + \lambda^{-1})} = \sqrt{w}, \quad \text{или} \quad T_0^2 = w.$$

Если  $0 < \lambda \leq 1$  или  $1 \leq \lambda < \infty$ , то связь  $T_0$  и  $\lambda$  является взаимно однозначной [3]. По-видимому, обсуждаемую здесь задачу можно считать еще одним приложением функции Жуковского для действительного переменного  $\lambda$ .

Постоянство  $R_c$  означает, что если для расстояния  $a_1$  период колебаний равен  $T_{01}$ , то для расстояния  $a_2$  получим такое значение периода  $T_{02}$ , которое удовлетворяет равенству

$$R_c^2 = a_1 T_{01}^2 g / (4\pi^2) - a_1^2 = a_2 T_{02}^2 g / (4\pi^2) - a_2^2.$$

Или 
$$a_2 T_{02}^2 - a_1 T_{01}^2 = (a_2^2 - a_1^2) 4\pi^2 / g = (a_2 - a_1)(a_2 + a_1) 4\pi^2 / g.$$

Для отношения приращений величин  $T_0$  и  $a$ , с учетом (1) получим

$$\frac{\Delta T_0}{\Delta a} \cong \frac{dT_0(R_c, \lambda)}{da} = \frac{\pi}{\sqrt{gR_c}} \frac{(\lambda - \lambda^{-1})}{\sqrt{\lambda + \lambda^3}}. \tag{2}$$

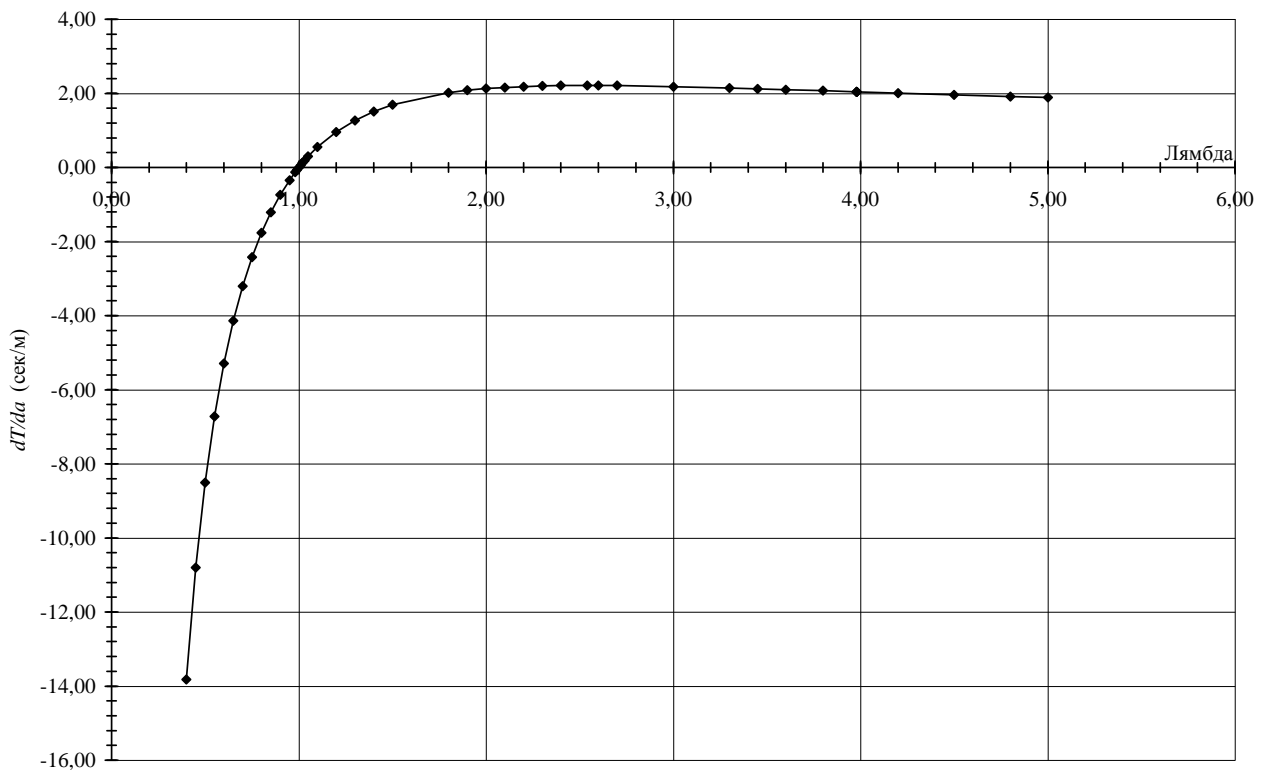


Рис. 1. Зависимость  $dT_0/da$  от  $\lambda$

Если  $a > R_c$ , то  $dT_0/da > 0$ , а когда  $a < R_c$ , то  $dT_0/da < 0$  (рис. 1). Кроме того,

$$\frac{dT_0}{da} = \begin{cases} -\infty, & \text{если } a \rightarrow 0 \quad (\lambda \rightarrow 0) \\ 0, & \text{если } a = R_c \quad (\lambda = 1) \\ 0, & \text{если } a \rightarrow \infty \quad (\lambda \rightarrow \infty) \end{cases}. \tag{3}$$



Из рис. 1 видно, что когда  $\lambda$  существенно меньше единицы, нахождение расстояния  $a$  путем измерения периода колебаний  $T_0$  (с заданной погрешностью  $\Delta T_0$ ), позволяет более точно определить  $a$ , поскольку небольшое изменение  $a$  приводит к значительному изменению  $T_0$ .

Момент инерции тела с массой  $m$  относительно оси вращения, параллельной к заданной центральной оси тела и находящейся от нее на расстоянии  $a$  представляется выражением

$$J = maT_0^2 g / (4\pi^2) = J_c + ma^2 = mR_c^2 + ma^2 = m(R_c^2 + a^2),$$

где  $T_0$  – период гармонических колебаний твердого тела. Следовательно,

$$J_c = maT_0^2 g / (4\pi^2) - ma^2 = mR_c^2. \tag{4}$$

Момент инерции тела можно представить в виде функции

$$J = J(m, a, T_0) \text{ или } J = J(m, a, R_c).$$

Центральный момент инерции  $J_c$  в этом случае оказывается функцией двух переменных  $m, R_c$ . Величина  $T_0$  в этих условиях является однозначной функцией расстояния  $a$ .

Следовательно,  $T_0$  и  $a$  не являются независимыми переменными.

Погрешность измерения  $J_c$  необходимо оценить с учетом этой связи.

Дифференцируя выражение (4) для  $J_c$  по  $a$ , найдем зависимость приращения  $J_c$  от изменения расстояния  $a$  на  $\Delta a$ . Если считать, что  $m, g, \pi$ , известные с большой точностью, константы, то получим

$$\Delta J_c = \frac{\partial J_c}{\partial a} \Delta a = \left( \frac{2maT_0 g}{4\pi^2} \frac{dT_0}{da} + \frac{mT_0^2 g}{4\pi^2} - 2ma \right) \Delta a. \tag{5}$$

Относительное изменение значения  $J_c$ , если значение  $a$  изменилось на малую величину  $\Delta a$  и, вследствие этого, значение  $T_0$  изменилось на  $\Delta T$ , будет:

$$\begin{aligned} (\delta J_c)_{a,T} &= \frac{\Delta J_c}{J_c} = \frac{1}{J_c} \frac{\partial J_c}{\partial a} \Delta a = \left( \frac{2maT_0 g}{4\pi^2} \frac{dT_0}{da} + \frac{mT_0^2 g}{4\pi^2} - 2ma \right) \frac{\Delta a}{mR_c^2} = \\ &= \left( \frac{mg}{2\pi^2} a^2 T_0 \frac{dT_0}{da} + \frac{maT_0^2 g}{4\pi^2} - 2ma^2 \right) \frac{\Delta a}{mR_c^2 a} = \left( \frac{mg}{2\pi^2} a^2 T_0 \frac{dT_0}{da} + J_c - ma^2 \right) \frac{\Delta a}{mR_c^2 a}. \end{aligned}$$

С учетом формулы (2), получим

$$\begin{aligned} (\delta J_c)_{a,T} &= \left( \frac{mg}{2\pi^2} a^2 T_0 \frac{dT_0}{da} + mR_c^2 - ma^2 \right) \frac{\Delta a}{mR_c^2 a} = \left( \frac{g}{2\pi^2} \lambda^2 T_0 \frac{dT_0}{da} + 1 - \lambda^2 \right) \frac{\Delta a}{R_c \lambda} = \\ &= \left( \frac{\sqrt{g}}{2\pi \sqrt{R_c} \sqrt{\lambda}} T_0 \frac{(\lambda^2 - 1)}{\sqrt{(1 + \lambda^2)}} + 1 - \lambda^2 \right) \frac{\Delta a}{R_c \lambda} = \frac{g}{2\pi^2} \frac{\lambda}{R_c} T_0 \frac{dT_0}{da} \Delta a - \frac{(\lambda - \lambda^{-1})}{R_c} \Delta a = \\ &= \frac{\sqrt{g}}{\pi \sqrt{R_c}} \lambda \sqrt{\lambda^{-1} + \lambda} \Delta T_0 - \frac{(\lambda - \lambda^{-1})}{R_c} \Delta a = \left( \sqrt{(1 + \lambda^2)} \frac{(\lambda^2 - 1)}{\sqrt{(1 + \lambda^2)}} + 1 - \lambda^2 \right) \frac{\Delta a}{R_c \lambda} = 0. \end{aligned} \tag{6}$$

То есть истинное значение  $J_c$  не зависит от значения  $a$ , если расстояние  $a$  и соответствующее значение периода колебаний  $T_0$  измерены без погрешностей. Однако на эксперименте измерение  $T_0$  и  $a$  производится независимо и с ненулевой погрешностью. Следова-

тельно, несмотря на то, что измеряемые переменные  $T_0$  и  $a$  жестко связаны, тем не менее, измерения их значений с погрешностью  $\Delta T_0$  и  $\Delta a$ , соответственно, не зависят друг от друга.

Чтобы выяснить, связаны ли знаки их отклонений от соответствующих средних значений  $(\bar{T}_0 \pm \Delta T_0, \bar{a} \pm \Delta a)$  или  $(\bar{T}_0 \pm \Delta T_0, \bar{a} \mp \Delta a)$ , необходимо провести множество совместных измерений этих величин в одних и тех же условиях эксперимента и, рассчитав коэффициент корреляции, убедиться, что в обсуждаемой нами задаче для этой пары величин он имеет отрицательное значение [4, 5]

$$R(T_0, a) = \frac{(\overline{T_0 - \bar{T}_0})(\overline{a - \bar{a}})}{\sigma(T_0)\sigma(a)} < 0. \quad (7)$$

Если предположить, что случайная величина  $J_c = J_c(m, a, T_0)$  распределена по нормальному закону, то на основании выражения (6), получим

$$\begin{aligned} (\delta J_c)_{a,T} &= \left( \frac{m a^2 T_0 g}{2\pi^2} \frac{dT_0}{da} + m R_c^2 - m a^2 \right) \frac{\Delta a}{m R_c^2 a} = \frac{\lambda^2 T_0 g}{2\pi^2 a} \frac{dT_0}{da} \Delta a + (1 - \lambda^2) \frac{\Delta a}{a} = \\ &= \frac{\lambda^2 T_0 g}{2\pi^2 \lambda R_c} \Delta T_0 + (1 - \lambda^2) \frac{\Delta a}{\lambda R_c} = \sqrt{\frac{g}{R_c}} \frac{\lambda \sqrt{\lambda^{-1} + \lambda}}{\pi} \Delta T_0 + \frac{(\lambda^{-1} - \lambda)}{R_c} \Delta a. \end{aligned} \quad (8)$$

При условии независимости погрешностей  $\Delta T_0$  и  $\Delta a$ , можно считать, что

$$|(\delta J_c)_{a,T}| = \sqrt{(\delta J_c)_T^2 + (\delta J_c)_a^2} = \sqrt{\left( \sqrt{\frac{g}{R_c}} \frac{\lambda \sqrt{\lambda^{-1} + \lambda}}{\pi} \Delta T_0 \right)^2 + \left( \frac{(\lambda^{-1} - \lambda)}{R_c} \Delta a \right)^2}. \quad (9)$$

Из этой формулы, следует, что когда  $\lambda = a/R_c = 1$ , то есть когда значение  $a = R_c = \text{const}$ , относительная погрешность измерения  $(\delta J_c)_{a,T}$  определяется только погрешностью измерения времени  $\Delta T_0$ . Для тела с радиусом инерции  $R_c = 0,125\text{м}$  она принимает значение

$$|(\delta J_c)_{a,T}| = \sqrt{\frac{2g}{\pi^2}} \frac{1}{\sqrt{R_c}} \Delta T_0 \cong \frac{1,4}{\sqrt{0,125}} \Delta T_0 = 1,4\sqrt{8} \Delta T_0 = 3,96 \cdot \Delta T_0. \quad (10)$$

При  $\Delta T_0 \cong 0,001\text{с}$ , получим

$$|(\delta J_c)_{a,T}| = 3,96 \cdot \Delta T_0 \cong 0,4\%. \quad (11)$$

Относительная погрешность, связанная с измерением массы тела, будет

$$J_c = m a \frac{T_0^2 g}{4\pi^2} - m a^2 = m R_c^2, \quad (\delta J_c)_m = \frac{1}{J_c} \frac{\partial J_c}{\partial m} \Delta m = \frac{1}{m R_c^2} R_c^2 \Delta m = \frac{\Delta m}{m}. \text{ Следовательно,}$$

$$|(\delta J_c)_{m,a,T}| = \sqrt{(\delta J_c)_m^2 + (\delta J_c)_T^2 + (\delta J_c)_a^2} = \sqrt{\left( \frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left( \sqrt{\frac{g}{\pi^2 R_c}} \lambda \sqrt{\lambda^{-1} + \lambda} \Delta T_0 \right)^2 + \left( \frac{(\lambda^{-1} - \lambda)}{R_c} \Delta a \right)^2}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что при  $\lambda = 1, R_c \leq 0,125\text{м}, \Delta T_0 \cong 0,001\text{с}$  и  $\Delta m/m \cong 0,1\%$ , относительная погрешность измерения момента инерции главным образом определяется абсолютной погрешностью измерения периода колебаний. Пусть значения величин  $\pi, g, m, R_c, T_0, a$  нам известны абсолютно точно. Тогда изменение значения  $a$  на  $\Delta a$  приведет к такому изменению значения  $T_0$ , что центральный момент инерции останется неизменным. Приравнивая правую часть (12) к нулю, снова приходим к равенству (2)

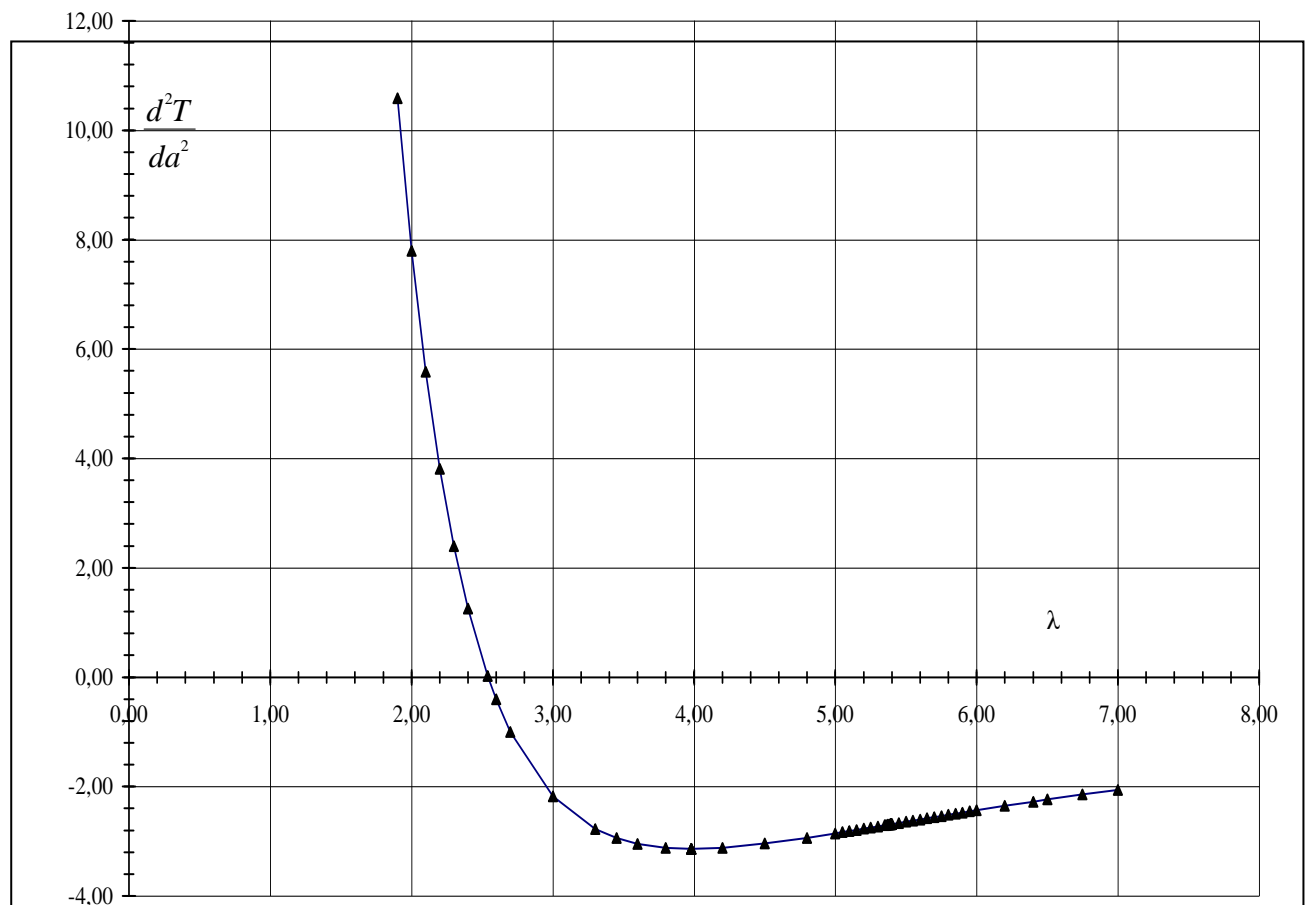
$$\frac{\Delta T_0}{\Delta a} \cong \frac{dT_0(R_c, \lambda)}{da} = \frac{\pi}{\sqrt{gR_c}} \frac{(\lambda - \lambda^{-1})}{\sqrt{\lambda + \lambda^3}}.$$

Это равенство показывает, насколько и в какую сторону (уменьшения или увеличения) сдвинется истинно среднее значение гауссова распределения периода малых колебаний  $T_0$  твердого тела, обладающего радиусом инерции  $R_c$ , если истинно среднее значение гауссова распределения расстояния центральной оси тела от оси его вращения  $a=R_c\lambda$  изменится на величину  $\Delta a=R_c\Delta\lambda$ . График этой зависимости в области определения  $0 \leq \lambda \leq \infty$  является важной характеристикой обсуждаемого метода измерения момента инерции твердого тела (рис. 1).

В этой связи представляют интерес производные более высокого порядка  $d^n T_0(R_c, \lambda) / da^n$ , являющиеся непрерывными функциями, обладающими двумя асимптотами и одним экстремальным значением (см. рис. 2–4).

В табл. 1 для заданного значения  $\Delta a=0,001\text{м}$  (абсолютная погрешность измерения расстояния от оси вращения),  $R_c=0,05\text{м}$ ,  $\alpha=\Delta a/R_c=0,02$ ,  $\Delta T=0,001\text{сек}$  (абсолютная погрешность измерения периода колебаний), и текущего значения  $\lambda$ , приведены значения величин  $T, L_{\text{уп}}, \frac{dT}{da}, \frac{d^2T}{da^2}, \frac{d^3T}{da^3}, \frac{d^4T}{da^4}$ . Величина  $\lambda$  по необходимости меняется с небольшим шагом  $\Delta\lambda=0,000001$  в интервале значений  $0,05 < \lambda < 100,0$ .

Поставленную в этой работе задачу лучше решить, выполняя два измерения при разных значениях  $a_0$ . Сначала находим значение  $d$  для расстояния  $a_0$ , удовлетворяющего условию  $\lambda = a/R_c = (a_0 + d)/R_c \cong 0,5$ . Большое значение  $k$  обеспечивает высокую точность определения  $d$  (рис. 1). Момент инерции в этих условиях, как следует из (12), определяется с относительной погрешностью  $(\delta J_c)_{m,a,T} \approx 3\%$ . После нахождения центральной оси проводится ещё одно измерение при  $\lambda = a/R_c = (a_0 + d)/R_c \cong 1,0$ , обеспечивающее высокую точность определения



$(\delta J_c)_{m,a,T} \approx 0,5\%$  (на рис. 5 видно, что при  $0,95R_c \leq a \leq 1,05R_c$  значение  $\Delta J_c / J_c \approx 0,4\%$ ).

**Рис. 2. Зависимость  $d^2T_0/da^2$  от  $\lambda$**

Согласно равенству (2) при  $\lambda = \frac{a}{R_c} = 1 \Rightarrow \frac{dT}{d\lambda} = 0$ .

Величина  $\frac{dT}{d\lambda} = R_c \frac{dT}{da}$  меняет знак при переходе точки  $\lambda = a/R_c = 1$ .

В интервале  $0 < \lambda < 1 \Rightarrow \frac{dT}{d\lambda} < 0, \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{dT}{d\lambda} = -\infty$ .

В интервале  $1 < \lambda < +\infty \Rightarrow \frac{dT}{d\lambda} > 0, \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \frac{dT}{d\lambda} = 0$ .

Следовательно, в интервале  $1 < \lambda < +\infty$  величина  $dT/d\lambda$  обладает максимумом (рис. 1) и в точке максимума вторая производная равняется нулю (рис. 2).

$$\frac{d^2T}{d\lambda^2} = R_c^2 \frac{d^2T}{da^2} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{R_c}{g}} \frac{(-\lambda^6 + 6\lambda^4 + 3\lambda^2)}{(\lambda^5 + \lambda^3)^{3/2}}. \quad (13)$$

Вторая производная равняется нулю, когда  $-\lambda^6 + 6\lambda^4 + 3\lambda^2 = 0$ . Ввиду того, что  $\lambda > 0$ , получаем равенство  $\lambda^4 - 6\lambda^2 - 3 = 0$ . Единственным физическим корнем этого уравнения является  $\lambda = 2.5424$ . В этой точке  $d^2T/d\lambda^2$  меняет знак с положительного на отрицательный (рис. 2). Величина  $d^2T/d\lambda^2$  достигает своего минимума при некотором значении  $\lambda$ , после чего с ростом  $\lambda \rightarrow +\infty$  монотонно стремится к нулю  $d^2T/d\lambda^2 \rightarrow -0$ . Чтобы найти значение  $\lambda$ , при котором  $d^2T/d\lambda^2$  принимает минимальное значение, вычислим величину  $d^3T/d\lambda^3$ .

$$\frac{d^3T}{d\lambda^3} = R_c^3 \frac{d^3T}{da^3} = \frac{3\pi}{4} \sqrt{\frac{R_c}{g}} \frac{\lambda^4 (\lambda^6 - 15\lambda^4 - 13\lambda^2 - 5)}{(\lambda^5 + \lambda^3)^{5/2}}. \quad (14)$$

Когда  $\lambda \rightarrow +0$ , то величина  $d^3T/d\lambda^3 \rightarrow -\infty$ .

Когда  $\lambda \rightarrow +\infty$ , то величина  $\frac{d^3T}{d\lambda^3} \rightarrow \frac{3\pi}{4} \sqrt{\frac{R_c}{g}} \frac{1}{\lambda^{5/2}} \rightarrow +0$ .

Найдём значение  $\lambda$ , при котором  $\frac{d^3T}{d\lambda^3} = 0$ .

Для этого нужно решить уравнение  $\lambda^6 - 15\lambda^4 - 13\lambda^2 - 5 = 0$ . После обозначения  $y = \lambda^2$ , получим кубическое уравнение  $y^3 - 15y^2 - 13y - 5 = 0$ .

С помощью обозначения  $y = x + 5$  приведём его к виду  $x^3 - 88x - 320 = 0$ . Решив это уравнение методом Кардана [6], получим  $x = 10,84$ ;  $y = 15,84$ ;  $\lambda = 3,98$ .

В точке  $\lambda = 3,98$  величина  $d^3T/d\lambda^3$  меняет свой знак с отрицательного на положительный (рис. 3).

Далее, после достижения своего максимума,  $\frac{d^3T}{d\lambda^3}$  с ростом  $\lambda$  монотонно стремится к нулю, оставаясь положительным. Чтобы найти значение  $\lambda$  в точке этого максимума, продифференцируем  $\frac{d^3T}{d\lambda^3}$  по  $\lambda$  и приравняем к нулю.

$$\frac{d^4 T}{d\lambda^4} = R_c^4 \frac{d^4 T}{da^4} = \frac{3\pi}{8} \sqrt{\frac{R_c}{g}} \frac{\lambda^6 (-5\lambda^8 + 140\lambda^6 + 154\lambda^4 + 124\lambda^2 + 35)}{(\lambda^5 + \lambda^3)^{7/2}}. \quad (15)$$

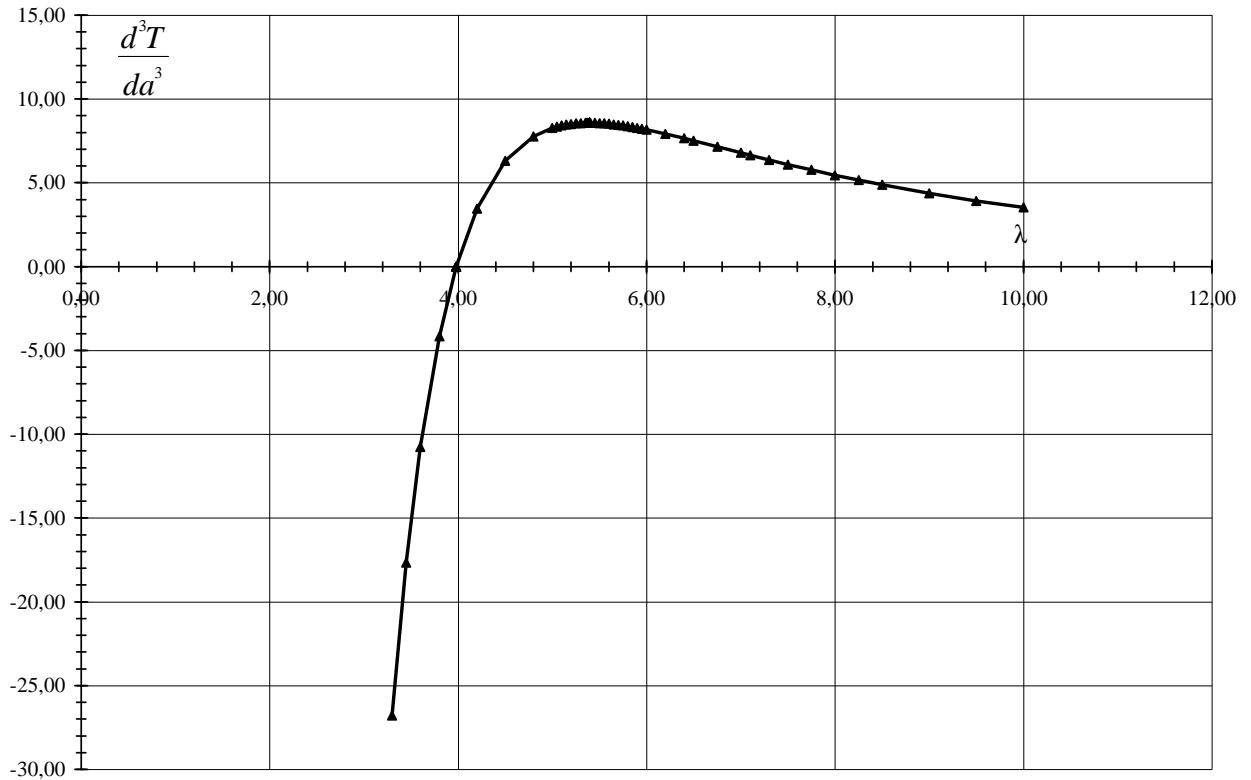


Рис. 3. Зависимость  $d^3T_0/da^3$  от  $\lambda$

Из выражения (15) видно, что когда  $\lambda \rightarrow +0$ , то величина  $\frac{d^4 T}{d\lambda^4} \rightarrow \frac{105\pi}{8} \sqrt{\frac{R_c}{g}} \frac{1}{\lambda^{9/2}} \rightarrow +\infty$ ,

когда  $\lambda \rightarrow +\infty$ , то величина  $\frac{d^4 T}{d\lambda^4} \rightarrow \frac{-15\pi}{8} \sqrt{\frac{R_c}{g}} \frac{1}{\lambda^{7/2}} \rightarrow -0$ .

Между этими асимптотическими предельными значениями функция  $\frac{d^4 T}{d\lambda^4}$  принимает нулевое значение, и при некотором значении  $\lambda$  достигает своего минимального значения (рис. 4).

Введя обозначение  $y = \lambda^2$ , в равенство  $-5\lambda^8 + 140\lambda^6 + 154\lambda^4 + 124\lambda^2 + 35 = 0$ , получим

$$y^4 - 28y^3 - \frac{154}{5}y^2 - \frac{124}{5}y - 7 = 0. \quad (16)$$

Решив (16), найдём значение  $\lambda$ , при котором  $\frac{d^3 T}{d\lambda^3}$  достигает максимума. На рис. 1–4

приведены графики функций  $\frac{dT}{da}$ ,  $\frac{d^2 T}{da^2}$ ,  $\frac{d^3 T}{da^3}$ ,  $\frac{d^4 T}{da^4}$  для испытуемого тела с радиусом инерции  $R_c = 0,05$  м в зависимости от переменной  $\lambda$ . Если привести эти графики для тела с радиусом инерции  $R_c = 1$  м (когда  $a = \lambda \cdot 1$  м), то эти же функции для тела с другим значением радиуса инерции  $R_c$  можно получить простым умножением на соответствующую степень  $R_c$ .

Систематическая относительная погрешность измерения  $J_c$ , связанная с немалым значением амплитуды угла отклонения физического маятника, представляется выражением

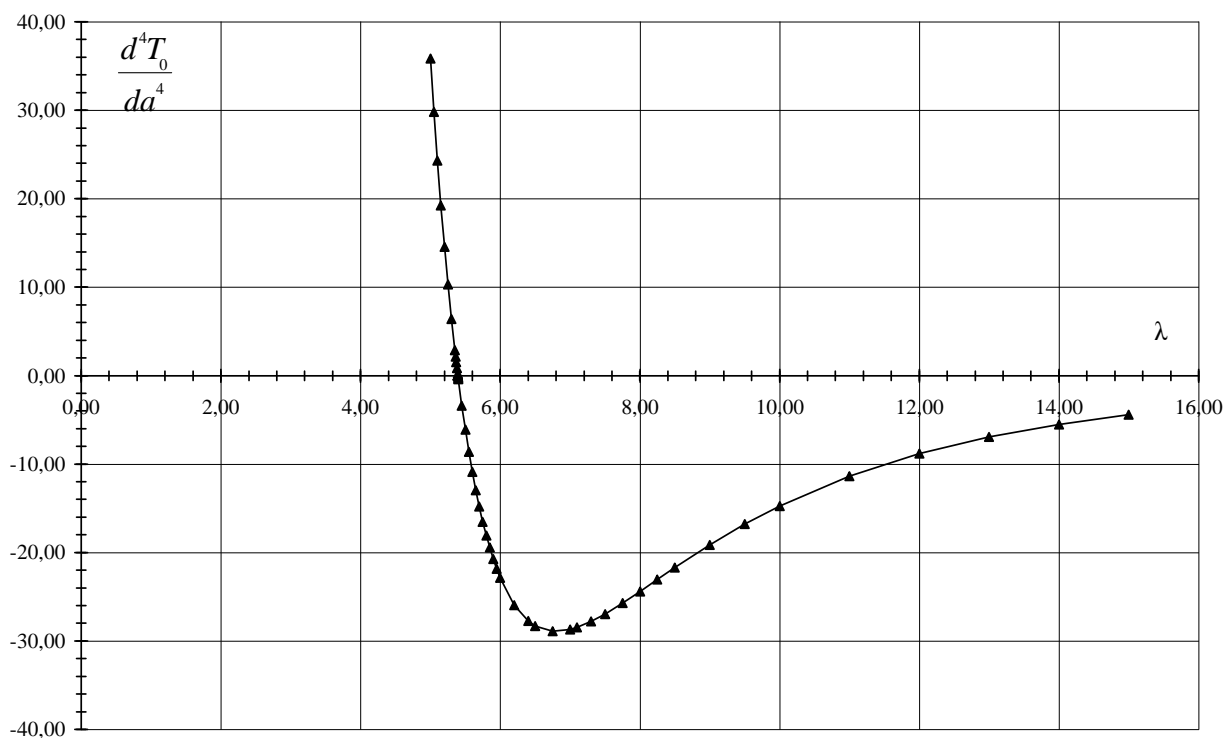
$$(\delta J)_{c,\varphi} = \frac{J_c(m, a, \bar{T}) - J_c(m, a, T_0)}{J_c(m, a, T_0)} = (1 + \lambda^2) \left( \frac{4}{\pi^2} (\text{K}(\sin(\alpha)))^2 - 1 \right). \quad (17)$$

С поправкой на эту систематическую погрешность для  $J_c$  получим

$$\begin{aligned} J_c(m, a, T_0) &= J_c(m, a, \bar{T}) - \Delta J_{c,\varphi} = \\ &= J_c(m, a, \bar{T}) - (J_c(m, a, \bar{T}) + ma^2) \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \text{K}(\sin(\alpha)) \right)^{-2} \right) = \\ &= (J_c(m, a, \bar{T}) + ma^2) \left( \frac{2}{\pi} \text{K}(\sin(\alpha)) \right)^{-2} - ma^2 = J(m, a, \bar{T}) \left( \frac{2}{\pi} \text{K}(\sin(\alpha)) \right)^{-2} - ma^2 \end{aligned}$$

Таким образом, измеренное значение момента инерции неоднородного твердого тела относительно центральной оси, параллельной выбранному направлению  $AA_1$ , можно представить в виде

$$\begin{aligned} J_c &= J_c(m, a, T_0) (1 \pm (\delta J_c)_{m,a,T}) = J_c(m, a, T_0) \left( 1 \pm \sqrt{(\delta J_c)_m^2 + (\delta J_c)_T^2 + (\delta J_c)_a^2} \right) = \\ &= J_c(m, a, T_0) \left( 1 \pm \sqrt{\left( \frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left( \sqrt{\frac{g}{\pi^2 R_c}} \lambda \sqrt{\lambda^{-1} + \lambda} \Delta T_0 \right)^2 + \left( \frac{(\lambda^{-1} - \lambda)}{R_c} \Delta a \right)^2} \right). \end{aligned} \quad (18)$$



$$J_c(m, a, T_0) = J(m, a, \bar{T}) \left( \frac{2}{\pi} \text{K}(\sin(\alpha)) \right)^{-2} - ma^2. \quad (19)$$

Рис. 4. Зависимость  $d^4T_0/da^4$  от  $\lambda$

В монографии Гернета М.М. и Ротобыльского В.Ф. [2] для расчета погрешности измерений обсуждаемым здесь методом приведены две формулы, требующие уточнения:

$$\delta J_c = \sqrt{(\delta J_{\text{сф}})^2 + (\delta J_{\text{см}})^2 + (\delta J_{\text{са}})^2 + (\delta J_{\text{ст}})^2} \quad (\text{ср. с формулой (18)}), \text{ где}$$

$$\delta J_{\text{сф}} = \left(1 - \frac{4K^2}{\pi^2}\right) \left(1 - \frac{a^2}{R_c^2}\right) \quad (\text{ср. с формулой (17)}).$$

Систематическая погрешность неточно оценена (при  $\lambda=1$  она равна нулю при любом значении амплитуды угла отклонения маятника) и неправильно использована. Она использована в качестве статистической, когда ее следует использовать как поправку.

В табл. 1 приведены величины  $T, L_{\text{ип}}, \frac{dT}{da}, \frac{d^2T}{da^2}, \frac{d^3T}{da^3}, \frac{d^4T}{da^4}$  в диапазоне  $0,05 \leq \lambda \leq 100$ .

Таблица 1

$R_c = 0,05\text{м}, \alpha = \Delta a/R_c = 0,001\text{м}/0,05\text{м} = 0,02 = 2\%, \Delta a/a = \alpha/\lambda = 0,02/\lambda$						
$\lambda$	$T, \text{с}$	$L_{\text{ип}}, \text{м}$	$dT/da = k/2$	$d^2T/da^2$	$d^3T/da^3$	$d^4T/da^4$
0,050	2,0080	1,0025	-3,996E+2	2,410E+5	-2,407E+8	3,37E+11
0,300	0,8548	0,1817	-2,279E+1	2,823E+3	-4,614E+5	1,066E+8
0,500	0,7090	0,1250	-8,509E+0	8,055E+2	-7,991E+4	1,084E+7
0,800	0,6421	0,1025	-1,762E+0	2,399E+2	-1,638E+4	1,387E+6
0,990	0,6342	0,1000	-6,438E-2	1,307E+2	-7,882E+3	5,562E+5
1,000	0,6342	0,1000	0,000E+0	1,268E+2	-7,610E+3	5,327E+5
1,010	0,6342	0,1000	6,248E-2	1,231E+2	-7,350E+3	5,105E+5
1,050	0,6346	0,1001	2,946E-1	1,094E+2	-6,410E+3	4,321E+5
1,100	0,6356	0,1005	5,491E-1	9,461E+1	-5,431E+3	3,537E+5
1,200	0,6395	0,1017	9,609E-1	7,135E+1	-3,962E+3	2,426E+5
1,300	0,6451	0,1035	1,273E+0	5,425E+1	-2,941E+3	1,707E+5
1,400	0,6521	0,1057	1,511E+0	4,146E+1	-2,215E+3	1,227E+5
1,500	0,6601	0,1083	1,693E+0	3,177E+1	-1,689E+3	8,976E+4
1,800	0,6883	0,1178	2,020E+0	1,411E+1	-7,923E+2	3,812E+4
1,900	0,6985	0,1213	2,081E+0	1,059E+1	-6,248E+2	2,929E+4
2,000	0,7090	0,1250	2,127E+0	7,800E+0	-4956E+2	2,271E+4
2,200	0,7306	0,1327	2,184E+0	3,813E+0	-3,162E+2	1,397E+4
2,540	0,7681	0,1467	2,212E+0	1,854E-2	-1,511E+2	6,496E+3
3,000	0,8187	0,1667	2,183E+0	-2,183E+0	-5,531E+1	2,513E+3
3,800	0,9039	0,2032	2,071E+0	-3,121E+0	-4,155E+0	5,448E+2
3,980025	0,9224	0,2116	2,042E+0	-3,139E+0	-7,707E-6	3,871E+2
4,200	0,9447	0,2219	2,008E+0	-3,119E+0	3,468E+0	2,524E+2
5,300	1,0506	0,2744	1,846E+0	-2,729E+0	8,564E+0	6,418E+0
5,393369	1,0592	0,2789	1,833E+0	-2,689E+0	8,579E+0	2,922E-5
5,393370	1,0592	0,2789	1,833E+0	-2,689E+0	8,579E+0	-3,394E-5
5,500	1,0689	0,2841	1,819E+0	-2,644E+0	8,562E+0	-6,126E+0
7,000	1,1985	0,3571	1,644E+0	-2,059E+0	6,792E+0	-2,870E+1
10,000	1,4252	0,5050	1,397E+0	-1,313E+0	3,522E+0	-1,473E+1
20,000	2,0080	1,0025	9,990E-1	-4,920E-1	7,193E-1	-1,733E+0
50,000	3,1716	2,5010	6,338E-1	-1,265E-1	7,557E-2	-7,515E-2
100,000	4,4846	5,0005	4,484E-1	-4,481E-2	1,343E-2	-6,705E-3

Погрешность измерения центрального момента инерции, согласно формуле (18), будет

$$(\delta J_c)_{m, a, T} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{g}{\pi^2 R_c}} \lambda \sqrt{\lambda^{-1} + \lambda \Delta T_0}\right)^2 + \left(\frac{(\lambda^{-1} - \lambda)}{R_c} \Delta a\right)^2}. \quad (20)$$

На рис. 5 приведен график функции (20) для трех значений радиуса инерции испытуемого тела  $R_c=0,05$  м;  $R_c=0,125$  м;  $R_c=0,5$  м при фиксированных значениях  $\Delta T_0=0,001$  сек;  $\Delta a=0,001$  м;  $(\Delta m)/m=0,001$ .

Как видно из табл. 2 и на рис. 5, момент инерции твердого тела, обладающего радиусом инерции  $R_c=0,125$  м относительно выбранной центральной оси, можно измерить с погрешностью не хуже 0,5 %, если измерения провести в условиях, когда  $0,8 < \lambda < 1,1$ . Значения периода колебаний приведенные в табл. 2 соответствуют колебаниям тела с радиусом инерции  $R_c=0,125$  м.

Таблица 2

$\lambda$	T(сек)	$\delta J; 0,05$	$\delta J; 0,125$	$\delta J; 0,5$	$\Delta d; 0,05$	$\Delta d; 0,125$	$\Delta d; 0,5$
0,100	2,253	0,198	0,07921	0,0198	0,00716	0,01132	0,02264
0,200	1,617	0,096	0,03843	0,0097	0,02119	0,0335	0,067
0,300	1,352	0,0607	0,02434	0,0062	0,04204	0,06647	0,13294
0,400	1,207	0,0421	0,01694	0,0044	0,07233	0,11437	0,22874
0,500	1,121	0,0302	0,01225	0,0034	0,11753	0,18583	0,37166
0,600	1,068	0,0217	0,00896	0,0027	0,18885	0,29859	0,59719
0,700	1,034	0,0153	0,00658	0,0023	0,31258	0,49424	0,98847
0,800	1,015	0,0104	0,00495	0,0021	0,56761	0,89747	1,79493
0,900	1,006	0,0072	0,00411	0,0021	1,34817	2,13164	4,26328
1,000	1,003	0,0064	0,00412	0,0022	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!
1,100	1,005	0,008	0,00477	0,0025	1,82121	2,87958	5,75917
1,200	1,011	0,0106	0,00575	0,0027	1,04066	1,64542	3,29085
1,300	1,020	0,0136	0,00686	0,003	0,78566	1,24224	2,48448
1,400	1,031	0,0165	0,00802	0,0033	0,662	1,04672	2,09344
1,500	1,044	0,0194	0,00919	0,0037	0,59083	0,93418	1,86837
1,600	1,058	0,0223	0,01036	0,004	0,54585	0,86307	1,72613
1,700	1,073	0,0251	0,01153	0,0044	0,5158	0,81555	1,6311
1,800	1,088	0,0278	0,0127	0,0047	0,49504	0,78272	1,56544
1,900	1,104	0,0305	0,01385	0,0051	0,48043	0,75963	1,51927
2,000	1,121	0,0332	0,015	0,0055	0,47011	0,74331	1,48663
2,100	1,138	0,0358	0,01614	0,0059	0,46288	0,73188	1,46375
2,200	1,155	0,0384	0,01728	0,0062	0,45793	0,72406	1,44812
2,300	1,173	0,041	0,01842	0,0066	0,45473	0,71899	1,43798
2,400	1,190	0,0436	0,01956	0,007	0,45287	0,71606	1,43211
2,500	1,207	0,0461	0,02069	0,0074	0,45208	0,7148	1,4296
2,600	1,225	0,0487	0,02183	0,0078	0,45213	0,71488	1,42976
2,700	1,242	0,0512	0,02297	0,0082	0,45286	0,71604	1,43208
2,800	1,260	0,0537	0,0241	0,0086	0,45415	0,71808	1,43615
2,900	1,277	0,0562	0,02524	0,009	0,4559	0,72084	1,44168
3,000	1,295	0,0587	0,02638	0,0095	0,45802	0,7242	1,44839

### Заключение

Используемый метод измерения позволяет с помощью обычного секундомера, линейки, угломера и несложной экспериментальной установки [1] измерить с высокой точностью



центральный момент инерции неоднородных твердых тел, обладающих радиусом инерции  $R_c < 0,50$  м.

Положение точки центра масс определяется с точностью не хуже 1мм, а относительная погрешность измерения момента инерции не превышает 0,5 %.

Зависимость периода от амплитуды колебаний приводит к систематическим погрешностям измерения момента инерции.

Уточнены оценки погрешностей в ранее проведенных аналогичных экспериментах с измерением периода колебаний [2]. В частности, показано, что необходим учет корреляции между периодом колебаний  $T$  и расстоянием  $a$  центра масс тела от оси вращения.

Чтобы обеспечить приведенные точности, необходимо провести два измерения: для значений  $\lambda = a/R_c \approx 0,5$  и  $\lambda = a/R_c \approx 1,0$ .

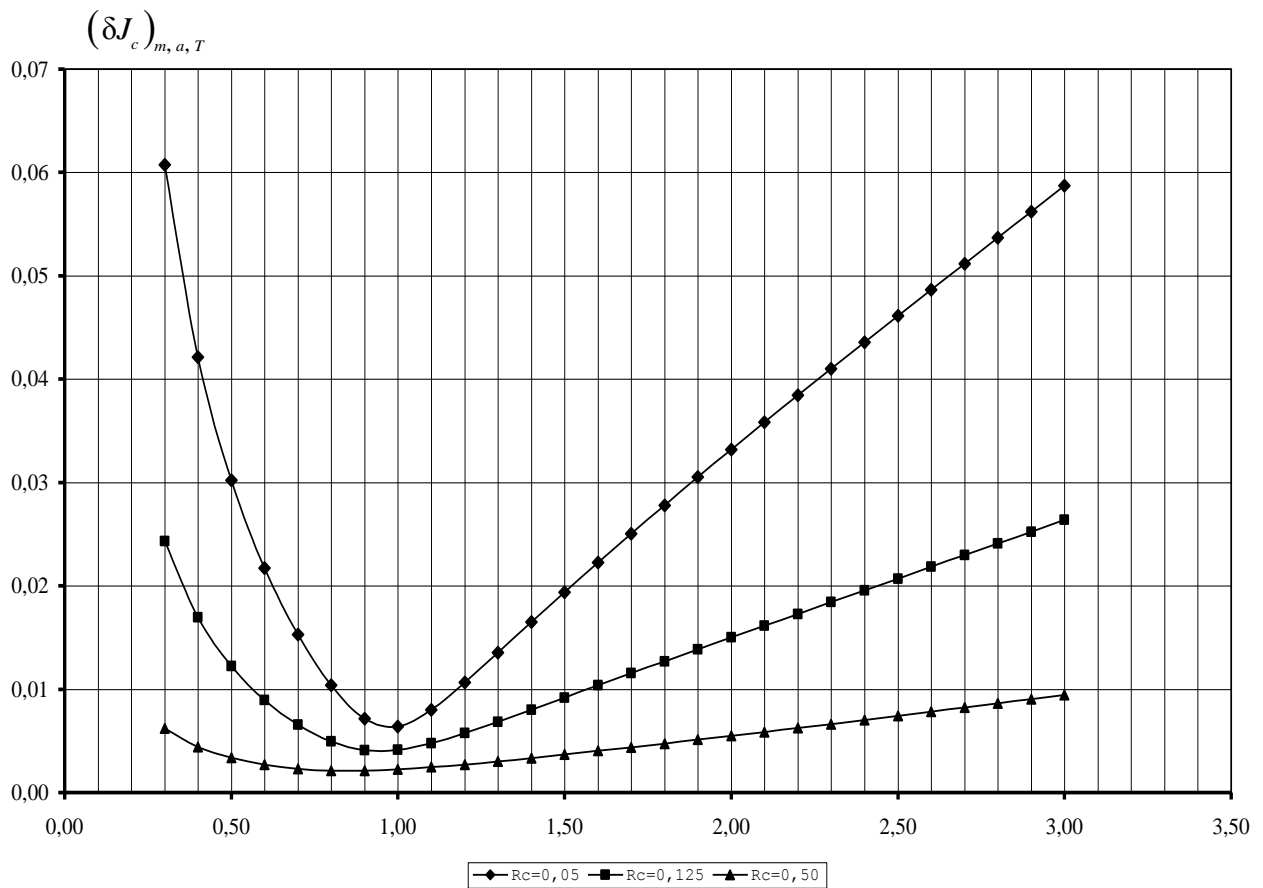


Рис. 5

Период малых колебаний и приведенная длина физического маятника выражаются функцией Н.Е. Жуковского -  $w$  с помощью формул

$$T(R_c, \lambda) = 2\pi\sqrt{(2R_c w)/g} = 2\pi\sqrt{L_{np}/g}, \quad L_{np} = 2R_c w,$$

$$T_{min} = 2\pi\sqrt{2R_c/g}, \quad (L_{np})_{min} = 2R_c,$$

то есть при  $R_c \cong 0,125$  м,  $T_0(R_c, \lambda) = \sqrt{w}$  сек и  $L_{np} = 0,25w$  м.

Удвоенное значение первой производной периода колебаний по параметру  $a=R_c\lambda$  представляет собой чувствительность  $k$  используемого метода измерения величины  $d = a_1 - a_0$  [1]. Поэтому приведены графики зависимости периода колебаний и его производных (до четвертого порядка включительно) от параметра  $\lambda$ .

Приведены графики и таблицы погрешностей измерений для тел с радиусом инерции  $R_c = 0,05$  м;  $R_c = 0,125$  м;  $R_c = 0,50$  м в зависимости от  $\lambda$  (рис. 5).

### Приложение

Для фиксации ориентации тела относительно оси вращения в этой работе используется жёсткий двойной подвес (рис. 6). На эксперименте точка центра масс  $C$  испытываемого тела оказывается на некотором расстоянии  $d$  от выбранного направления  $AA_1$ . Поэтому закрепляем тело в точках пересечения заданного направления  $AA_1$  с поверхностью тела с помощью винтов, имеющих конусные наконечники, далее чуть-чуть расслабляем крепёжный винт  $A_1$ , вследствие чего тело свободно вращается в гравитационном поле притяжения земли вокруг оси  $AA_1$ . Таким образом, точка  $C$  всегда оказывается внизу от прямой  $AA_1$  на расстоянии  $d$  от неё в вертикальной плоскости  $AA_1BB_1$ .

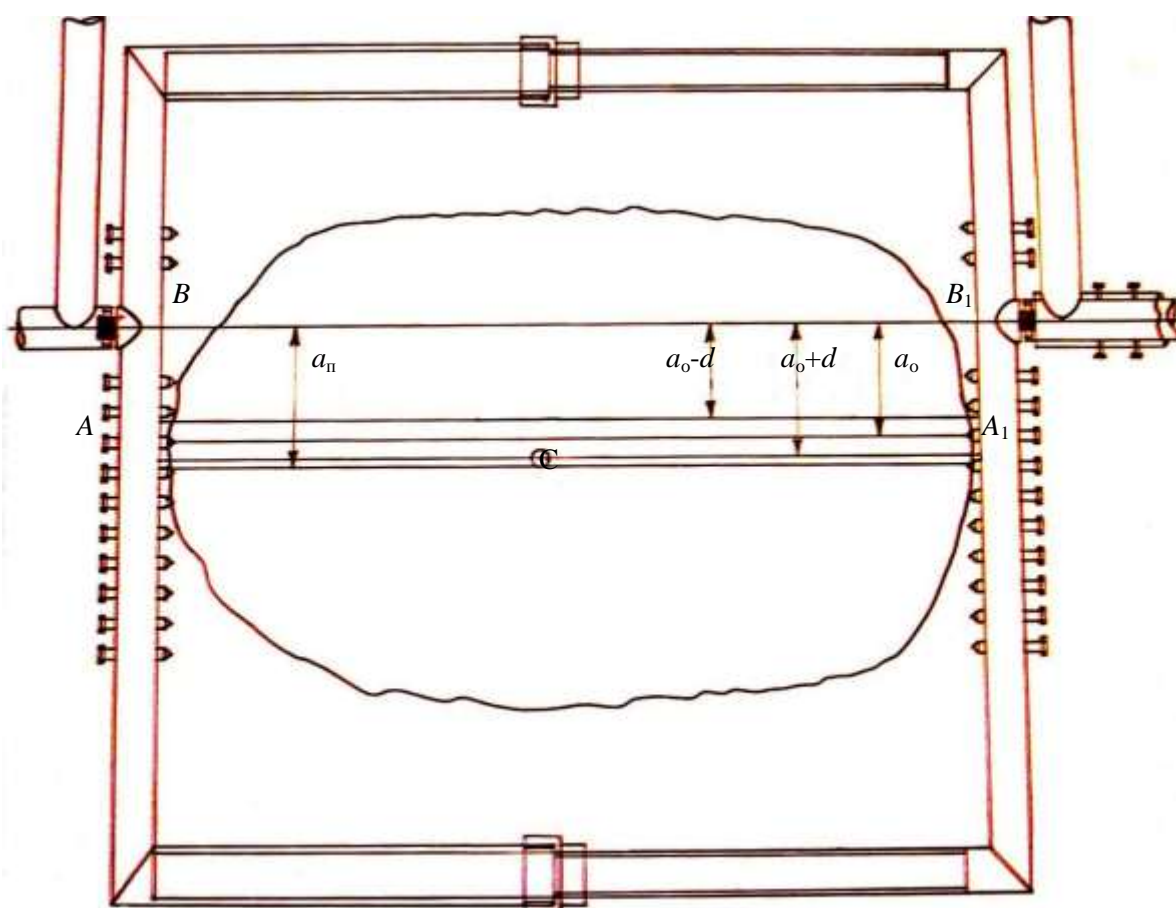


Рис. 6. Схематический вид жёсткого подвеса с опытным образцом

С помощью двух пар дополнительных крепёжных винтов, имеющих конусные заострения и симметрично расположенных по отношению к точкам  $A$  и  $A_1$ , фиксируем это положение (положение 1) образца. Регистрируем расстояние  $a_0$  оси  $AA_1$  от оси вращения  $BB_1$ . Далее выводим из равновесия систему (образец + жёсткий подвес) на определенный угол  $\varphi_{\max 1} \approx 20^\circ$  и измеряем суммарное время  $N \gg 1$  колебаний, регистрируя амплитудное значение угла отклонения  $\varphi_{\max N}$  после  $N$  колебаний. Находим период её колебаний  $T_1$ . Поворачивая образец на угол  $180^\circ$  вокруг оси  $AA_1$ , закрепляем его в новом положении (положение 2) и аналогичным образом измеряем период колебаний  $T_2$ .

Далее образец поворачиваем на угол  $90^\circ$  вокруг оси  $AA_1$  по часовой стрелке или против часовой стрелки, закрепляем его в этом положении (положение 3) и снова измеряем период колебаний  $T_3$  физического маятника. Поскольку на эксперименте обычно хорошо выполняется неравенство  $d \ll a_0$ , то в положении 3 обычно хорошо выполняется равенство  $a_3 \approx a_0$ . Поэтому результаты измерения в этом положении могут служить приближенной оценкой для величины  $J_c$ .

Во всех трёх положениях стараемся измерять совокупное время как можно большего числа  $N$  колебаний при соблюдении условия, что угол  $\varphi_{\max N}$  поддается наблюдению невооруженным глазом. В каждом положении измерение повторяем три раза и определяем среднее значение периода  $\langle T_i \rangle$ . Периоды  $T_1$  и  $T_2$  соответствуют расстояниям  $a_1 = a_0 + d$ ,  $a_2 = a_0 - d$  от выбранной центральной оси тела до оси вращения  $BB_1$ . В данном случае известна сумма расстояний параллельных осей от выбранной центральной оси твердого тела  $a_1 + a_2 = 2a_0$  и необходимо найти  $d = (a_1 - a_2) / 2$ .

Конструкция подвеса позволяет изменять значение величины  $a_0$  дискретно с шагом, равным 15 мм. Равенство  $AB = A_1B_1$  выполняется с точностью 0,5 мм. Силы трения в точках  $B$  и  $B_1$  незначительны (качание на цилиндрических шипах со смазкой).

Величина  $d$  определяется формулой (см. равенство (13) в работе [1])

$$d = \frac{a_0(T_1^2 - T_2^2)}{16a_0\pi^2/g - (T_1^2 + T_2^2)} = \frac{a_0(T_2^2 - T_1^2)}{(T_1^2 + T_2^2) - 16a_0\pi^2/g}. \quad (\text{П.1})$$

В зависимости от конкретных значений величин  $R_c$ ,  $a_0$ ,  $d$  во время измерений возможны три варианта: 1)  $\lambda_2 < \lambda_1 < 1$ ; 2)  $\lambda_2 < 1 < \lambda_1$ ; 3)  $1 < \lambda_2 < \lambda_1$ .

С учетом (П.1) и того, что  $a_1 > a_2 = a_1 - 2d$ , получим

$$\begin{aligned} \text{Если} \quad 0 < d < a_0 < a_0 + d < R_c &\Rightarrow \lambda_2 < \lambda_1 < 1, \text{ то} \\ T_2 > T_1 > T_{\min} &\Rightarrow T_2^2 - T_1^2 < (T_1^2 + T_2^2) - 16a_0\pi^2/g. \end{aligned}$$

Следовательно, критерием первого варианта будет

$$a_0 < 0,125 \cdot 0,99456 \cdot T_1^2 = 0,12432 \cdot T_1^2 \text{ м.}$$

Если же  $R_c < a_0 - d < a_0 + d \Rightarrow 1 < \lambda_2 < \lambda_1$ , то

$$T_{\min} < T_2 < T_1 \Rightarrow 16a_0\pi^2/g - (T_1^2 + T_2^2) > 0.$$

Следовательно, критерием третьего варианта будет

$$a_0 > 0,12432(T_1^2 + T_2^2) / 2 \text{ м.}$$

Наконец, если  $a_0 - d < R_c < a_0 + d \Rightarrow \lambda_2 < 1 < \lambda_1$ , то

$$0,12432(T_1^2 + T_2^2) / 2 \text{ м} < a_0 < 0,12432 \cdot T_1^2 \text{ м.}$$

Это двойное неравенство является критерием второго варианта.

Вычисление значения  $d$  по формуле (П.1) позволяет определить положение центральной оси, параллельной к заданному направлению  $AA_1$ . Далее определяется момент инерции относительно найденной центральной оси при  $\lambda \approx 1,0$  (второй вариант). Аналогично находится центральная ось в перпендикулярном к  $AA_1$  направлении. Таким же путём определяется направление третьей центральной оси инерции, перпендикулярной к первым двум, и положение точки центра масс. Использованный метод и конструкция подвеса позволяют также определить центробежные моменты инерции испытываемого неоднородного тела для найденной тройки центральных ортогональных осей [7].

Учет массы и момента инерции жесткого подвеса приведен в работе [1].

#### Библиографический список

1. **Пилипосян, С.Е.** Измерение момента инерции произвольного твердого тела // Труды НГТУ. – Н.Новгород, 2010. № 4(83). С. 100–110.
2. **Гернет, М.М.** Определение моментов инерции / М.М. Гернет, В.Ф. Ратобылский. – М.: Машиностроение, 1969. - 315 с.
3. **Лаврентьев, М.А.** Методы теории функции комплексного переменного / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 736 с.
4. **Худсон, Д.** Статистика для физиков: [пер. с англ.] /Д. Худсон; под ред. Е.М. Лейкина. – 2-е изд. – М.: Мир, 1970. – 292 с.
5. **Яноши, Л.** Теория и практика обработки результатов измерений: [пер. с англ.] /Л. Яноши; под ред. Н.П. Клепикова. – 2-е изд. – М.: Мир, 1968. – 462 с.
6. **Смирнов, В.И.** Курс высшей математики. В 2-х т. Т 1. / В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1967. – 480 с.
7. **Стороженко, В.А.** Синхронизация вращения в задаче определения главной центральной оси инерции неоднородного твёрдого тела. Проблемы механики / В.А. Стороженко. – М.: Физматлит, 2003.

*Дата поступления  
в редакцию 13.04.2012*

**S.E. Piliposian**

#### MEASUREMENT ERROR OF RANDOM SOLID BODY MOMENT OF INERTIA

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

The article contains the estimation of random solid body moment of inertia measurement error. The measurements were performed based on the method of vibration period recording.

A dual hard suspension, a ruler, an angle gage and a time-interval recorder were used in measurements. The work identifies experiment conditions, which provide minimum (not exceeding 0.5%) measurement error.

*Key words:* heterogeneous solid body moment of inertia, physical pendulum, dual hard suspension, measurement error of correlated varieties, Joukowski function.

УДК 53

О. С. Кошелев<sup>1</sup>, О.Ю. Калынов<sup>2</sup>, Л. С. Фролов<sup>2</sup>**АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ  
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА  
И МИНИМАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СООТВЕТСТВУЮЩИМ ПРОГРАММНЫМ  
ПРОДУКТАМ В УСЛОВИЯХ КОНКРЕТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ООО НПП «Прима»<sup>2</sup>, Нижний Новгород

**Цель:** Одной из основных проблем современных машиностроительных предприятий является использование средств автоматизации, характерных для массового производства в единичном и мелкосерийном производстве. Наряду с этим, на этапе разработки конструкторской и технологической документации изделия много времени уходит на выбор оптимального решения проекта. При этом традиционные методы по созданию гибких производственных систем не являются эффективными.

**Метод:** В статье предлагается новый метод, основанный на конструктивном и функциональном описании изделий и его составных частей.

**Выводы:** Особенность предлагаемого метода заключается в возможности создания с его помощью универсальных функциональных групп деталей и сборочных единиц с характерными для них параметрами технологичности.

**Значение:** В результате использования рассмотренного метода появляется возможность организации автоматизированной системы конструкторско-технологического проектирования изделий с возможностью оценки себестоимости и степени технологичности изделия на ранних стадиях разработки проекта.

*Ключевые слова:* автоматизация, технологичность, функциональные группы, гибкие производственные системы, документация.

Особенность развития машиностроительного производства на современном этапе состоит в том, что оно начинает «уходить» от массового производства к малосерийному и единичному [1]. Вместе с тем, следует заметить, что с точки зрения производителя такой переход грозит, как минимум, двумя неприятными последствиями:

- удорожается производство за счёт того, что становится невозможно использовать средства «жесткой» автоматизации и простейшие приспособления;
- увеличивается время и стоимость технологической подготовки производства за счёт того, что каждое изделие в этом случае становится уникальным, требующим индивидуального подхода и уникальной документации на своё изготовление. Увеличение же времени на разработку в условиях конкуренции – это nepoзвoлитeльнaя pocкoшь.

Поэтому стремление, находясь в условиях единичного производства, воспользоваться преимуществами массового становится понятным и естественным [2].

Существуют различные пути решения этой задачи. Приведем некоторые из них:

1. Обеспечение конструктивного подобия.
2. Ограничение номенклатуры составных частей, конструктивных элементов и применяемых материалов.
3. Применение в разрабатываемых конструкциях освоенных в производстве конструктивных решений, соответствующих современным требованиям.
4. Применение высокопроизводительных и малоотходных технологических решений, основанных на типизации процессов и других прогрессивных формах их организации.
5. Применение высокопроизводительных стандартных средств технологического оснащения, обеспечивающих оптимальный уровень механизации и автоматизации труда в производстве.
6. Использование конструктивных решений, позволяющих снизить затраты на обеспечение: доступа к составным частям; установки и съема составных частей изделия.

7. Использование конструктивных решений, обеспечивающих возможность транспортирования изделия в собранном виде или в виде законченных составных частей, не требующих при монтаже разборки для расконсервации, ревизии, а также операций по подгонке.

8. Использование конструктивных решений, облегчающих и упрощающих условия изготовления и монтажа вне предприятия-изготовителя для ограничения требований к квалификации изготовителей и монтажников.

Таким образом, можно отметить, что большинство перечисленных пунктов говорит о том, что в основе повышения серийности и технологичности изделия и снижения его себестоимости лежит унификация деталей и узлов и использование апробированных и освоенных производством конструкторских и технологических решений [3].

Одним из наиболее широко известных направлений в этом случае является попытка группировать детали по принципу идентичности обрабатываемых поверхностей, на основании групп создавать детали-представители и для таких деталей разрабатывать типовой технологический процесс (ТПП). Метод широко используется и полностью доказал свою эффективность.

В существующих условиях схема разработки нового изделия выглядит примерно так: конструктор разрабатывает документацию, которая включает в себя чертежи будущих деталей и сборочных единиц. Затем эта документация проходит проверку на технологичность технологом. Если проектируемое изделие не отвечает требованиям технологичности, то документация возвращается конструктору для доработки. Этот процесс может многократно повторяться. Число повторов зависит от компетентности и опыта конструктора и технолога, другими словами, может затянуться. Зачастую именно нехватка времени становится причиной низкого результата конечной продукции, её нетехнологичности и, как результат, завышенной себестоимости [4].

Только после окончания процесса разработки, согласования и утверждения конструкторской документации изделия мы можем приступить к разработке ТПП и начать группирование деталей по поверхностям.

Поверхность значительно, но не полностью, определяет работоспособность детали. Помимо поверхностей детали в её документацию также закладываются сведения о применяемом материале и технические требования к изготовлению детали, зависящие от конкретного функционального назначения детали, определяемого конструктором.

Таким образом, рассматриваемый метод не всегда достаточно обоснованно выдвигает требования к заготовке, поскольку определение требований к работоспособности детали остаются за конструктором. Следовательно, в этой части процесс не автоматизируется.

И если в случае создания ТПП мы более или менее определились при группировании, то ответ на вопрос о рациональном конструировании остается открытым. И сложность состоит в том, что деталь с её сопряжениями рассматривается как уникальная вещь. В результате каждый из таких проектов по-своему оригинален, поскольку включает в себя целый комплекс конструкторских и технологических решений. Как правило, подобные решения заранее не оговариваются и определяются на этапе разработки конструктором макета изделия. Однако их набор ограничен и зависит от конкретных технологических и производственных мощностей и возможностей оборудования предприятия. Также необходимо учитывать такие факторы, как единство и простота сборки, ремонтпригодность, простота ремонта, что важно для определения технологичности изделия.

Таким образом, если говорить об ограничении конструкторских и технологических решений на конкретном предприятии, то можно сказать, что подобное ограничение является не совсем явным, поскольку нигде и никем не оговаривается. Теоретически, конструктор может предложить совершенно новую концепцию разработки, но это может просто оказаться нецелесообразным в рамках работы на конкретном предприятии. В результате даже самый опытный конструктор не застрахован от того, что разрабатываемое им изделие может оказаться нетехнологичным.

Получается, что если заранее оговорить круг возможных решений при конструктор-

ском проектировании изделия и каждому решению поставить в соответствие количественное выражение степени технологичности, то при проектировании задача конструктора будет состоять лишь в том, чтобы корректно сформулировать требования к конструкции изделия. Вопрос заключается лишь в том, как правильно формализовать и оговорить этот круг решений.

Конструкция любой машины, любая деталь в ней выполняют вполне определённые функции и таких функций в общем машиностроении уже ограниченное число. В ближайшем рассмотрении всю конструкцию изделия мы можем разбить на ряд простейших функций, которые выполняют составные части изделия.

Таким образом, мы можем сказать, что конструкторско-технологическое решение есть процесс разбиения исходной функции проектируемого изделия на функциональные узлы и подбор для них оптимального состава элементарных функций. То есть, если ранее понятие поиска оптимального решения понималось как ментальный процесс мышления конструктора, то с помощью аппарата функционального анализа он превращается во вполне формализованный процесс поиска оптимального решения из множества существующих. Стоит отметить, что данный процесс должен осуществляться с учетом возможностей предприятия, поэтому множество решений, как правило, оказывается довольно ограниченным.

С точки зрения технологического решения на этапе разработки конструкторской документации технолог в своем заключении опирается на сведения об имеющемся на предприятии производственном оборудовании. Эти сведения также можно заранее оговорить и формализовать в рамках конкретного производственного предприятия.

Однако показатели технологичности функциональных и конструктивных элементов детали или изделия в целом могут изменяться в зависимости от определённых параметров. К таким параметрам относятся конструктивная форма элементов (длина, диаметр, глубина и т.д.), параметры заготовки, вид оборудования. Следовательно, описание любого функционально-конструктивного элемента можно представить в виде параметрического уравнения. С одной стороны этого уравнения будет стоять определённый показатель технологичности, а с другой – связанные между собой определёнными функциями коэффициенты и параметры, от которых этот показатель технологичности зависит. Если в таком виде представить все функционально-конструктивные элементы, то можно для любой детали, которая будет входить в рассматриваемую группу, спрогнозировать ещё до момента её изготовления все требуемые показатели технологичности. Но вручную проводить данные расчёты также долго, поэтому имеет смысл их автоматизировать с помощью программного продукта.

Так как большая часть современных предприятий при проектировании деталей и изделий использует различные системы САПР КД и ТП, то возможно интегрировать САПР КД и ТП с этим программным продуктом.

Данный программный продукт (рис. 1) должен включать в себя взаимосвязанные базу данных и базу знаний.

База данных должна включать в себя информацию обо всех функциональных группах деталей, которые выпускает данное предприятие или отрасль промышленности, к которой это предприятие относится.

В каждую из таких функциональных групп входят подгруппы, которые, в свою очередь, состоят из конструктивно похожих между собой деталей, отличающихся друг от друга только размерами. Каждая из таких подгрупп имеет деталь – представитель, которая отражает общность конструкции деталей подгруппы. База данных должна включать в себя также группы элементов, из которых состоят функционально-технологические группы деталей и подгруппы. Также в базу данных входит информация об оборудовании, на котором можно изготовить детали, входящие в функционально-технологическую группу. Далее в неё входит информация о заготовках, покрытии и т.д.

База знаний должна включать в себя системы распознавания элементов, расчёта покрытий, расчёта параметрических уравнений и прочие системы, необходимые для анализа, сравнения и расчёта показателей технологичности.

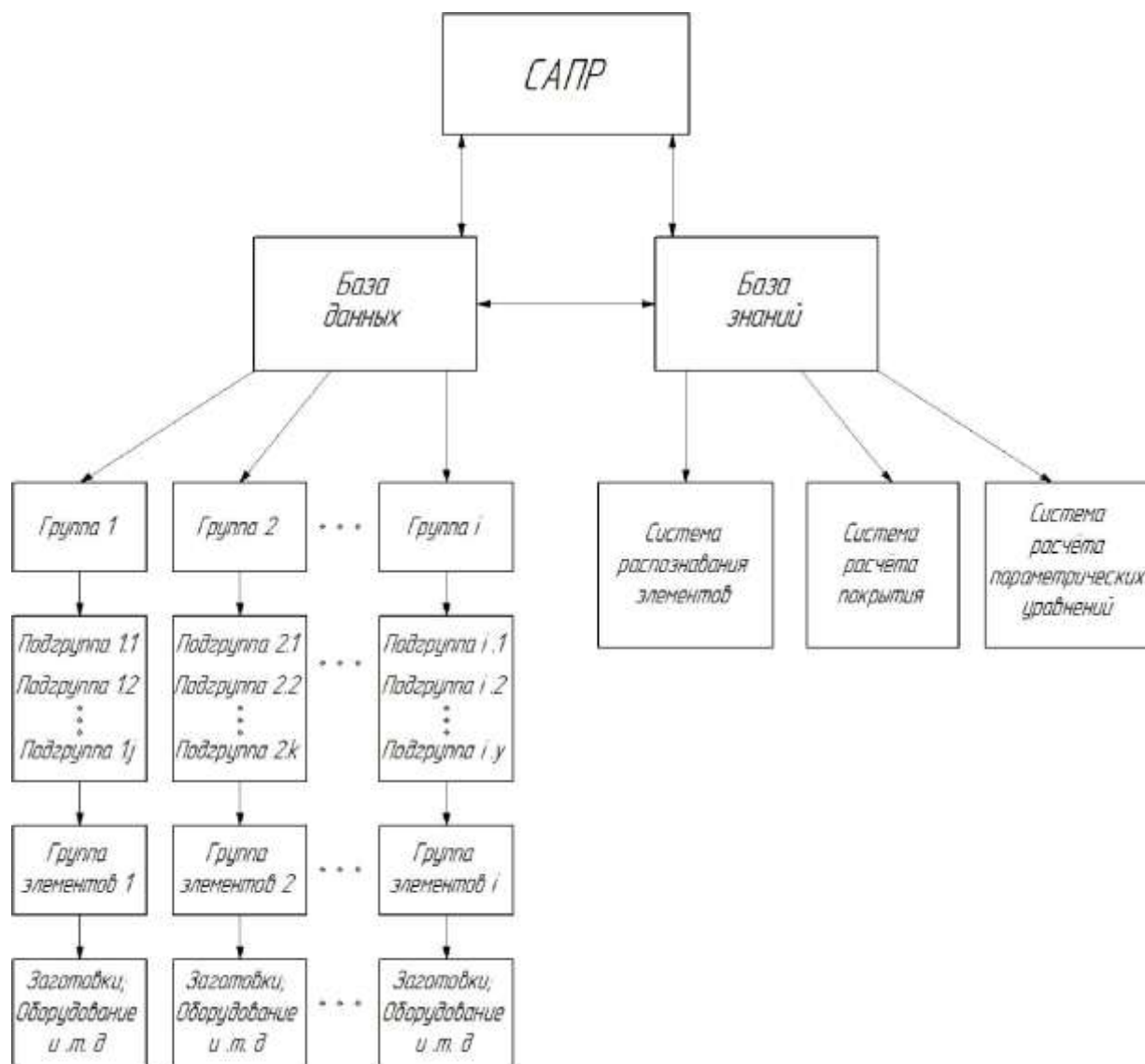


Рис. 1

Применительно к конкретному конструкторско-технологическому подразделению предприятия рассматриваемая идея состоит в следующем:

1. Все проектируемые (или изготавливаемые) на конкретном предприятии изделия разбиваются на отдельные узлы по выполняемым в изделии функциям (коробки передач, трансмиссии, корпусные детали и т.п.).

2. Узлы разбиваются по функциям на отдельные детали (валы, оси, рычаги т.п.).

3. Детали разбиваются по функциям на отдельные объёмы. Например, вал имеет места для подшипников, шестерён, подвижных и неподвижных соединений, мест контактирования с сальниками и т.п.

4. В зависимости от функции назначения объёма к нему имеются сформированные или формируются требования по поверхности, к допускам, чистоте обработки, расположения волокон структуры, однозначности структуры (например, полностью калёный объём или поверхностная закалка) и т.д.

5. В зависимости от требований к поверхности и объёму формулируются способы их удовлетворения (используемые процессы, оборудование).



6. Проводится анализ с точки зрения выявленных процессов возможностей имеющегося на предприятии оборудования.

7. Все эти данные на протяжении длительного времени вносятся в базу данных, где группируются по функциям (чего мы хотим достичь и почему).

8. Составляется алгоритм работы базы знаний, который обеспечит правильное функционирование программного продукта, а также его взаимодействие с САПР предприятия, специально разработанной базой данных и пользователем (то есть конструктором предприятия).

В результате проведенных мероприятий в случае поступления новой разработки задача конструктора – в самом общем виде прорисовать деталь, в самом грубом виде задать требования к её элементам и физическим требованиям, требованиям к её размерам (без допусков) и передать эти данные в программный модуль. После обработки полученной информации программа даст результат в следующем виде:

- различные альтернативные варианты (с оптимальными показателями технологичности) конструкторского проекта для последующего выбора;
- для каждого из вариантов проекта – законченная компоновка с возможностью вывода чертёжной детали со всеми необходимыми размерами и требованиями;
- требования к заготовкам;
- возможность автоматического формирования оформленного проекта в базе данных предприятия;
- требования к технологическому процессу с указанием оборудования из числа имеющегося на предприятии, которое следует использовать при изготовлении детали.
- ответ на вопрос, в состоянии ли предприятие изготовить деталь самостоятельно или нет и, если не в состоянии, то почему.

Следует отметить, что описывается идеальный вариант, когда изделие является настолько «типичным», что после получения вышеуказанных данных проект не требует доработки со стороны конструктора. В большинстве же остальных ситуаций такое вмешательство будет необходимым и неизбежным, поскольку каждое изделие в той или иной степени обладает индивидуальностью. Также стоит сказать, что подобная система является универсальной, то есть может быть реализована на любом предприятии машиностроительного и приборостроительного характера, однако требует индивидуального подхода в каждом отдельном случае, поскольку необходимые данные о технологических возможностях предприятия являются в каждом случае уникальными.

Таким образом, можно отметить, что принципы функционально-технологического анализа открывают достаточно широкий спектр возможностей по изучению, проектированию и разработке новых типов производственных систем, которые в условиях современного этапа развития машиностроительного и приборостроительного производства оказались бы наиболее актуальными и эффективными. Совмещение этих принципов с теорией количественной оценки степени технологичности даёт возможность осуществлять сравнительную оценку степени технологичности и себестоимости различных вариантов конструкторских проектов ещё на начальных стадиях проектирования. Внедрение же данных принципов в производственной сфере позволяет использовать преимущества высокопроизводительного оборудования при единичном и мелкосерийном типе производства.

#### Библиографический

1. **Шишмарёв, В.Ю.** Автоматизация технологических процессов / В.Ю. Шишмарёв. – М.: Академия, 2005.
2. **Митрофанов, С.П.** Технологическая подготовка гибких производственных систем / С.П. Митрофанов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987.

3. **Митрофанов, С.П.** Организационно-технологическое проектирование ГПС / С.П. Митрофанов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986.
4. **Капустин, Н.М.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе. – М.: Высшая школа, 2004.

*Дата поступления  
в редакцию 02.05.2012*

**O. Koshelev, O. Kalynov, L. Frolov**

**THE ENGINEERING AND DESIGN PRE-PRODUCTION AUTOMATION PROBLEM  
SOLVING ALGORITHM AND THE APPROPRIATE SOFTWARE PRODUCTS  
MINIMUM REQUIREMENTS IN A CONCRETE COMPANY**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

**Purpose:** Using automation typical of mass production in the unit and small batch production is one of the main problems of modern engineering companies. At the same time, during the development phase of design and technological documentation for the product takes a lot of time to choose the optimal solution of the project. In this case traditional methods of creating flexible production systems are not effective.

**Method:** In this paper we propose a new method based on the constructive and functional description of the product and its components.

**Findings:** One of this method's benefits is ability to create with it the universal functional groups of parts and assembly units with the characteristic parameters of their processability.

**Value:** As a result, it is possible to organize the automated constructive and technological design system with the ability to assess the product's cost and extent of processability at the early stages of project development.

*Key words:* automation, processability, functional groups, flexible production systems, documentation.

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

---

---

УДК 621.039.534

А.В. Безносков<sup>1</sup>, Т.А. Бокова<sup>1</sup>, Ю.Н. Дроздов<sup>2</sup>, К.А. Махов<sup>1</sup>

### ТРИБОЛОГИЯ КОНТУРОВ ИННОВАЦИОННЫХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С ТЖМТ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН<sup>2</sup>

Для обеспечения ресурсной работоспособности проектируемых в настоящее время контуров с инновационными реакторами на быстрых нейтронах необходимо подтверждение работоспособности новых технических решений проектируемых реакторных установок типа БРЕСТ и СВБР. При проведении проектных работ вопросам триботехники в элементах реакторных контуров в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей внимания практически не уделяется. Свинцовый и свинец-висмутовый теплоносители указанных установок обладают рядом особенностей, не позволяющих применять традиционные смазочные среды для узлов и механизмов реакторных контуров типа БРЕСТ и СВБР. В НГТУ проводятся экспериментальные и теоретические исследования трибологических характеристик элементов реакторных контуров в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей.

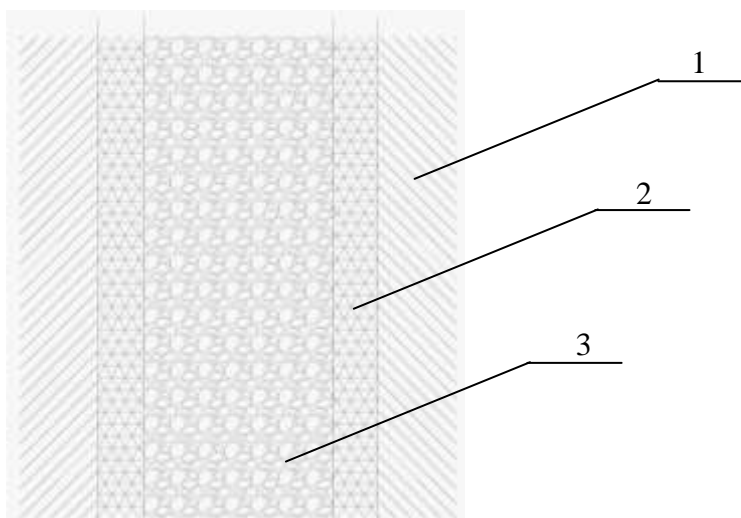
*Ключевые слова:* трибология, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, реактор на быстрых нейтронах, зона контакта, контактная пара, возвратно-поступательное движение, пристенный слой.

Согласно решениям Правительства Российской Федерации энергоблоки с инновационными реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемыми свинец-висмутовыми и свинцовым теплоносителями, должны быть построены и введены в работу на площадках НИИАР (в Димитровграде) и на Белоярской АЭС в период 2017–2020 гг.

Наша страна располагает значительным опытом создания и эксплуатации транспортных реакторных установок со свинец-висмутовым теплоносителем атомных подводных лодок проектов 645,705 и 705К, а также исследований и отработки технологий и оборудования со свинцовым теплоносителем. При проведении этих работ вопросам триботехники в элементах реакторных контуров в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей внимания практически не уделялось. Однако имевшие место аварийные ситуации и необходимость обеспечить ресурсную работоспособность установок при работе энергоблока не с моделью эксплуатации АПЛ, а с работой в течение нескольких десятилетий на номинальной мощности, инициировали проведение исследований и созданию новой области трибологии – трибологии в среде высокотемпературных свинцового и свинец-висмутового теплоносителей. Особенностью этой области является следующее: невозможность применения традиционных смазочных сред в контакте с расплавами жидких металлов; высокая (400-550<sup>0</sup>С) температура контактных поверхностей; малая вязкость жидкометаллических теплоносителей; несмачиваемость рабочих поверхностей (сталей, чугунов), покрытых оксидными покрытиями теплоносителями; возможность интенсивного отвода тепла из зон контакта трущихся пар жидкометаллическими теплоносителями; концентрация в зоне контакта пар трения мелкодисперсных частиц и примесей (оксидов теплоносителей, соединений элементов конструкционных материалов – продуктов коррозионно-эрозионного износа, случайных загрязнений), образующих

дисперсную систему с ярко выраженными поверхностными свойствами, отличающимися от свойств основного объема теплоносителя; на порядок большая плотность по сравнению с традиционными реакторными теплоносителями (натрий, вода); большая величина поверхностного натяжения, по сравнению с традиционными теплоносителями.

Наличие пристенного смазочного слоя, в состав которого входят оксидированная поверхность конструкционного материала контактных поверхностей и расположенная между ними (постоянно или периодически) дисперсная система из жидкометаллического теплоносителя с мелкодисперсными частицами примесей, является специфической особенностью свинцового и свинец-висмутового теплоносителей в отличие от традиционных воды и натрия [1] (рис. 1). Пристенный смазочный слой обладает антифрикционными свойствами.



**Рис. 1. Модель пристенной области циркуляционного контура:**

1 – конструкционный материал; 2 – защитное оксидное покрытие; 3 – дисперсная система: жидкометаллический теплоноситель-дисперсные частицы примесей

Основными элементами рассматриваемых реакторных контуров, содержащих контактные пары трения в среде расплавов свинца и эвтектики свинец-висмут и являющимися объектами трибологии, являются следующие: главные циркуляционные насосы, наиболее ответственными элементами которых являются подшипники скольжения, работающие в среде высокотемпературных жидких металлов при высоких скоростях и нагрузках; элементы системы управления и защиты реактора; стержни с нейтронопоглощающим веществом, помещенные в стальную оболочку, которая является поверхностью трения о внутреннюю поверхность чехла стержня-поглотителя в среде теплоносителя; элементы системы перезагрузки ядерного топлива в виде шестерни или других деталей, содержащих поверхности трения в среде теплоносителя; трубная система парогенераторов в виде трубок, контактирующих с дистанционирующими решетками, рейками и другими элементами; концевики тепловыделяющих элементов, контактирующие с дистанционирующими решетками и др. Поверхности конструкционных материалов контура, контактирующие с поверхностью движущегося потока высокотемпературного жидкого металла, также можно рассматривать как объект, трибологии.

Приведем связанные с трибологией примеры тяжелых аварий с радиационно-опасными последствиями в отечественных реакторных контурах со свинец-висмутовым теплоносителем. В парогенераторе МП-7 реакторного контура АПЛ пр.705 под действием динамического напора жидкого металла  $\rho v^2/2$  произошло разрушение дистанционирующих решеток трубной системы парогенератора. Под воздействием нестационарного потока высокотемпературного свинец-висмутового теплоносителя возник процесс периодического кон-

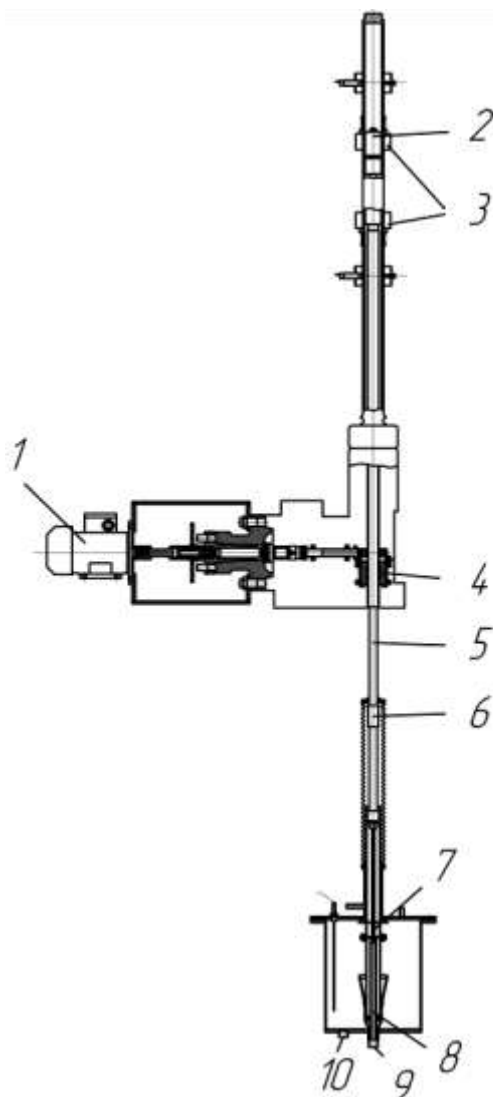
такта поверхностей парогенерирующих трубок из перлитной стали. В результате истирания поверхностей контакта, внешние стенки трубок на локальном участке парогенератора из цилиндрических стали шестигранными вплоть до сквозного истирания стенки трубки и аварийного поступления рабочего тела в реакторный контур, что привело к аварийному замораживанию теплоносителя в одном из трёх парогенераторов реакторной установки. При этой аварии теплоноситель с полониевой радиоактивностью заполнил трубки и полости рабочего тела аварийного парогенератора, удаление которого потребовало проведение радиационно-опасных работ.

В главном циркуляционном насосе реакторного контура со свинец-висмутовым теплоносителем вследствие самопроизвольного откручивания болта крепления рабочего колеса произошел частичный «сход» последнего с вала насоса. В результате этого произошел контакт и истирание материала вращающегося рабочего колеса и корпуса насоса, что привело к поступлению в контур более 1 дм<sup>3</sup> продуктов истирания сталей. Это, в свою очередь, привело к существенному раскислению теплоносителя в контуре и к неконтролируемому и непрогнозируемому образованию отложений частиц примесей в контуре. В случае локализации объема этих примесей на входе в тепловыделяющие сборки активной зоны реактора могло произойти ухудшение теплосъема с участка активной зоны реактора, разрушение оболочек тепловыделяющих элементов и поступление топливосодержащих масс матрицы ядерного топлива в теплоноситель реакторного контура с потенциальными радиационноопасными последствиями.

Для обеспечения ресурсной работоспособности проектируемых в настоящее время контуров с инновационными реакторами на быстрых нейтронах, наряду с исследованиями и разрешением уже известных вопросов и проблем трибологии необходимо подтверждение работоспособности новых технических решений проектируемых реакторных установок. В качестве примера такого вопроса можно привести следующее. Традиционно в реакторных контурах применяют оборудование и трубопроводы, поверхность контакта которых с теплоносителем имеет такую малую шероховатость, что и закладывается в гидравлический расчет контура. Экспериментально доказано, что в процессе длительной эксплуатации реакторного контура на поверхностях конструкционных материалов, контактирующих со свинцовым теплоносителем, откладываются частицы примесей [2], увеличивающие шероховатость. Увеличение шероховатости приводит к увеличению расчетного гидравлического сопротивления контура. Такая ситуация не представляет потенциально опасности для контуров установок типа СВБР/100. В контурах реакторных установок типа БРЕСТ, в которых циркуляция теплоносителя через активную зону и парогенератор осуществляется за счет статического перепада высот, увеличение шероховатости поверхностей и вызванное этим увеличение гидравлического сопротивления могут привести к уменьшению расхода теплоносителя через активную зону и потребовать либо ограничения мощности энергоблока, либо необходимости повышения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны.

В качестве примера исследований по рассматриваемой теме, проводимых в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, можно привести следующее. На экспериментальной установке (рис. 2), подключенной к циркуляционному стенду с высокотемпературным свинцовым теплоносителем, исследуются процессы, возникающие в зоне контактного взаимодействия оболочки стержня-поглотителя нейтронов и его чехла в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителя. В состав установки входят следующие основные элементы: электропривод с узлами преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное перемещение макета стержня-поглотителя нейтронов; концевые выключатели, обеспечивающие сигналы на изменение направления движения стержня-поглотителя; система автоматического управления движением стержня-поглотителя; тяга с устройством измерения усилия перемещающего стержня-поглотителя; стержень-поглотитель (модель) с чехлом и зазором между ними, через который осуществляется поток свинцового теплоносителя; штуцер подвода и отвода высокотемпературного теп-

лоносителя к экспериментальной установке; система защитного газа экспериментальной установки с уплотнением газового объема в районе перемещения тяги стержня-поглопителя.



**Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования процессов, возникающих в зоне контактного взаимодействия оболочки стержня-поглопителя нейтронов и его чехла в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителя:**

- 1 - электродвигатель; 2 - магнит; 3 - концевые индуктивные выключатели;  
 4 - шариковая гайка; 5 - вал; 6 - датчик измерения напряжений растяжения и сжатия;  
 7 - экспериментальный образец; 8 - чехол; 9 - штуцер подвода ТЖМТ  
 к экспериментальному участку; 10 - штуцер отвода ТЖМТ

Сущность эксперимента заключается в построении графических зависимостей в координатах «усилие – перемещение стержня-поглопителя» при варьируемых скоростях перемещения стержня-поглопителя; различных управляемо изменяемых состояниях пристенного смазочного слоя; различных расходах теплоносителя в зазоре; вызываемых этим гидравлических характеристик потока и триботехнических характеристик системы; изменения шероховатости контактных поверхностей; истирание и изменение микро- и макрогеометрии поверхностей оболочки стержня и чехла; изменение триботехнических характеристик при изменении радиального зазора между поверхностями контактной пары.

Анализ полученных результатов позволит рекомендовать экспериментально обоснованные оптимальные проектные и эксплуатационные решения этого узла СУЗ.

## Заключение

Исследования проблем трибологии и анализ их результатов в контурах инновационных реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями, позволит разрабатывать обоснованные рекомендации к конструктивным решениям механизмов и оборудования контуров, содержащих контактные пары в среде высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей.

## Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2007. – 434 с.
2. **Безносков, А.В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Н. Новгород: Литера, 2012. – 535 с.

*Дата поступления  
в редакцию 24.04.2012*

**A. V. Beznosov<sup>1</sup>, T.A. Bokova<sup>1</sup>, Yu.N. Drozdov<sup>2</sup>, K.A. Makhov<sup>1</sup>**

## TRIBOLOGY CIRCUITS INNOVATIVE REACTORS ON FAST NEUTRONS WITH HLMC

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev<sup>1</sup>,  
Mechanical Engineering Institute n.a. A.A. Blagonravov<sup>2</sup>

**Purpose:** Development of sound recommendations to the constructive solutions of machinery and equipment circuits, containing the contact pairs in the environment high-temperature liquid metal heat carriers.

**Design/methodology/approach:** Lead and lead-висмутовый heat-carriers of these installations have a number of features, which do not allow to apply traditional lubricants environment for nodes and mechanisms of the reactor circuits type of BREST and SVBR. In the NSTU are conducted experimental and theoretical studies of the tribological characteristics of the elements of the reactor circuits in an environment of heavy liquid metal heat carriers.

**Findings:** The analysis of the received results allow to recommend experimentally substantiated optimal design and operational decisions of the node of the system of management of the protection of the reactor

**Research limitations/implications:** Research of problems in tribology and analysis of their results in the contours of innovative fast neutron reactors, cooled lead and lead-bismuth coolant, will allow to develop sound recommendations to the constructive solutions of machinery and equipment circuits, containing contact pairs in the environment high-temperature liquid metal heat carriers.

**Originality/value:** The need for further research requires, first of all, the requirements for safe operation of power units cooled by heavy liquid metal coolants. Refinement of the hydrodynamic, thermal and performance characteristics may lead to an increase in the safe operation of the circuit. Hence, the need for further theoretical and experimental work aimed at understanding the tribological characteristics of the circuit with a lead and lead-bismuth coolant.

*Key word:* tribology, heavy liquid metal cooled, fast reactors, the zone of contact, the contact pair reciprocating motion, boundary layer.

УДК 53.072.12

Д.Г. Крессов

**О ДИНАМИКЕ РАСХОДА ПОДКИПАЮЩЕГО ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ  
В КАНАЛАХ РЕАКТОРА ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»

С целями расширения представлений о динамических качествах контура естественной циркуляции с подкипающим теплоносителем на выходе из параллельных каналов в активной зоне PWR и поиска стабилизирующих мер в неустойчивой области анализируется равновесная нелинейная модель гидравлики. Получены решения в виде функциональных зависимостей расхода от состояния теплоносителя и ряда конструктивных особенностей контура циркуляции.

*Ключевые слова:* межканальная неустойчивость, модель, стабилизирующие меры.

**Введение**

В настоящее время отмечается возросший интерес к легководяным реакторам под давлением с естественной циркуляцией [1, 2]. При этом расчетные исследования показывают, что ряд типовых аварийных ситуаций в некоторых проектах проходит со вскипанием теплоносителя в наиболее напряженных каналах [3]. Поэтому обоснование надежного охлаждения ТВЭЛов для PWR в условиях возможной реализации механизма межканальной неустойчивости, характерного для малых паросодержаний [4], остается актуальной задачей.

Известен достаточно обширный перечень стабилизирующих мер (дресселирование каналов, «подрезка» индивидуальных тяговых участков и др.), конструктивное воплощение которых при наличии в проекте соответствующих «резервов» может представлять практический интерес. Выбор направления оптимизации предполагает предварительные проработки различных конструктивных вариантов.

Анализ линейных моделей показывает, что, например, при определенном распределении гидравлических потерь по длине канала вскипание теплоносителя оказывается недостаточным условием для реализации обсуждаемой неустойчивости. Ее развитию могут препятствовать большие потери как на входе в канал (из-за снижения фазового запаздывания в цепи обратной связи [5]), так и на его выходе (из-за появления положительной обратной связи [6], ограничивающей область существования межканальных колебаний [7]).

Очевидно, что защищенность проекта может быть обеспечена как исключением неустойчивости, так и мерами, делающими ее проявления приемлемыми. Эти меры могут включать оптимизацию не только отмеченных ранее гидравлических характеристик. Однако для оценки их успешности требуются сравнительные исследования амплитуд, то есть – нелинейные модели.

Традиционно в дополнение к расчетным исследованиям по сложным математическим моделям для получения наиболее общих решений и накопления физических представлений привлекаются простые модели, ограниченные учетом определяющих характер изучаемых процессов факторов и пригодных для аналитического исследования [8]. Вместе с тем, известные наработки таковых для описания работы многоконтурной системы в неустойчивой области чрезмерно огрублены под задачи демонстрации изолированных физических механизмов [4, 9] и, соответственно, существенно ограничены в перечне одновременно учитываемых параметров, необходимых для количественных оценок. С целью расширения предсказательных возможностей аналитического анализа далее представлено развитие рассмотренной в [7] линейной модели третьего порядка, включающее описание определяющих нелинейностей и обратных связей в теплогидравлике контуров естественной циркуляции.



### Описание модели

Рассмотрим модель, описывающую контур естественной циркуляции (рис. 1), состоящий из двух идентичных каналов с точечными нагревателями («Н»), необогреваемых индивидуальных тяговых участков (ИТУ) и одной петли теплосъема с точечным теплообменником («Т»). Для формулировки модели будем исходить из ряда упрощающих предположений:

- 1) давление в контуре, энтальпия входа, мощности теплоподвода и теплоотвода постоянны;
- 2) между нагревателем и теплообменником гомогенизированный кипящий теплоноситель, на остальных участках контура – не кипящий однофазный теплоноситель;
- 3) проскальзыванием фаз пренебрегается;
- 4) в качестве средней плотности теплоносителя в ИТУ принимается плотность на половине их высоты<sup>1</sup>;
- 5) гидравлические потери по участкам контура локализованы в виде местных потерь;
- 6) колебания расходов в параллельных каналах противофазные;
- 7) течение теплоносителя не меняет своего направления;
- 8) площадь проходного сечения всех участков контура постоянна и одинакова;
- 9) пренебрегается механической инерцией теплоносителя;
- 10) запаздывание описывается системой инерционных звеньев третьего (минимально необходимого для реализации колебательного звена) порядка.

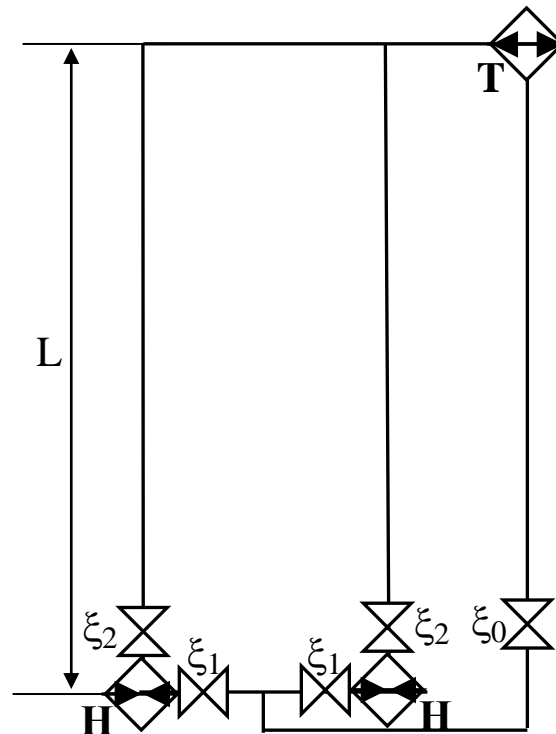


Рис. 1. Контур циркуляции

Тогда для каждого из двух контуров «нагреватель – теплообменник – нагреватель» модель можно представить в следующем виде

<sup>1</sup> Упрощение, сохраняющее, тем не менее, корректность описания фазового запаздывания, что следует из сравнения звеньев  $[1 - \exp(-2 \cdot \tau \cdot p)] / (2 \cdot \tau \cdot p)$  [4] и  $\exp(-\tau \cdot p)$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} h_i(t) = h_0 + \frac{N}{G(t)} \\ S^2 L \cdot g(\gamma_0 - H(\tau \cdot p)\gamma_i(t)) = \xi_1 \frac{G^2(t)}{\gamma_0} + \xi_2 \frac{G^2(t)}{\gamma_i(t)} + \xi_0 \frac{[2G(t)]^2}{\gamma_0} \\ \frac{1}{\gamma_i(t)} = \frac{1}{\gamma'} + \left( \frac{1}{\gamma''} - \frac{1}{\gamma'} \right) \cdot \frac{h_i(t) - h'}{h'' - h'} \\ H(\tau \cdot p) = (1 + \tau \cdot p)^{-3} \\ h_0 = \text{const}, \quad N = \text{const}, \quad P = \text{const} \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $h_n$  – энтальпия теплоносителя на выходе из нагревателя, кДж/кг;  $i_0$  – энтальпия теплоносителя на участке от теплообменника до входа в нагреватель, кДж/кг;  $N$  – мощность нагревателя, кВт;  $G$  – расход теплоносителя через один из нагревателей, кг/с;  $t$  – время, с;  $S$  – проходное сечение контуров циркуляции, м<sup>2</sup>;  $L$  – высота контура, м;  $g$  – вертикальная составляющая ускорения свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\gamma_0$  – плотность теплоносителя на участке от теплообменника до входа в нагреватель, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – передаточная функция, описывающая запаздывающую связь между плотностями теплоносителя на выходе из нагревателя и в ИТУ;  $\tau$  – 1/6 времени прохода теплоносителя по ИТУ, с;  $p$  – оператор Лапласа;  $\gamma_n$  – плотность теплоносителя на выходе из нагревателя, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi_1, \xi_2, \xi_0$  – коэффициенты местных гидравлических сопротивлений соответственно на входе в нагреватели, на выходе из нагревателей и в петле теплосъема; однократная и двукратная штриховка – соответственно вода и пар на линии насыщения;  $P$  – давление в контуре, МПа.

### Анализ решений

Представим каждую из входящих в систему (1) переменных в виде суммы из средней (стационарной) и осциллирующей составляющих. Тогда, в соответствии с предположением б, расход через канал можно записать как  $G(t)_{1,2} = \bar{G} \pm \tilde{G}(t)$ , а уравнение для его переменной обезразмеренной величины ( $\delta G = \tilde{G}/\bar{G}$ ) в виде

$$Z[1 - H(\tau \cdot p) \cdot \gamma_i(\delta G)] = \hat{\xi}_1(1 + \delta G)^2 + \hat{\xi}_2 \frac{(1 + \delta G)^2}{\gamma_i(\delta G)} + 4, \quad (2)$$

где  $Z = S^2 \cdot L \cdot g \cdot \gamma_0^2 / (\xi_0 \cdot \bar{G}^2) = 4 \cdot k \cdot \gamma_0 / (\gamma_0 - \bar{\gamma}_n)$ ;  $k = [L \cdot g(\gamma_0 - \bar{\gamma}_n)] / [4\xi_0 \bar{G}^2 \gamma_0^{-1} S^{-2}]$  – отношение общеконтурных гидравлических потерь к петлевым;  $\gamma_n(\delta G) = [1 + \delta G] / [\alpha(1 + \delta G) + \beta]$ ;  $\alpha = \gamma_0(a + b \cdot h_0)$ ;  $\beta = \gamma_0 \cdot b \cdot \Delta h$ ;  $a = 1/\gamma' - h'(1/\gamma'' - 1/\gamma')/(h'' - h')$ ;  $b = (1/\gamma'' - 1/\gamma')/(h'' - h')$ ;  $\Delta h = N_0/\bar{G}$ ;  $\hat{\xi}_j = \xi_j/\xi_0, j = 1, 2$ .

Будем искать приближенное решение (2) в виде  $\delta G(t) = A \sin(\omega \cdot t)$ . Применяя к (2) методы гармонической линеаризации [10], получим характеристическое уравнение

$$\begin{aligned} Z(\alpha - 1) - \alpha [4 + \hat{\xi}_1 + \hat{\xi}_2(\alpha + \beta)] - (\alpha + \beta) [2\hat{\xi}_1 + \hat{\xi}_2(2\alpha + \beta)] [1 + 3\tau p + 3(\tau p)^2 + (\tau p)^3] - \\ - \alpha A^2 (\hat{\xi}_1 + \alpha \hat{\xi}_2) \left[ \frac{3}{4} + \frac{3}{2} \tau p - 3(\tau \omega)^2 - 2\tau^3 \omega^2 p \right] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Разделяя в (3) реальную и мнимую части, получим систему уравнений, которую удобно решать относительно переменных  $x = A^2$  и  $y = (\tau \omega)^2$ . Путем линейных преобразований эти уравнения приводятся к двум другим, одно из которых зависит только от  $x$ , а другое – только от  $y$ . Каждое из полученных таким образом уравнений является квадратным, что предполагает четыре пары независимых решений:

$$x_{1,2} = \frac{1}{c} \left[ -\frac{d}{3} - \frac{17 \cdot e}{8} \pm f \right], \quad (4)$$

$$y_{1,2} = -\frac{7}{8} - \frac{1}{e} \left[ \frac{d}{3} \pm f \right], \quad (5)$$

где  $c = \alpha(\hat{\xi}_1 + \alpha\hat{\xi}_2)$ ,  $d = Z(\alpha - 1) - 4\alpha - \hat{\xi}_1(3\alpha + 2\beta) - \hat{\xi}_2(3\alpha^2 + \beta^2 + 4\alpha\beta)$ ,  
 $e = (\alpha + \beta) \left[ 2\hat{\xi}_1 + \hat{\xi}_2(2\alpha + \beta) \right]$   $f = \sqrt{64d^2 + 624de + 873e^2} / 24$ .

Из вида (2) следует, что при  $Z = 0$  исчезает отрицательная запаздывающая обратная связь, ответственная за колебательную неустойчивость, поэтому снижение  $Z$ , равно как и вариации других параметров, приводящие к качественно аналогичным изменениям (4) и (5), будут стабилизировать систему, что демонстрируется далее на ряде примеров.

На границе кипения ( $\bar{h} = h'$ ) предположение 2 приводит к завышению амплитуд колебаний, поскольку одна из полувольт осциллирующей части энтальпии  $\tilde{h}(t)$  в действительности будет существовать в однофазной области с низким значением  $|\partial\gamma/\partial h|$ , уменьшая коэффициент усиления цепи примерно вдвое [4]. В то же время, упрощенное описание запаздывания «срезает» амплитуду примерно на 67% по сравнению с «чистым запаздыванием» (на фазовом сдвиге  $\tau\omega = \pi/3$  [5]  $|(1 + j\tau\omega)^{-3}| \approx 0.33$ ) с приемлемой (для оценок) взаимной компенсацией этих двух грубых приближений. Для  $\bar{h} > h'$  ситуация сложнее. Неучет в модели (1) скачка  $|\partial\gamma/\partial h|$  на границе кипения приводит к снижению амплитуд колебаний с ростом  $\bar{h}$  из-за монотонного снижения  $|\partial\gamma/\partial h|$ . В действительности, по мере возрастания  $\bar{h} - h'$  следует ожидать сокращения времени пребывания  $\tilde{h}(t)$  в некипящей области с качественно иным поведением – с возрастанием амплитуд колебаний (подтверждено экспериментально [4]). Поэтому, учитывая узость диапазона неустойчивости по паросодержанию [11, 12] и, в силу этого, сохранение в этом диапазоне периодического снижения  $\tilde{h}(t)$  ниже  $h'$ , корректность сравнения решений (1) для различных  $\bar{h} > h'$  не очевидна. При количественных оценках для определенности принималось  $\bar{h} = h'$ .

Для различных режимных параметров были получены решения, из которых действительные и положительные с амплитудой меньше 1 (не нарушая предположения 7) анализировались на предмет устойчивости. Анализ заключался в составлении линеаризованного уравнения при малых отклонениях от исследуемого решения с последующей заменой периодических коэффициентов уравнения их усредненными за период значениями [10]. Далее привлекались известные для систем третьего порядка (типа  $p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + a_3 = 0$ ) алгоритмы определения фазовых портретов [13]. При этом для рассматриваемой системы:

$$a_1 = 3/\tau, \quad a_2 = 3/\tau^2 - \left[ 3 \cdot \alpha \cdot A^2 (\hat{\xi}_1 + \alpha \cdot \hat{\xi}_2) (\tau^2 \omega^2 - 1) \right] / \left[ \tau^2 (\alpha + \beta) (2 \cdot \hat{\xi}_1 + (2 \cdot \alpha + \beta) \hat{\xi}_2) \right],$$

$$a_3 = \left[ Z(1 - \alpha) + (\alpha + \beta) (2 \cdot \hat{\xi}_1 + (2 \cdot \alpha + \beta) \hat{\xi}_2) + \alpha (4 + \hat{\xi}_1 + (\alpha + \beta) \hat{\xi}_2) \right] / \left[ \tau^3 (\alpha + \beta) (2 \cdot \hat{\xi}_1 + (2 \cdot \alpha + \beta) \hat{\xi}_2) \right] +$$

$$+ \left[ 3 \cdot \alpha \cdot A^2 (\hat{\xi}_1 + \alpha \cdot \hat{\xi}_2) (\tau^2 \omega^2 - 1/2) \right] / \left[ \tau^3 (\alpha + \beta) (2 \cdot \hat{\xi}_1 + (2 \cdot \alpha + \beta) \hat{\xi}_2) \right].$$

Как показал анализ, реализуются следующие типы состояний равновесия: устойчивый «фокус», «седло-фокус» с отрицательной реальной частью комплексно сопряженных корней (траектории сближаются с расходящимися ветками седла, приводя к развитию апериодической неустойчивости) и «седло-фокус» с положительной реальной частью комплексно сопряженных корней (траектории удаляются от сходящихся веток седла, приводя к развитию колебательной неустойчивости). Решения, образующие первые два типа состояний, характеризуются отсутствием или затуханием колебаний. Решения, образующие последний тип – нарастанием колебаний, и таковые будем полагать искомыми.

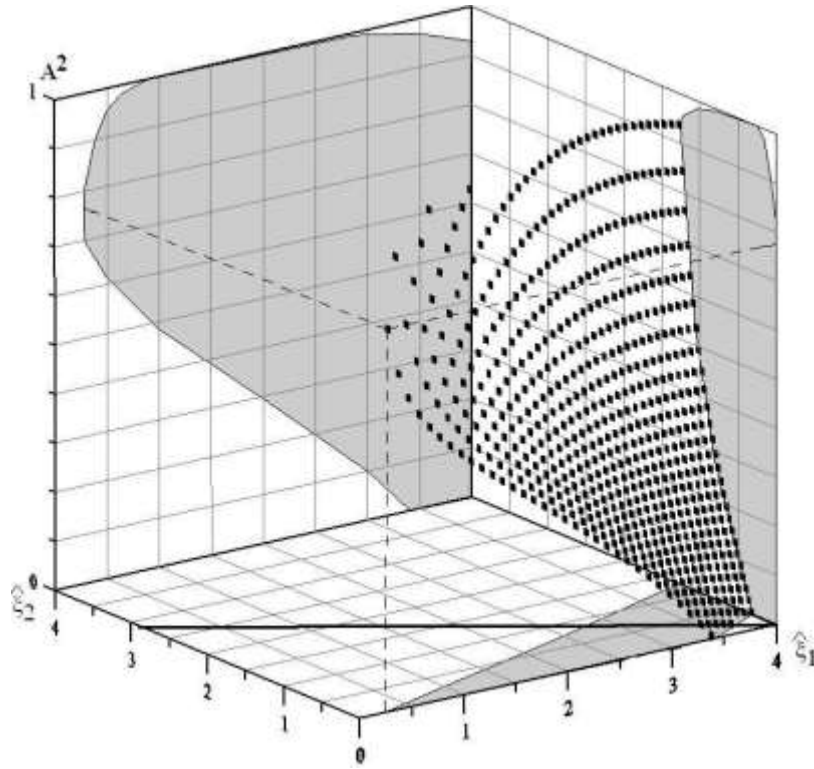


Рис. 2. Зависимость квадрата амплитуд колебаний расхода от коэффициентов гидравлических сопротивлений на границах нагревателя при  $P = 15,7$  МПа и  $T_0 = 250$  °С

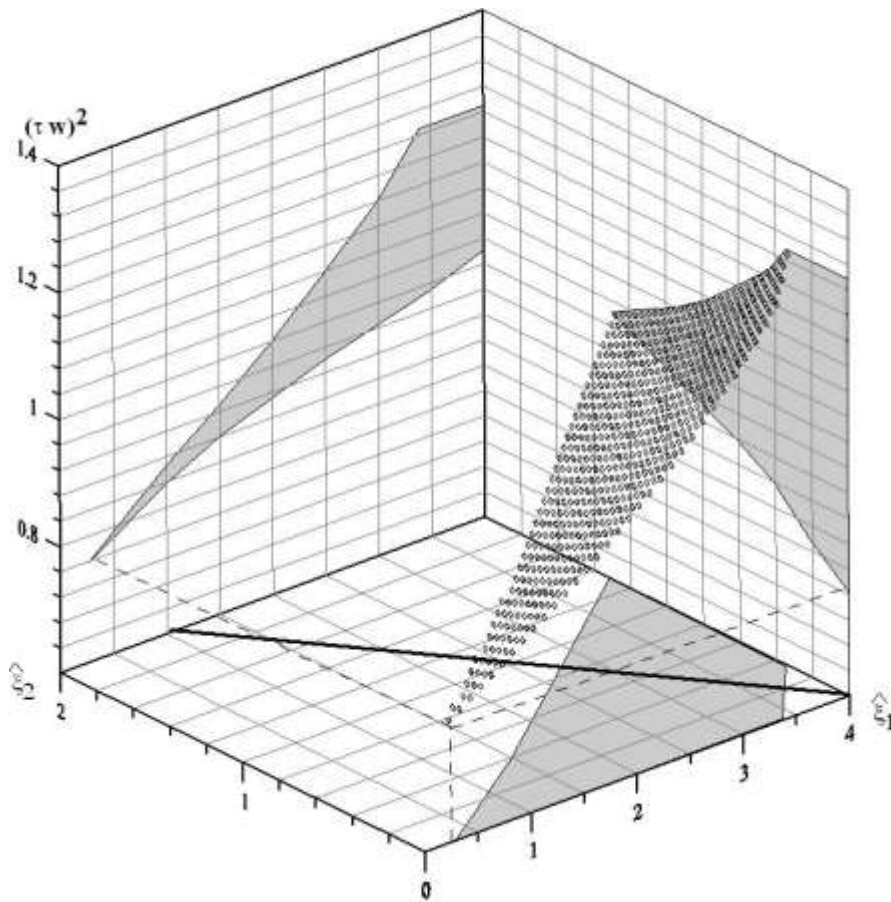


Рис. 3. Зависимость квадрата фаз колебаний расхода от коэффициентов гидравлических сопротивлений на границах нагревателя при  $P = 15,7$  МПа и  $T_0 = 250$  °С

На рис. 2 и 3 представлены искомые решения для границы равновесного кипения в виде зависимостей  $A^2$  и  $(\tau \cdot w)^2$  от коэффициентов гидравлических сопротивлений при давлении ( $P$ ) и температуре на входе в канал ( $T_0$ ) соответственно равных 15.7 МПа и 250°C ( $\alpha \approx -2.4$ ,  $\beta \approx 3.8$ ). Видно, что колебания реализуются только в области относительно малых значений  $\hat{\xi}_2$ . Можно выделить три неперекрывающиеся зоны решений. Первая ограничена условием  $\hat{\xi}_2 \geq -\hat{\xi}_1/(\alpha + 0.5 \cdot \beta)$  и характеризуется наличием двух одночастотных решений:  $x_1 > 1$ ,  $0 < x_2 < 1$ ,  $y_1 > 0$ ,  $y_2 < 0$ <sup>2</sup>. Тип равновесия решения  $(x_2, y_1)$  – «седло-фокус» с отрицательной реальной частью комплексно сопряженных корней. Вторая располагается в диапазоне  $-\hat{\xi}_1/\alpha \leq \hat{\xi}_2 < -\hat{\xi}_1/(\alpha + 0.5 \cdot \beta)$  с двухчастотными решениями, не соответствующими искомым:  $x_1 > 1$ ,  $x_2 < 0$ ,  $y_{1,2} > 0$ . Третья область (наиболее интересная для практики) ограничена условием  $\hat{\xi}_2 < -\hat{\xi}_1/\alpha$  и характеризуется наличием двухчастотных решений  $(x_1 < 0, 0 < x_2 < 1, y_{1,2} > 0, y_2 \gg y_1)$  с типами равновесия устойчивый «фокус»  $(x_2, y_2)$  и «седло-фокус» с положительной реальной частью комплексно сопряженных корней  $(x_2, y_1)$ .

Отсутствие незатухающих колебаний в области высоких гидравлических сопротивлений на выходе из нагревателя (первые две зоны) связано с возникающей при вскипании сильной положительной обратной связью «расход – плотность – гидравлические потери как функция плотности – расход», приводящей к аperiodической дестабилизации системы<sup>3</sup>. Увеличение доли местных потерь на входном участке приводит к возрастанию стабилизирующего влияния отрицательной обратной связи «расход – гидравлические потери как функция расхода – расход». Конкурирующее воздействие этих двух обратных связей образует область параметров, где может проявляться третья обратная связь, запаздывающая и отрицательная «расход – плотность – напор – расход», ответственная за возникновение периодической неустойчивости (третья зона). Увеличение в этой области местного сопротивления на входе приводит к снижению амплитуды и периода колебаний, вплоть до их исчезновения, а увеличение сопротивления на выходе из канала – к росту этих характеристик.

Для удобства рассмотрим полученные решения на плоскости, соответствующей, например, равенству петлевых и зонных потерь:  $k = 2$  (на рис. 2 и 3 сплошной линией отмечен след этой плоскости). При этом  $k$  канальные сопротивления для рассматриваемой модели связаны соотношением

$$\hat{\xi}_1 + \hat{\xi}_2 \cdot \gamma_0 / \gamma' = 4. \quad (6)$$

Искомые решения для плоскости 6 при различных режимных параметрах представлены на рис. 4, где штриховкой отмечены границы третьей области для различных режимных параметров. Как следует из сравнения полученных решений, зависимость величины амплитуды от режимных параметров качественно согласуется с функциональной зависимостью от них квазистатического коэффициента цепи обратной связи ( $K_{\text{нб}} = \partial \gamma / \partial h \cdot (h' - h_0) / (\gamma_0 - \gamma')$ ) – амплитуда увеличивается с ростом  $|\partial \gamma / \partial h|$  и недогрева на входе в канал [4, 14].

Одновременно с ростом  $K_{\text{ст}}$  возрастает абсолютное значение величины  $\alpha$ . Это приводит к сокращению области колебательной неустойчивости, ограниченной условием

<sup>2</sup> Вопрос о существовании и устойчивости колебаний с амплитудами большими 1 для принятых посылок остается открытым и может потребовать усложнения модели (с заменой в (1)  $G^2(t)$  на  $G(t)|G(t)|$  и  $h_0 \neq \text{Const}$ ).

<sup>3</sup> Означает возможность перехода в область большего паросодержания, что при реализации неоднозначной гидравлической характеристики может приводить к развитию парогенераторной неустойчивости [6] и отмечалась как «аperiodический срыв расхода» в ряде экспериментов по исследованию влияния на межканальную устойчивость форм контура циркуляции [4].

$\hat{\xi}_1 > |\alpha| \cdot \hat{\xi}_2$ . Вблизи этой границы зависимость амплитуды колебаний от  $\hat{\xi}_i$  существенно возрастает. Соответственно возрастает и «цена» погрешности определения гидравлических сопротивлений по длине канала. Наиболее критичным при обработке результатов проливки представляется «размазывание» местных потерь нижней части ИТУ на путевые потери активной зоны<sup>4</sup>.

### Некоторые прикладные оценки

Возможность реализации значительных амплитуд (вплоть до «опрокидывания» циркуляции – рис. 4) может потребовать оптимизации условий работы контура. В этой связи есть возможность сопоставить характер снижения амплитуд при дросселировании каналов на входе и при «подрезке» ИТУ. В последнем случае модель (1) дополняется введением общего тягового участка (ОТУ) путем изменения первого слагаемого параметра  $d$  в выражениях (4) и (5):  $Z[\bar{L}_{\text{ИТУ}}(\alpha - 1) + \bar{L}_{\text{ОТУ}}\alpha \cdot \varepsilon]$  вместо  $Z(\alpha - 1)$  ( $\varepsilon = 1 - \gamma'/\gamma_0 \ll 1$ ,  $\bar{L}_{\text{ИТУ}}$  и  $\bar{L}_{\text{ОТУ}}$  – отношение длин индивидуального и общего подъемных участков к их суммарной длине). На рис. 5 представлен характер влияния этих двух способов оптимизации на амплитуду колебаний при различных параметрических условиях. Из результатов следует возрастание эффективности «подрезки» с уменьшением относительной длины ИТУ (при этом увеличение недогрева на входе приводит к росту  $\varepsilon$ , что препятствует уменьшению параметра  $d$  при увеличении  $\bar{L}_{\text{ОТУ}}$ ), тогда как эффективность дросселирования может снижаться с ростом сопротивления на входе. Очевидно, что выбор способа оптимизации будет зависеть от стартовых условий и оценки изменений условий самопрофилирования (данный вопрос выходит за рамки данной работы).

Дополнительно можно отметить, что при ламинаризации течения на входном участке ( $\Delta P_{\text{вх}} \sim \xi_1 G$ ) входящие в решения (4) и (5) параметры принимают следующий вид:  $c = \alpha^2 \hat{\xi}_2$ ,  $d = Z(\alpha - 1) - 4\alpha - \bar{\xi}_1(2\alpha + \beta) - \hat{\xi}_2(3\alpha^2 + \beta^2 + 4\alpha\beta)$ ,  $e = (\alpha + \beta)[\bar{\xi}_1 + \hat{\xi}_2(2\alpha + \beta)]$ ,  $\bar{\xi}_1 = \xi_1/(\xi_0 G_0)$ . Наиболее существенно изменение параметра  $c$ : если для автомодельного течения при малых значениях  $\hat{\xi}_2$   $c < 0$ , то при ламинарном течении  $c > 0$ . Это приводит к исчезновению искомым решений в третьей области (развитие колебаний в области больших значений  $\hat{\xi}_2$  здесь также не реализуется). Таким образом, гармоническая линейаризация прогнозирует стабилизирующее влияние ламинаризации течения на входе (согласуется с результатами анализа [4] «модели первого приближения» И.И. Морозова).

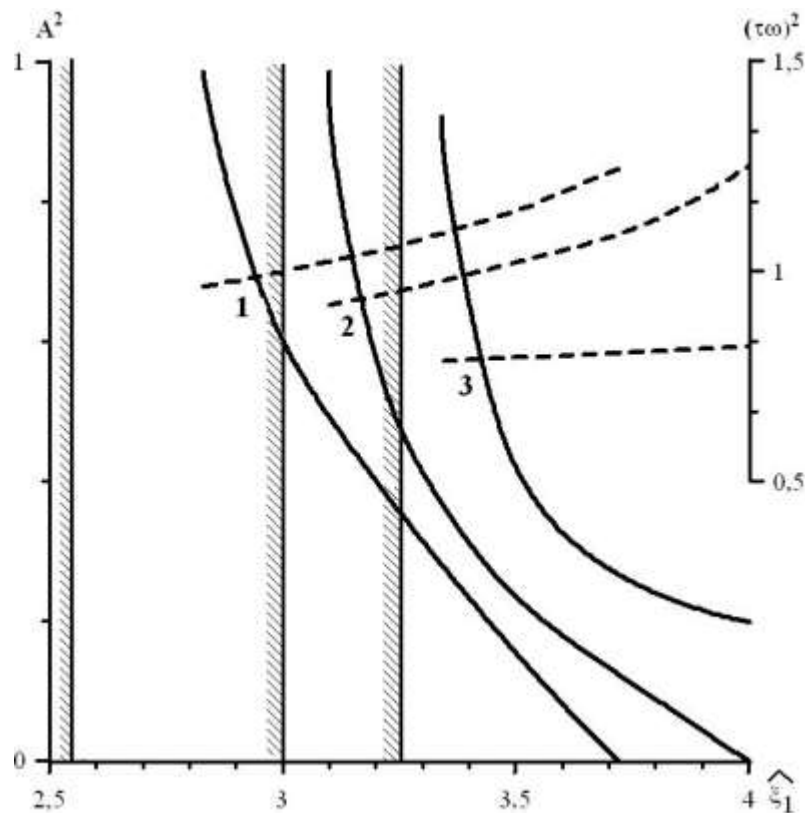
Представленная на рис. 4 параметрическая зависимость амплитуд качественно сохраняется и для высших гармоник – рис. 6. При этом, учитывая, что (2) в общепринятом для задач гармонической линейаризации виде может быть записано как  $Q(p)\delta G + F(\delta G, p\delta G) = 0$ , относительные амплитуды высших гармоник (при использованном в данной работе представлении функции запаздывания) обратно пропорциональны частотному полиному  $\delta_m \sim 1/|Q| \sim 1/|(1 + j \cdot m \cdot \tau \cdot \omega)^3|$  [10]. Из последнего выражения следует снижение этих амплитуд с ростом номера гармоники  $m$ . Так, в работах [11, 14, 16] форма эксперимента колебания отмечается как близкая к синусоидальной.

Несложно убедиться, что суммарный сигнал будет ненулевым лишь в случаях, если четные гармоники складываются (на общем участке контура) четное, а нечетные гармоники – нечетное количество раз. Например, при возникновении неустойчивости в двух каналах с

<sup>4</sup> В плане уточнения распределения гидравлических потерь по длине канала представляется полезным опыт расчетной «проливки» по 3D-моделям [15], упрощающей поучастковый анализ в сравнении с натурным экспериментом при больших возможностях приближения модели канала к проектным условиям его работы.

переменными составляющими расходов, содержащими только первую и вторую гармоники (решения:  $\delta G_1 = A[\sin w \cdot t + \delta_2 \sin(2w \cdot t)]$  и  $\delta G_2 = A[\sin(w \cdot t + \pi) + \delta_2 \sin(2w \cdot t)]$ ), возмущение общереакторного расхода реализуется. При сложении возмущений того же частотного спектра от трех каналов ( $\delta G_1 = B[\sin v \cdot t + \varepsilon_2 \sin(2v \cdot t)]$ ,  $\delta G_{2,3} = B[\sin(v \cdot t \pm 2\pi/3) + \varepsilon_2 \sin(2v \cdot t \mp 2\pi/3)]$ ) результат будет нулевым. При сложении трехчастотных возмущений третья гармоника даст ненулевой вклад при трехканальном, пятиканальном и тому подобном взаимодействии. Однако при увеличении количества взаимодействующих каналов  $n$  (например, с двух до трех) абсолютное значение отрицательного параметра  $d$  снижается за счет увеличения второго его положительного слагаемого ( $-2^n \alpha$ ,  $\alpha < 0$ ) и, как следствие,  $B < A$ ,  $v > w$ . То есть абсолютные амплитуды высших гармоник, включая «слабую» третью, дополнительно уменьшатся с ростом  $n$  за счет снижения амплитуды и периода основной гармоники. Таким образом, проявление межканальной неустойчивости в общереакторном расходе будет наиболее «контрастным» при четном взаимодействии.

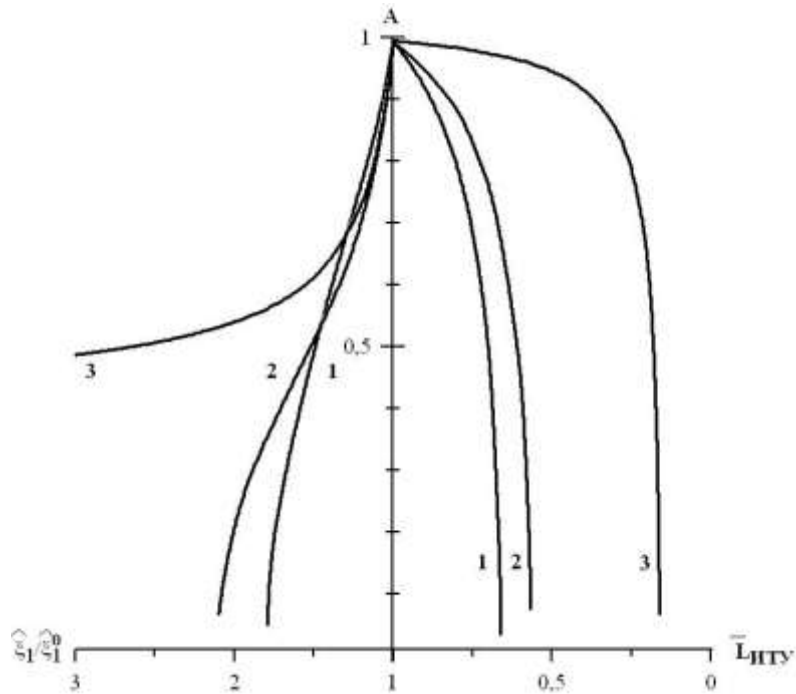
Соответствующим будет и проявление дестабилизирующего влияния гидравлических потерь на общем участке [5]. Поэтому правомерно ожидать, что активная зона, профилированная так, что близкие теплогидравлические характеристики реализуются в группах с нечетным количеством одновременно подкипающих каналов, будет обладать дополнительным стабилизирующим качеством.



**Рис. 4.** Зависимости квадратов амплитуд и фаз (пунктир) колебаний расхода, а также границ колебательной неустойчивости (штриховка) от коэффициентов гидравлических сопротивлений на границах нагревателя, связанных соотношением (6):

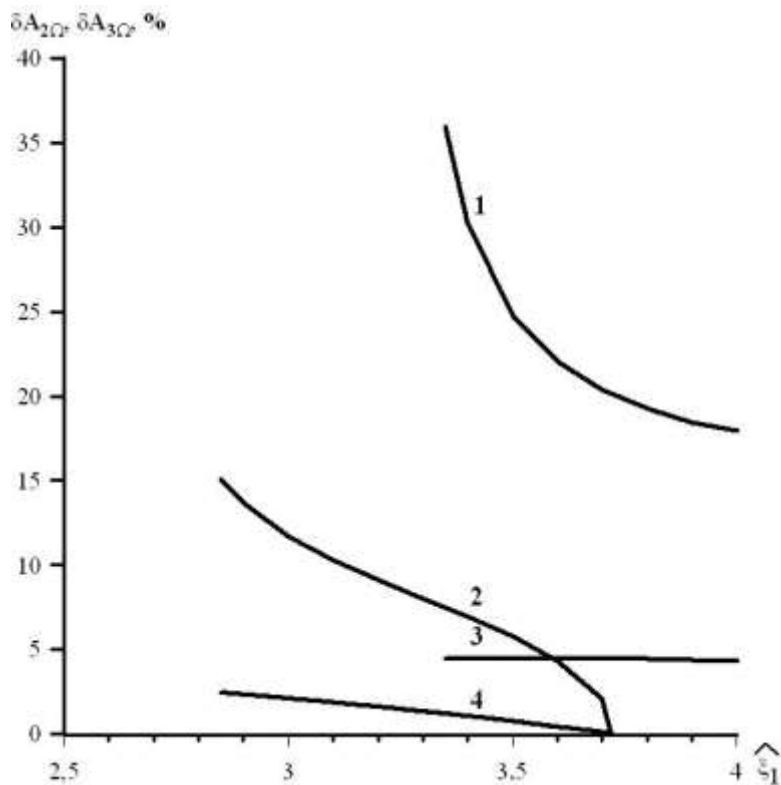
1 – при  $P = 15,7$  МПа и  $T_0 = 250$  °С; 2 – при  $P = 15,7$  МПа и  $T_0 = 200$  °С;

3 – при  $P = 7,6$  МПа и  $T_0 = 200$  °С



**Рис. 5. Зависимости амплитуд колебаний расхода от степени дросселирования каналов на входе и от относительной длины ИТУ:**

1 – при  $P = 15,7$  МПа и  $T_0 = 250$  °С; 2 – при  $P = 15,7$  МПа и  $T_0 = 200$  °С; 3 – при  $P = 7,6$  МПа и  $T_0 = 200$  °С



**Рис. 6. Зависимости амплитуд высших гармоник колебаний расхода (в процентном выражении от основной частоты) от коэффициентов гидравлических сопротивлений на границах нагревателя, связанных соотношением (6):**

1 – вторая гармоника при  $P = 7,6$  МПа и  $T_0 = 200$ °С; 2 – вторая гармоника при  $P = 15,7$  МПа и  $T_0 = 250$ °С; 3 – третья гармоника при  $P = 7,6$  МПа и  $T_0 = 200$ °С; 4 – третья гармоника при  $P = 15,7$  МПа и  $T_0 = 250$ °С



## Выводы

На базе известных теоретических методов проведен анализ нелинейной теплогидравлической модели реактора с подкипающим теплоносителем при естественной циркуляции. Получены аналитические зависимости границ существования межканальной неустойчивости и характеристик колебаний расхода от совокупности режимно-конструктивных параметров контура. Показана критичность характера динамики подкипающего теплоносителя к точности описания гидравлических потерь. Дана оценка эффективности ряда стабилизирующих мер.

## Библиографический список

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling: 2007, IAEA-TECDOC-1536, Vienna (January 2007).
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Design Features to Achieve Defence in Depth in Small and Medium Sized Reactors, IAEA Nuclear Energy Series No.NP-T-2.2, Vienna (2009).
3. **Modro, M.** // Multi-application small light water reactor: Final report, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL) Report (December 2003).
4. **Митенков, Ф.М.**, Устойчивость подкипающих аппаратов / Ф.М. Митенков [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1981.
5. **Митенков, Ф.М.**, Механизмы неустойчивых процессов в тепловой и ядерной энергетике / Ф.М.Митенков, Б.И. Моторов. – М.: Энергоиздат, 1981.
6. **Морозов, И.И.**, Устойчивость кипящих аппаратов / И.И. Морозов, В.А. Герлига. – М.: Атомиздат, 1969.
7. **Крессов, Д.Г.** Влияние распределения гидравлических потерь на устойчивость межканальной циркуляции при малом паросодержании // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 2. С. 80–84.
8. **Смирнов, Л.В.**, Роль простых моделей динамики ЯЭУ / Л.В.Смирнов, Е.В. Сабаев, А.Л. Пригоровский // Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации: тез. докл. Семинара секции динамики», Сосновый Бор, НИТИ, 18–22 сентября 2000 г. С 49–50.
9. **Прошутинский, А.П.**, Исследование влияния числа параллельных каналов на теплогидравлическую межканальную устойчивость / А.П. Прошутинский, А.Г. Лобачев // Теплоэнергетика. 1981. № 11. С. 58–61.
10. **Попов, Е.П.** Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах / Е.П.Попов. – М.: Наука, 1973.
11. **Прошутинский, А.П.**, Исследование параметров автоколебаний расхода теплоносителя в испарительном канале кипящего реактора / А.П. Прошутинский, А.Г. Лобачев // Теплоэнергетика. 1979. № 3. С 51–55.
12. **Бурлаков, Е.Б.**, Исследование теплофизических и гидродинамических процессов в кипящих ядерных реакторах / Е.Б. Бурлаков, Г.Е. Маслов, В.И. Смолин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1978. Вып. 1 (21). Ч. 2. С. 16–36.
13. **Рабинович, М.И.** Введение в теорию колебаний и волн: учеб. пособие /М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
14. **Долгов, В.В.** О гидродинамической неустойчивости в реакторах, охлаждаемых кипящей водой / В.В.Долгов, О.А. Судницын // Теплоэнергетика. 1965. № 3. С. 36.
15. **Большухин М.А.**, Применение программного комплекса ANSYS CFX и StarCD для расчетов гидродинамики движения теплоносителя во внутренних полостях различного оборудования ЯЭУ / М.А. Большухин, В.А. Бабин, Д.Н. Свешников // Международная конференция пользователей Ansys, Сб. докладов, 2006. Москва, 1-3 ноября.
16. **Комышный, В.Н.** Особенности поведения границ областей межканальных пульсаций / В.Н. Комышный [и др.] // Атомная энергия. 1983. Т. 54. Вып. 3. С. 173–175.

*Дата поступления  
в редакцию 24. 04.2012*

**D.G. Kresov**

**ABOUT DYNAMICS OF THE FLOW BOILING-UP WATER COOLANT  
IN CHANNELS OF THE REACTOR UNDER PRESSURE**

Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering. I.I. Afrikantova

**Purpose:** Expansion of representations about dynamic qualities of a head loop of natural circulation with boiling-up coolant on an exit from parallel channels in active zone PWR and searching of stabilizing measures in unstable area.

**Design/methodology/approach** Results of the theoretical analysis are presented at use of known methods of harmonious linearization and the theory of oscillations.

**Findings:** It can be used as addition of desing researches, for example, at estimations of efficiency of stabilizing measures.

**Research:** limitations/implications The gained solutions of nonlinear model allow to lead the primary analysis of dynamics of the flow at boiling-up coolant in channels PWR.

**Originality/value:** The model includes defining nonlinearity and feedbacks in contours with a natural curculation that does possible reception of quantitative estimations.

*Key words:* interchannel instability, the model, stabilizing measures.

УДК 629.733 : 539.124

А.И. Салмин

**ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ АЭРОСТАТА, ЗАПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРОНАМИ  
ВМЕСТО ПОДЪЁМНОГО ГАЗА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье обсуждается аэростат, заполненный электронами вместо подъёмного газа. Чтобы электроны не покидали оболочку, её внутренние стенки заряжены отрицательно. Для этого они выполнены в виде трёхслойного аккумулятора электроэнергии: внутренний слой – катод, наружный слой – анод, между ними слой сепаратора, заполненный электролитом. Есть ещё внешний слой защитной диэлектрической оболочки. Чтобы создать такую оболочку, специалисты должны рассмотреть ряд вопросов. Показывается, что не произойдёт пробой стенки аккумулятора, хотя внутри оболочки содержится большой заряд. Исследуется влияние вакуума на катодный слой оболочки. Показано, что электроны не оседают на стенки оболочки. Доказывается, что сила Кулона, которая возникает при взаимном отталкивании электронов, достаточна для противостояния атмосферному давлению. Оценивается масса плёночного аккумулятора в составе оболочки. Объясняется, почему не происходит разряда молнии снаружи оболочки.

*Ключевые слова:* аэростат, дирижабль, дирижаблестроение, электрон, давление, аккумулятор, парадокс.

В XXI веке конкуренция между самолётами и дирижаблями, видимо, как и в XX веке, решится в пользу самолётов, то есть самолётов в небе будет больше, чем дирижаблей. Но по мере иссякания легко доступных залежей нефти, когда дорого станет сжигать керосин в двигателях самолётов, инженеры вновь обратятся к строительству дирижаблей, расход топлива у которых гораздо меньше, чем у самолётов. Дирижаблям не требуется топливо для создания подъёмной силы, оно им нужно только для движения в отличие от самолётов. Конечно, будет развиваться производство топлива из растительного сырья, но оно ограничено приростом биомассы культурных растений в летний период и необходимостью расходовать большую часть этой биомассы на еду. Тогда дирижабли станут наряду с самолётами массовым видом транспорта.

Специалисты подсчитали, что мировая потребность в дирижаблях (без учёта России) составляет порядка 1000–1268 кораблей [1]. Если же использовать дирижабли в качестве летающих автомобилей и организовать их интенсивное регулируемое движение в воздухе [8, 10], то потребности в дирижаблях будут сопоставимы с численностью автомобильного транспорта. Но на пути массового производства дирижаблей возникает неожиданное препятствие. Использовать горючий водород в качестве подъёмного газа опасно. Дирижаблестроители находятся под впечатлением аварий дирижаблей 1930-х годов, когда заполненные водородом дирижабли сгорали как факелы. Запасы же гелия в природе ограничены, может не найтись гелия для заполнения тысяч дирижаблей. Кроме того, изъятие гелия из природы может оказаться небезопасным. Экологи уже давно обсуждают проблемы озоновой дыры в атмосфере [6]. Если из верхних слоёв атмосферы изъять ещё и гелий, добывая его оттуда, то возникнет гелиевая дыра, что может создать новые экологические проблемы. Гелий не поглощает свет в ультрафиолетовом диапазоне, только в видимом. Чем вреден поглощаемый гелием в верхних слоях атмосферы свет мы узнаем только после его попадания в избыточном количестве на Землю. О последствиях можно пока только гадать и выдвигать разные гипотезы. Например, растения начнут производить более низкокачественный кислород, используемый нами для дыхания. Последствия могут оказаться столь тонкими, что мы поздно поймём их суть, и не сможем вовремя исправить положение.

Выход из создавшейся ситуации видится в том, чтобы использовать вместо подъёмного газа электроны, которые мы можем получить в сколь угодно большом количестве. Дири-

жабли с оболочкой, заполненной электронами, станут дирижаблями нового, четвёртого поколения [9].

Условно классификацию дирижаблей по поколениям можно представить следующим образом. Дирижабли второго поколения (цеппелины) выполняли функции, ставшие впоследствии функциями самолётов (бомбардировка, разведка, перевозка пассажиров и грузов между портами). Дирижабли первого поколения – это те экспериментальные образцы, которые строились до цеппелинов, чаще всего использующие нагретый воздух в качестве подъёмного газа. Дирижабли первого поколения с нагретым воздухом активно используются в спортивных целях до настоящего времени. Дирижабли третьего поколения – те, которые были спроектированы после цеппелинов и выполняют функции на стыке воздушного и водного транспорта или воздушного и наземного транспорта (строительство, сельское хозяйство, спорт, лесоводство, рыбоводство, коммунальное хозяйство, доставка самолётов и космических кораблей и т. д.).

Дирижабль четвёртого поколения имеет заряженную оболочку. В простейшем случае, чтобы поддерживать одноимённый с электронами отрицательный заряд на внутреннем слое оболочки, оболочка изготавливается в форме аккумулятора электроэнергии [9]. Внутренний слой с отрицательным зарядом играет роль катода, следующим слоем является сепаратор, пропитанный электролитом, следующий слой играет роль анода, он положительно заряженный, и последний наружный слой – диэлектрическая защитная оболочка. Внутри такой заряженной оболочки можно поместить любые заряженные составляющие атом частицы, в том числе положительно заряженные, тогда слои оболочки придётся поменять местами, чтобы положительно заряженный слой был внутри. Но электрон – это единственная надёжная стабильная частица, остальные частицы имеют время жизни, поэтому не подходят для решения рассматриваемой задачи. Кроме того, с помощью простейшей телевизионной электронной пушки мы можем получить любое количество электронов. Чтобы получить большое количество других частиц, потребуется длительная работа ускорителя, которая обесценивается в связи с коротким временем жизни частиц. Поэтому электрон – наиболее подходящее содержимое для заряженной оболочки.

Наличие электронов в оболочке позволяет сделать её стенки достаточно тонкими. Известно, что вакуумный дирижабль, то есть дирижабль, содержащий вместо подъёмного газа внутри оболочки вакуум, невозможно построить, поскольку его стенки должны быть такими толстыми, что их вес будет превышать подъёмную силу азостата [2]. Вакуум не способен противостоять атмосферному давлению, поэтому, чтобы не допустить, чтобы шар лопнул, требуется делать стенки оболочки массивными. В оболочке, заполненной электронами, в ответ на внешнее атмосферное давление, пытающееся сжать её, электроны отталкиваются друг от друга кулоновскими силами, не позволяя оболочке схлопываться. Поскольку кулоновские силы и отталкивание электронов друг от друга растут при сближении электронов, увеличению внешнего давления будет противостоять всё увеличивающаяся сила отталкивания электронов друг от друга. Поэтому оболочка с электронами может существовать в атмосфере других планет, чьё атмосферное давление больше земного, а также под водой, в гидросфере Земли. При погружении оболочки с электронами под воду она будет сжиматься за счёт уменьшения расстояния между электронами при увеличении внешнего давления до того момента, как произойдёт пробой аккумулятора оболочки. Чем больше объём оболочки, тем больше количество электронов в ней, и тем позже наступит пробой оболочки.

Возможно экспериментально найти, сколько электронов  $n$  мы запустили в оболочку, исходя из времени включения электронной пушки  $t$ , силы тока в ней  $I$  и заряда электрона  $e$

$$n = I : (et). \quad (1)$$

Если мы, регулируя силу тока и время включения электронной пушки по формуле 1, заполним оболочку объёмом  $1 \text{ м}^3$  таким же количеством электронов, каково количество молекул водорода, то их масса будет меньше массы такого же по количеству молекул водорода

во столько же раз, во сколько масса электрона меньше массы молекулы водорода, то есть в 7354 раза.

Практическое наполнение оболочки электронами подразумевает ответ на ряд вопросов. Первый вопрос: достаточна ли сила Кулона, которая возникает при взаимном отталкивании электронов, для противостояния атмосферному давлению? Не понадобится ли слишком большая концентрация электронов, технически недостижимая, чтобы сопротивляться атмосферному давлению?

Для ответа на этот вопрос построим следующую модель. Мысленно проведём вертикальную ось, протыкающую оболочку в любом её месте. На этой оси будет располагаться сверху маленький участок верхней части оболочки, который давит на электроны сверху, снизу – маленький участок нижней части оболочки, который давит на электроны снизу, а между ними вдоль оси будет располагаться стопка электронов, которая сжимается непосредственно этими двумя участками оболочки. Электроны не будут располагаться строго один под другим, будут отклоняться от оси влево и вправо, но для оценочных расчётов можно их считать располагающимися строго один под другим с некоторой погрешностью, средним отклонением. Таких вертикальных осей можно провести очень много, хотя и не бесконечное число раз. Площадь участков оболочки, сжимающих каждую стопку электронов, будет мала, но не бесконечно мала. Линейные размеры участков оболочки сопоставимы со средним размером электрона, поскольку размеры стопки в горизонтальной плоскости ограничены размером электрона. Может возникнуть вопрос, как молекулярное давление воздуха передаётся на площадку, пропорциональную размерам электрона, то есть намного меньшую, чем размеры молекул. Оболочка играет роль рычага, передающего это давление. Давление на стопку воспринимает горизонтальная площадка, покрывающая пространство над и между соседними стопками электронов, расстояние между которыми сопоставимо со средним расстоянием между электронами. Но передаётся давление на участок, сопоставимый с размерами электрона.

Сначала рассчитаем силу Кулона, действующую между двумя соседними электронами в стопке. Для этого потребуется оценить среднее расстояние между соседними электронами. Пусть концентрация электронов равна концентрации молекул водорода в такой же по объёму оболочке при нормальных условиях. Вычислим число молекул водорода в объёме  $1 \text{ м}^3$ . 1 моль водорода содержит, как и все газы, число молекул, равное числу Авогадро:  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ . 1 моль водорода, как и все газы при нормальных условиях, составляет объём  $V_{1\text{моль}} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . В  $1 \text{ м}^3$  водорода содержится

$$1000 : 22,4 \cdot 10^{-3} = 44642,8 \text{ моль водорода.} \quad (2)$$

В  $1 \text{ м}^3$  водорода содержится число молекул  $\mathcal{N}_{\text{H}_2}$

$$\mathcal{N}_{\text{H}_2} = 44642,8 N_A = 44642,8 \cdot 6,022045 \cdot 10^{23} = 268838,9 \cdot 10^{23}. \quad (3)$$

В одном измерении содержится в корень из трёх раз меньше молекул или электронов, чем в объёме. Тогда число электронов в стопке  $\mathcal{N}_{\text{СТ}}$

$$\mathcal{N}_{\text{СТ}} = (2688389 \cdot 10^{24})^{1/3} = 29,95 \cdot 10^8 \text{ штук.} \quad (4)$$

Тогда расстояние между двумя соседними электронами в стопке  $r_{\text{СТ}}$ , оно же среднее расстояние между электронами, равно

$$r_{\text{СТ}} = 1 \text{ м} : \mathcal{N}_{\text{СТ}} = 1 \text{ м} : 29,95 \cdot 10^8 = 3,33 \cdot 10^{-10} \text{ м.} \quad (5)$$

Подставим это число в формулу для силы Кулона

$$F_{\text{КЛ}} = e^2 : (4\pi \epsilon_0 r_{\text{СТ}}^2) = (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2 : (4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} (3,33 \cdot 10^{-10} \text{ м})^2) = \\ = 2,08 \cdot 10^{-9} \text{ Н} \quad (6)$$

Чтобы вычислить силу, которой атмосфера давит на стопку электронов, запишем условие, подобное условию рычага. Как было сказано ранее, сила атмосферного давления  $F_{\text{АТМ}}$  давит на квадратную площадку в составе оболочки, сторона которой равна расстоянию

между стопками электронов или среднему расстоянию между электронами  $r_{ст}$ . Сила Кулона  $F_{КЛ}$ , действующая со стороны электрона, давит преимущественно на квадратную площадку, сторона которой равна диаметру электрона или удвоенному радиусу электрона  $2r_e$ . Из равенства электрического и атмосферного давлений следует уравнение, отдалённо напоминающее уравнение рычага

$$F_{КЛ} : 4 r_e^2 = F_{АТМ} : r_{ст}^2. \quad (7)$$

Чтобы наглядно понять уравнение 7, представьте себе ногу в ботинке, наступившем на не до конца вбитый гвоздь. Нога давит на всю подошву ботинка, но гвоздь давит не на всю подошву, а только на площадку над шляпкой гвоздя. За счёт разной площади распределения силы меньшая сила со стороны гвоздя уравнивает большую силу со стороны ноги. Из уравнения 7 выразим силу Кулона, действующую со стороны электрона, через атмосферное давление  $P_{АТМ}$ :

$$F_{КЛ} = (F_{АТМ} : r_{ст}^2) 4r_e^2 = P_{АТМ} 4r_e^2 = 101325 \text{ Па} \cdot 4 (2,8 \cdot 10^{-15} \text{ м})^2 = 31,77 \cdot 10^{-25} \text{ Н}. \quad (8)$$

Сравнивая силы в формулах 6 и 8, мы видим, что сила, требующаяся для уравнивания атмосферного давления, много меньше силы отталкивания электронов при концентрации электронов, равной концентрации молекул водорода в нормальных условиях. Чтобы электроны не разорвали оболочку, их количество в стопке должно быть во много раз меньше, чем количество молекул водорода в стопке такого же размера в оболочке такого же объёма в нормальных условиях. Возможно посчитать количество электронов в оболочке объёмом  $1 \text{ м}^3$ . Но при подсчёте электрической силы, уравнивающей атмосферное давление, следует учитывать, что на площадку  $4r_e^2$ , равную квадрату диаметра электрона или учетверённому квадрату его радиуса, давит электрическая сила не со стороны одного электрона, а нескольких. Их электрические силы по правилу суперпозиции необходимо сложить. При подсчёте следует сложить электрические силы, действующие со стороны первого и второго электронов стопки, а также со стороны первых электронов четырёх соседних стопок. Влияние более удалённых электронов менее выражено, поскольку кулоновская сила падает с квадратом расстояния, поэтому им пренебрегаем. Сила, действующая со стороны атмосферного давления  $F_{АТМ}$ , равна

$$F_{КЛ} = P_{АТМ} r_{ст}^2 = F_{01} + F_{02} + F_{11} + F_{21} + F_{31} + F_{41}. \quad (9)$$

Здесь  $P_{АТМ}$  – атмосферное давление,  $r_{ст}$  – среднее расстояние между электронами, а также между первым электроном внутри оболочки и электроном в составе иона оболочки,  $F_{01}$  – сила, действующая на электрон в составе иона оболочки со стороны первого электрона стопки,  $F_{02}$  – сила, действующая на электрон в составе иона оболочки со стороны второго электрона стопки,  $F_{11}$  – сила, действующая на электрон в составе иона оболочки со стороны первого электрона первой соседней стопки,  $F_{21}$  – сила, действующая на электрон в составе иона оболочки со стороны первого электрона второй соседней стопки,  $F_{31}$  – сила, действующая на электрон в составе иона оболочки со стороны первого электрона третьей соседней стопки,  $F_{41}$  – сила, действующая на электрон в составе иона оболочки со стороны первого электрона четвёртой соседней стопки.

$$F_{01} = e^2 : (4 \pi \epsilon_0 r_{ст}^2), \quad (10)$$

$$F_{02} = e^2 : (4 \pi \epsilon_0 (2r_{ст})^2), \quad (11)$$

$$F_{11} = F_{21} = F_{31} = F_{41} = e^2 : (4 \pi \epsilon_0 (2^{0,5} r_{ст})^2). \quad (12)$$

В формуле 11 расстояние  $r_{ст}$  удвоено, поскольку второй электрон находится в два раза дальше от электрона в составе иона оболочки, чем первый электрон. В формуле 12 расстояние  $r_{ст}$  содержит множитель  $2^{0,5}$ , поскольку по теореме Пифагора расстояние  $r_x$  между электроном в составе иона оболочки и первым электроном соседней стопки равно корню квадратному суммы расстояния между первым электроном стопки и электроном в составе иона

оболочки в квадрате  $r_{cm}^2$  и расстояния между первыми электронами соседних стоек в квадрате  $r_{ст}^2$ :

$$r_x = (r_{ст}^2 + r_{ст}^2)^{0,5} = 2^{0,5} r_{ст}^2 \quad (13)$$

Если мы подставим формулы 10–12 в формулу 9, то сможем найти среднее расстояние между электронами  $r_{ст}$ :

$$F_{КЛ} = (e^2 / 4 \pi \epsilon_0) ((1/r_{ст}^2) + (1/4r_{ст}^2) + (1/2r_{ст}^2)). \quad (14)$$

Отсюда

$$r_{ст} = (3,25 / 4 \pi \epsilon_0 F_{КЛ})^{0,5} e = (3,25 / 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 31,77 \cdot 10^{-25} \text{ Н})^{0,5} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 1,54 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (15)$$

Тогда, согласно формуле 5, число электронов в стопке должно быть

$$\mathcal{N}_{СТ} = 1 : r_{ст} = 1 \text{ м} : 1,54 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 649 \text{ штук}. \quad (16)$$

В  $1 \text{ м}^3$  число электронов  $\mathcal{N}_e$  должно быть

$$\mathcal{N}_e = (\mathcal{N}_{СТ})^3 = 273359449 \text{ штук}. \quad (17)$$

Тогда полный заряд  $Q$  электронов в аэростате объёмом  $1 \text{ м}^3$  будет составлять произведение числа электронов на заряд электрона:

$$Q = \mathcal{N}_e e = 273359449 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 437,9 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}. \quad (18)$$

Таким образом, для достижения поставленной задачи наполнения оболочки не требуется концентрировать в оболочке большой заряд.

Второй вопрос практического наполнения оболочки электронами: не произойдёт ли пробой стенки аккумулятора, поскольку внутри оболочки содержится большой заряд?

Чтобы произошёл пробой, энергия аккумулятора, которая тратится на разведение положительных и отрицательных зарядов (на создание разности потенциалов между анодом и катодом), должна стать меньше, чем энергия давления электронов изнутри оболочки, которая равна энергии встречного ему атмосферного давления.

Энергию аккумулятора можно оценить, например, вырезав кольцеобразный элемент из оболочки. Максимальная мощность  $P$  такого аккумулятора будет

$$P = \frac{1}{2} \epsilon_0 I_0. \quad (19)$$

Здесь  $\epsilon_0$  – электродвижущая сила источника,  $I_0$  – ток зарядки или разрядки.

При ширине кольцеобразного элемента 4,5 см, что соответствует длине аккумуляторной пальчиковой батарейки, создаваемая им ЭДС равна 1,5 В, а ёмкость составляет величину порядка 1500 мА час [3]. Хотя в специальной литературе последняя величина называется ёмкостью, по размерности она является зарядом  $q$ , перенесённым для создания разности потенциалов между анодом и катодом. Ёмкость целой оболочки будет превышать ёмкость кольцеобразного элемента. Энергия кольцеобразного элемента аккумулятора будет

$$E = P \Delta t = \frac{1}{2} \epsilon_0 I_0 \Delta t = \frac{1}{2} \epsilon_0 q = \frac{1}{2} 1,5 \text{ В} \cdot 1,5 \text{ А час} : 3600 = 0,0003125 \text{ Дж}. \quad (20)$$

Здесь  $\Delta t$  – промежуток времени, на протяжении которого совершалась работа по разделению зарядов между анодом и катодом, 3600 – количество секунд в часе. В каждой точке кольцеобразного элемента аккумулятора электрону надо преодолеть именно такую энергию, чтобы пробить аккумулятор, то есть чтобы соединиться с положительным зарядом на противоположном его электроде и нейтрализовать его, создав условия для утечки электронов из оболочки.

Мы уже рассчитывали кулоновскую силу, действующую со стороны ближайших электронов на оболочку. Согласно формуле 8 она равна  $31,77 \cdot 10^{-25} \text{ Н}$ . Эта сила должна переместить электрон или отрицательно заряженный ион катода через катод и сепаратор до анода. Примем толщину катода 1 мм, толщину сепаратора 1 мм. То есть расстояние  $l$ , на которое необходимо произвести смещение равно 2 мм. Работа по перемещению единичного заряда будет равна

$$A = F_{\text{кл}} l = 31,77 \cdot 10^{-25} \text{ Н} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 63,54 \cdot 10^{-28} \text{ Дж.} \quad (21)$$

Сравнивая это значение с формулой 20, приходим к выводу, что полученное значение на 32 порядка меньше значения, которое требуется для пробоя аккумулятора. Оценка произведена для описанного в печати [3] аккумулятора в форме пальчиковой батарейки. Как будет показано далее, для оболочки понадобится плёночный аккумулятор. Однако расчёт произведён для аккумулятора в форме пальчиковой батарейки. Для плёночного аккумулятора итоговое значение в формуле 20 придётся уменьшить примерно на 9 порядков, что всё равно по сравнению с итоговой формулой 21 на 19 порядков меньше. Таким образом, оболочка должна выдержать атмосферное давление.

Необходимо отдельно объяснить поведение электронов внутри массива. Разогнанные в ускорителе электроны пробивают любую электрическую пробку. Но в нашем случае мы имеем дело с медленными электронами, которые, в силу тесноты их расположения внутри оболочки не имеют места разогнаться, соударяясь друг с другом, и не имеют разгоняющей силы кроме создаваемой маломощной электронной пушкой, которая после заполнения оболочки выключается. После выключения пушки быстрые электроны оседут на аноде, в оболочке останутся только медленные электроны.

Третий вопрос практического наполнения оболочки электронами: каково влияние вакуума на катодный слой оболочки?

Внутри оболочки с электронами создан высокий вакуум с давлением 0,01 Па. То есть внутри оболочки присутствуют остатки воздуха, попавшие туда при её изготовлении, но незначительное количество. Особенностью вакуума является испарение конструктивных материалов, которые в нём находятся [4]. Благодаря особенностям конструкции оболочки, это испарение в готовой оболочке будет сведено к минимуму. Дело в том, что с поверхности катодного слоя оболочки будут пытаться испариться отрицательные ионы, составляющие катодный слой. Но внутри оболочки не просто вакуум, там находятся ещё и электроны. Это особая среда – вакуум, заполненный электронами. Точно так же, как катодный слой препятствует электронам проникать в оболочку, будет происходить обратный процесс, электроны будут мешать испарившимся одноимённо заряженным ионам покидать оболочку. В составе катодного слоя есть ещё и не заряженные атомы железа. В случае их диффузии электроны будут оседать на орбиталях атомов железа, и образовавшиеся таким образом ионы железа будут прижиматься обратно к катодному слою вблизи места своего выхода электростатической силой, действующей со стороны не осевших электронов. Так вокруг катодного слоя возникнет сплошной слой диффундировавших ионов железа. Этот слой предотвратит дальнейшую диффузию атомов железа, которые окажутся не в вакууме, а в окружении ионов железа.

Единственная возможность для испарения возникает в процессе заполнения оболочки. Перед тем, как наполнить оболочку электронами, из неё выкачивают воздух. Тогда катодный слой оболочки соприкасается с вакуумом, и ничто не мешает испаряться веществу катода. Разумеется, что катодный слой оболочки – сплошной слой, сквозь него не могут проникать в вакуум ионы электролита, заполняющие слой оболочки, служащий сепаратором между катодом и анодом.

Таким образом, перед изготовителями оболочки встаёт задача: из чего должен быть сделан катодный слой оболочки, чтобы он не повредился и не испарился в процессе откачки воздуха из оболочки?

Распространённые металл-гидридные аккумуляторы для оболочки не подходят, поскольку гидрид металла невозможно изготовить в виде сплошного слоя. Гидриды щелочных и щёлочно-земельных металлов – это кристаллы [5]. Единственное исключение – это гидрид магния [5]. Но гидрид магния имеет низкую температуру плавления и разложения – 300<sup>0</sup>С [5]. А известно, что чем ниже температура плавления, тем лучше испаряется в вакууме вещество. Поэтому эта группа материалов для катодного слоя не подходит.

Никель-кадмиевые, серебряно-кадмиевые, серебряно-цинковые аккумуляторы тоже не



подходят для вакуумной среды. Температура плавления кадмия –  $250^{\circ}\text{C}$ , цинка –  $420^{\circ}\text{C}$ , специалисты не рекомендуют использовать эти два материала при соприкосновении с вакуумом [4].

Свинцовые аккумуляторы тоже не подходят из-за низкой температуры плавления свинца –  $330^{\circ}\text{C}$  [4].

Остаются только никель-железные аккумуляторы. Железо в качестве катодного слоя выглядит достаточно надёжным, чтобы выдержать вакуум и образовать сплошной слой материала катода.

Четвёртый вопрос практического наполнения оболочки электронами: будут ли электроны оседать на стенки оболочки?

При ответе на этот вопрос мы сталкиваемся с парадоксом. Согласно одним законам физики они будут оседать, согласно другим законам физики не будут.

С точки зрения закона Кулона электроны не должны оседать на стенки оболочки. Между отрицательными ионами оболочки и электронами, приближающимися к оболочке, возникает сила отталкивания по закону Кулона.

С точки зрения заряженной сферической поверхности оболочки электроны должны оседать на стенки оболочки. Оболочка с электронами не представляет из себя однородно заряженный шар. Природа заряда оболочки другая, чем у её содержимого из электронов. Заряды катодного слоя оболочки – ионы, а внутри оболочки находятся электроны, поэтому смоделировать эту систему однородно заряженным шаром не получится. Катодный слой возможно смоделировать однородно заряженной сферой, состоящей из ионов, внутрь которой поместили электроны. Но тогда получается, что однородно заряженная сфера не создаёт напряжённости поля внутри себя, потенциал внутри неё одинаковый во всех точках [7], и если поместить в такую сферу электроны, на них не будет действовать со стороны стенок сферы электрическая сила, они осядут на оболочке.

Две закономерности физики не могут противоречить друг другу. Следовательно, существует некий параметр и его значение, при котором до достижения этого значения соблюдается закон Кулона, при превышении этого значения действует закономерность заряженной сферы. В качестве такого параметра можно предложить расстояние от электрона внутри массива до ионов катодного слоя оболочки.

Если рассматривать макроскопическую систему, то есть взять большое расстояние от иона внутри катодного слоя оболочки до электрона, действует закономерность сферически заряженной поверхности, на электрон не действует сила со стороны оболочки. Если рассматривать микроскопическую систему или даже наносистему, на малых расстояниях, соизмеримых с величиной иона со стороны иона на электрон действует сила Кулона, электрон отталкивается. При полёте электрона к иону он не может миновать малого расстояния до иона, поэтому электроны не оседают на оболочке, они отталкиваются силой Кулона.

Возможно поставить эксперимент с целью демонстрации архимедовой силы, создаваемой заряженной оболочкой с помещёнными внутрь неё электронами, и демонстрации того, что электроны не осаждаются на стенке оболочки. Если такую оболочку в сложенном состоянии без электронов взвесить на весах, а потом заполнить электронами и снова взвесить, то оболочка с электронами будет весить меньше пустой оболочки благодаря наличию архимедовой силы. Подобный эксперимент автор проделывал с электрическими лампочками. Если лампочку поместить в целлофановый пакет во избежание разлетания осколков, наклеить на место будущего прокола скотч, и взвесить, а затем гвоздём проделать отверстие в лампочке в месте, где наклеен скотч, и снова взвесить, дырявая лампочка будет весить на несколько миллиграммов больше, чем целая, благодаря создаваемой вакуумом внутри лампочки архимедовой силе. Аналогичным образом можно поступить с оболочкой, заполненной электронами, и пустой оболочкой.

Для описанного эксперимента понадобится конусообразная оболочка. Внутри оболочки в вершине конуса помещается плоский круглый катод радиусом порядка 5 мм, а в круглом основании конуса помещается плоский круглый анод диаметром порядка 10 см. Ма-

лый радиус катода объясняется тем, что для эмиссии с него электронов его требуется нагревать. Катод снабжён нагревательным элементом. Можно в качестве катода взять электронную пушку телевизора от электронно-лучевой трубки. Коническая оболочка помещается на весы, и вместе с ними помещается в вакуумную камеру. В заполненной воздухом вакуумной камере заполненная воздухом коническая оболочка взвешивается. После этого из оболочки отдельным насосом и из камеры своим насосом откачивается воздух. Далее на анод конической оболочки и катод электронной пушки подаётся напряжение порядка 25 кВ. При этом внутренняя полость оболочки напоминает электронно-лучевую трубку, но вместо экрана у неё служит анод. Электроны заполняют коническую оболочку. Потом ток и напряжение выключаются. Камера при этом не схлопывается под силой тяжести, поскольку внутри неё остаются электроны, не осевшие на аноде. Далее вакуумная камера снаружи оболочки заполняется воздухом, оболочка при этом не схлопывается под действием атмосферного давления, поскольку электроны внутри неё отталкиваются друг от друга силой Кулона. Далее оболочка повторно взвешивается. Заполненная электронами оболочка должна весить меньше заполненной воздухом оболочки.

Так в общих чертах выглядит эксперимент. Можно указать на некоторые подробности. Например, чтобы электроны не покидали свободно коническую оболочку через отверстие для шланга, через которое откачивали воздух, необходимо канал для отвода воздуха согнуть на  $90^\circ$ . Начальный участок канала для отвода воздуха, загнутый на  $90$  градусов, делается в виде аппендикса из материалов оболочки, куда вклеиваются распорные кольца. Дальний участок канала для отвода воздуха делается из резины и приклеивается к начальному участку. Саму камеру следует положить в целлофановый пакет для более удобного перемещения и взвешивать вместе с пакетом. К аноду следует присоединить не один провод в центре, а разветвлённый провод, концы которого радиально расходятся к краям круга анода и присоединяются в центре и по краям анода, чтобы поток электронов более равномерно распределялся по аноду и по пространству внутри оболочки.

Пятый вопрос практического наполнения оболочки электронами: как снизить вес оболочки?

Если использовать трёхслойный аккумулятор, который используется в пальчиковых батарейках, то его вес слишком тяжёл для стенки азростата. Необходимо разработать плёночный аккумулятор. Оценим его размеры. Масса воздуха  $m_{\text{возд}}$ , которую содержит оболочка в виде круглого шара радиусом  $R=3$  м равна

$$m_{\text{возд}} = \rho_{\text{возд}} V_{\text{возд}} = \rho_{\text{возд}} 4 \pi R^3 : 3 = 1,298 \text{ кг/м}^3 4 \cdot 3,14 \cdot 27 \text{ м}^3 = 113,04 \text{ кг}. \quad (22)$$

Здесь  $\rho_{\text{возд}}$  – плотность воздуха,  $V_{\text{возд}}$  – объём воздуха в шаре, если заполнить шар воздухом, а не электронами. По закону Архимеда приблизительно такую массу (за вычетом массы электронов) способен поднять шар, если его заполнить электронами. Из этой массы нужно вычесть массу оболочки. То есть масса оболочки должна быть на порядок меньше этой величины, чтобы шар мог поднять значимый груз. Оценим массу катодного слоя  $m_k$

$$m_k = \rho_{\text{стали}} V_k = \rho_{\text{стали}} 4 \pi R_k^2 d = 7,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 4 \cdot 3,14 \cdot 9 \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 17,40 \text{ кг}. \quad (23)$$

Здесь  $\rho_{\text{стали}}$  – плотность стали (железа катода),  $V_k$  – объём катода,  $R$  – радиус катода,  $d$  – толщина катода. Оценим массу сепаратора и анодного слоя, предположив, что основой в нём является капрон.

$$m_{al} = \rho_{\text{кап}} V_a = (\rho_{\text{кап}} d) 4 \pi R_a^2 = 0,260 \text{ кг/м}^2 4 \cdot 3,14 \cdot 9 \text{ м}^2 = 29,39 \text{ кг}. \quad (24)$$

Здесь  $\rho_{\text{кап}}$  – плотность капрона,  $V_a$  – объём анода,  $(\rho_{\text{кап}} d)$  – плотность ткани, измеряемая в единицах массы, приходящейся на метр квадратный площади,  $R_a$  – радиус анода, который взят приблизительно как 3 метра. Масса сепаратора приблизительно равна массе анодного слоя, они из материала на одинаковой основе. Реально масса сепаратора и анода будет больше, поскольку они пропитаны электролитом и анодным веществом, но для оценочных расчетов примем к сведению только массу основы. Оболочка при обычной толщине капрона

получится слишком тяжёлая. Толщину капроновой основы необходимо сделать меньше, чтобы она сравнялась с толщиной катодного слоя. Это возможно сделать, если не ткать основу анодного слоя, сепаратора и защитной оболочки, а отливать их целиком из капрона толщиной, меньшей, чем у нити капрона. Если анодный слой и слой сепаратора сделать в пять раз тоньше, то масса этих слоёв  $m_a$  уменьшится в пять раз:

$$m_a = m_{a1} : 5 = 29,39 \text{ кг} : 5 = 5,878 \text{ кг.} \quad (25)$$

Внешнюю защитную оболочку возможно сделать из изолятора полиэтилена. Её масса будет равна

$$m_3 = \rho_{\text{полиэт}} V_3 = \rho_{\text{полиэт}} 4 \pi R_3^2 d_3 = 0,935 \text{ кг/м}^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 9 \text{ м}^2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 5,28 \text{ кг.} \quad (26)$$

Здесь  $\rho_{\text{полиэт}}$  – плотность полиэтилена,  $V_3$  – объём защитного слоя оболочки,  $R_3$  – радиус защитного слоя,  $d_3$  – толщина защитного слоя.

Тогда масса стенок шара  $M$  равна

$$M = 17,40 \text{ кг} + 2 \cdot 5,878 \text{ кг} + 5,28 \text{ кг} = 34,436 \text{ кг.} \quad (27)$$

Сравнивая значения формул 22 и 27, делаем вывод, что оболочка с указанными параметрами будет поднимать 78,6 кг груза. Если дирижабль делать, помещая под общую внешнюю оболочку несколько описанных оболочек, то он сможет взять на борт несколько пассажиров с багажом. Оболочку можно использовать и отдельно, например, для создания аэростата, служащего метеорологическим зондом.

Таким образом, для того, чтобы шар описанной конструкции мог взлететь и поднять груз, необходимо использовать плёночный аккумулятор в его оболочке. Американские и японские фирмы выпускают плёночные аккумуляторы, так что данная задача достижима.

Шестой вопрос практического наполнения оболочки электронами: не опасна ли оболочка для людей снаружи, не произойдёт ли разряда типа молнии при приближении человека к оболочке?

Во-первых, разряд молнии – это разряд отрицательных зарядов, электронов, а снаружи находится положительно заряженный слой оболочки, ионы менее мобильны, чем электроны. Отрицательно заряженный слой электрохимическими силами аккумулятора поддерживается внутри оболочки. Во-вторых, анодный слой покрыт снаружи защитным слоем изолятора, который предохраняет оболочку от разряда.

Седьмой вопрос практического наполнения оболочки электронами: будет ли оболочка устойчива при полёте в отрицательно заряженных облаках?

Четырёхслойная оболочка подходит для полётов вблизи поверхности Земли, вдали от облаков. Для защиты от отрицательного заряда облаков требуется добавить к оболочке ещё два слоя противогрозовой защиты. Для этого между наружным защитным слоем и анодным слоем добавляется ещё один слой сепаратора и второй катодный слой при уменьшении толщины слоёв в два раза от исходной толщины по формуле 29 для сохранения веса оболочки. Тогда второй наружный катодный слой будет отталкивать отрицательный заряд из облаков. Кроме того, снаружи оболочки находится защитный слой, который изолирует её от заряда облаков.

#### Библиографический список

1. **Арие, М.Я.** Дирижабль нового поколения / М.Я. Арие, А.Г. Полянкер. – Киев: Наукова Думка, 1983. С. 136–138.
2. **Броуде, В.Г.** Воздухоплавательные летательные аппараты / В.Г. Броуде. – М.: Машиностроение, 1976. С. 87–89.
3. **Варламов, Р.Г.** Современные источники питания. Справочник / Р.Г. Варламов. – М.: ДМК, 1998. С. 85–99.
4. **Гущин, В.Н.** Основы устройства космических аппаратов / В.Н. Гущин. – М.: Машиностроение, 2003. С. 135–140.

5. Гидриды // Химическая энциклопедия. – М.: БСЭ, 1988. Т. 1.
6. Калинин, В. Озоновые дыры // интернет, [www.endec.ru / Terra / Str DZ.php](http://www.endec.ru/Terra/StrDZ.php)
7. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1982. Т. 2. С. 54–55.
8. Салмин, А.И. Комбинированный летательный аппарат легче воздуха. // Патент на изобретение РФ № 2318697, по заявке № 2006104265/11 от 13.02.2006. С. 18–19.
9. Салмин, А.И. Многослойная аэростатическая оболочка, заполненная электронами // Патент на изобретение РФ № 2376195, по заявке № 2007116200/11 от 27.04.2007
10. Салмин, А.И. О перспективах введения специальности «Воздухоплавательная техника» // Региональные проблемы подготовки специалистов технического профиля: мат. всероссийской конференции; НГТУ. – Н. Новгород, 2002. С. 108–111.
11. Хомская, Е.Д. Нейропсихология / Е.Д. Хомская. – М.: МГУ, 1992. С. 203–212.
12. Хомская, Е.Д. Мозг и эмоции / Е.Д. Хомская, Н.Я. Батова. – М.: МГУ, 1992. С. 116–117.

*Дата поступления  
в редакцию 17.04.2012*

**A.I. Salmin**

**PROBLEM OF CREATION OF AEROSTAT,  
FILLED BY ELECTRONS INSTEAD OF LIFTING GAS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

**Purpose:** Before producing aerostat, filled by electrons, one would to prove, what it exists.

**Design/methodology/approach:** The article contains theoretical calculations of parameters of aerostat.

**Findings:** In the article aerostat, filled by electrons instead of lifting gas, is discussed. These electrons do not escape cover, its inside walls are charged negatively. For that they are made in the form of three-ply storage of electric power: inside ply is cathode, external ply is anode, between them there is a ply of separator, that is filled by electrolyt. There is still external ply of cleaning out dielectrical casing. So that such a casing would be created, specialists must consider series of questions. One show, a break-down of casing of storage do not happen, though big charge is included in casing. The influence of vacuum is investigated to cathode ply of casing. One show, that electrons deposit to walls of casing. One prove, that the force of Culon, which occur in the presence of mutually repulsion of electrons, is sufficient for opposition atmosphere pressure. One estimate the mass of filmy storage in composition of casing. One explain, why discharge of lightning do not happen from the outside of casing.

**Research limitations/ implications:** The present study provides a starting-point for further research in the eurasian manufacturing sector.

**Originality/ value:** The article answer disputable questions by earlier patented application and demonstrate prospects of development of aerostats, filled by electrons, in XXI century.

*Key words:* aerostat, airship, airship-construction, electron, pressure, storage, paradox.

## НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

---

---

УДК 629.113

**В.В. Беляков<sup>1</sup>, Д.А. Галкин<sup>2</sup>, А.С. Зайцев<sup>3</sup>,  
Д.В. Зезюлин<sup>1</sup>, Е.М. Кудряшов<sup>3</sup>, В.С. Макаров<sup>1</sup>**

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО СНЕГУ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ООО «Военно-промышленная компания», г. Москва<sup>2</sup>,  
ООО «Военно-инженерный центр»<sup>3</sup>

Рассматривается вопрос эффективности специальных транспортных средств при движении в условиях заснеженной местности. Представлена имитационная модель движения транспортного средства по снежному покрову, реализованная в программном комплексе MATLAB. Приведены результаты моделирования движения специальных транспортных средств. Проведено сравнение показателей эффективности автомобиля ВПК-233114 «Тигр-М» с известными мировыми аналогами: EAGLE IV («MOWAG», Швейцария), Iveco LMV M65 («IVECO», Италия). В результате сравнения расчетных данных с данными экспериментальных исследований ВПК-233114 «Тигр-М» установлено, что предложенная модель пригодна для оценки эффективности колесной машины при движении по снегу. Представлены результаты экспериментальных исследований контактного взаимодействия шины КИ-115АМ с регулируемым давлением воздуха с опорной поверхностью. Показано, что учет реального характера распределения давления в зоне контакта колеса с опорной поверхностью существенно повышает точность расчетной оценки эффективности специальных транспортных средств в условиях снежной целины.

*Ключевые слова:* эффективность специальных транспортных средств, снег, имитационная модель, результаты экспериментальных исследований, распределение давлений.

За последние десятилетия проблема оснащения вооруженных сил страны современной и эффективной техникой не потеряла свою актуальность, однако приобрела новую специфику, в связи с изменившейся общемировой ситуацией. Опыт локальных военных конфликтов последних лет выявил потребность войск в таких средствах, как многоцелевые бронированные автомобили. В настоящее время десятки компаний по всему миру занимаются разработками, производством и поставками машин такого класса (рис. 1). Они нашли применение как в армейских структурах, так и в структурах охраны правопорядка, а также и во многих других областях, где требуется защищенная и мобильная техника. Боевые автомобили характеризуются высокими быстроходностью и проходимостью, в том числе по пересеченной местности, наличием вооружения и специального оборудования, повышенной защищенностью, сниженными демаскирующими признаками, возможностью транспортировки их самолетами и вертолетами, а также высокой автономностью.

Поскольку многоцелевые транспортные средства предназначены для перевозки личного состава в местностях с повышенной опасностью, то по своим техническим характеристикам они должны обеспечивать высокую скорость движения как по дорогам общего пользования, так и по труднопроходимой сильнопересеченной местности.

Одним из наиболее тяжелых режимов работы транспортных средств является передвижение по снегу. Поэтому в рамках данного исследования предложен подход к решению

задачи по определению эффективности использования специальных транспортных средств (СТС) при их функционировании в условиях заснеженной местности.

Для оценки эффективности функционирования специальных транспортных средств при движении по снегу разработана расчетная модель. Движение колесной машины по снежному полотну пути сопровождается значительным буксованием. Для учета этого автомобиль при движении необходимо рассматривать как систему с несколькими степенями свободы и использовать несколько независимых фазовых координат для описания параметров его движения. В качестве фазовых координат выбирают угловые скорости ведущих колес и линейную скорость центра масс и составляют систему дифференциальных уравнений.



а)



б)



в)



г)

**Рис. 1. Специальные транспортные средства:**

а – Iveco LMV M65 (Италия); б – КАМАЗ-43269 «Выстрел»;  
в – EAGLE IV (Швейцария); г – ГАЗ-39371 «Водник»

Уравнения движения колес получают из рассмотрения системы моментов, действующих на ведущее колесо при неустановившемся режиме движения. При выводе дифференциальных уравнений следует учитывать, что при качении колеса по деформируемой опорной поверхности в общем случае подводимая к нему энергия затрачивается на суммарное сопротивление движению, включающее сопротивление качению колеса, обусловленное гистерезисными потерями в шине, сопротивление качению колеса, обусловленное деформацией (смятием) снега, сопротивление качению колеса от экскавационно-бульдозерного эффекта, сопротивление движению от фрезерования настовой корки и внутримассивных ледяных прослоек, разгон колеса.

В работе принимаем, что потери на внутреннее трение в стенках шины при их изгибе и выпрямлении и потери на внутреннее трение в резине протектора при ее циклическом сжатии, малы по сравнению с остальными составляющими сопротивления.

Выражение для расчета силы сопротивления качению колеса, обусловленной деформацией (смятием) грунта  $F_{fc}$ , имеет вид [1–5]:

$$F_{fc} = 2b\gamma h_{\max}^2 \left( -\ln \left( \frac{\gamma h_{\max}}{\gamma h_{\max} + q_{\max}} \right) - \frac{q_{\max}}{\gamma h_{\max} + q_{\max}} \right), \quad (1)$$

где  $b$  – ширина колеса;  $\gamma$  – коэффициент начальной жесткости снега;  $h_{\max}$  – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению,  $q_{\max}$  – максимальное (пиковое) давление под колесом.

Для определения силы сопротивления от экскавационно-бульдозерного эффекта  $F_{f_{\text{ЭБ}}}$  целесообразно воспользоваться зависимостями, приведенными в работах [1–5]:

$$F_{f_{\text{ЭБ}}} = b\gamma \cdot h_{\max}^2 \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\Delta h}{h_{\max}} \left( 1 + \frac{q_{\max}}{\gamma h_{\max}} \right) \right] - \frac{\Delta h}{h_{\max}} \right\}, \quad (2)$$

где  $\Delta h$  – высота снега, выносимого из зоны контакта в межколесную область в результате экскавационно-бульдозерных эффектов.

Сила сопротивления движению от фрезерования настовой корки и внутримассивных ледяных прослоек [1–5]:

$$F_{f_{\text{ФР}}} = 2p_{\text{ФР}} H_{k1} b h_{\text{ГР}} l_{\text{ГР}}^{-1} \left( 1 + \frac{n_{\text{СЛ}} - 1}{n_{\text{СЛ}} + 1} \right) S, \quad (3)$$

где  $n_{\text{СЛ}}$  – число слоев в снежном массиве,  $h_{\text{ГР}}/l_{\text{ГР}}$  – отношение высоты грунтозацепа к их шагу,  $H_{k1}$  – высота контакта первого колеса со снежным покровом в зоне загрузки,  $p_{\text{ФР}} \approx 20 \dots 30$  кПа – удельное сопротивление резанию внутримассивных и настовых корок,  $S$  – коэффициент, определяющий проскальзывание (буксование) колеса относительно полотна пути.

Продольная реакция по сцеплению ведущих колес со снежным полотном пути может быть получена по следующим выражениям [1,4]:

$$R_{x_{\text{Ф}}} = \varphi_{\delta} k_i F_z + (1 - k_i) [c \cdot A + F_z \cdot \text{tg}\varphi] e^{-k_1 l S} (1 - e^{-k_2 l S}), \quad (4)$$

$$R_{x_{\text{Ф}}} = \varphi_{\delta} k_i F_z + (1 - k_i) [c \cdot A + F_z \cdot \text{tg}\varphi] (1 - e^{-k_2 l S}), \quad (5)$$

где  $k_n$  – коэффициент насыщенности протектора;  $\varphi_p$  – коэффициента трения протектора шины;  $c$  – коэффициент связности;  $\text{tg}\varphi$  – коэффициент внутреннего трения грунта;  $F_z$  – нормальная нагрузка;  $A$  – общая площадь контакта колеса с опорной поверхностью;  $s$  – коэффициент буксования колесного движителя;  $l$  – длина линии контакта, где  $k_1, k_2$  – эмпирические коэффициенты.

Формула (4) применяется для расчета упорной реакции связных грунтов, а формула (5) – несвязных.

Суммарный момент сопротивления движению можно определить по выражению:

$$T_f = (F_{fc} + F_{f_{\text{ЭБ}}} + F_{f_{\text{ФР}}}) \cdot r_d, \quad (6)$$

где  $r_d$  – динамический радиус колеса.

Уравнение динамического равновесия ведущего колеса выглядят следующим образом:

$$I_k \frac{dw_k}{dt} = T_k - R_{x_{\text{Ф}}} r_d - T_f, \quad (7)$$

где  $T_k$  – момент, передаваемый колесу от двигателя через трансмиссию;  $w_k$  – угловая скорость вращения колеса;  $I_k$  – момент инерции колеса.

Качение колесного движителя СТС отличается от качения одиночного колеса по снежному полотну пути прежде всего условиями качения следующих друг за другом колес разных осей по одному следу, а также кинематическими и силовыми связями, налагаемыми конструкцией автомобиля на данные колеса.

Важным обстоятельством при рассмотрении последовательных проходов колес машины по одному следу является изменение характеристик сцепления колеса со снежным полотном пути и сопротивления качению. Условия качения меняются вследствие очевидной

причины – после прохождения колеса по снегу происходит изменение его механических свойств, что отражается на взаимодействии последующих колес с поверхностью движения. При этом с ростом деформации снежного покрова его плотность стремится к величине  $0,66 \text{ г/см}^3$ , а при механическом разрушении – к  $0,35 \text{ г/см}^3$  независимо от исходной плотности, что также необходимо учитывать при моделировании передвижения СТС [1].

При движении СТС в условиях заснеженной местности для колес задней оси наряду с погружением от уплотнения материала имеет место кинематический прирост за счет экскавационного эффекта, а также дополнительное увеличение высоты контакта колеса с поверхностью движения за счет выноса материала дорожно-грунтового основания из-под предшествующего колеса. Расчетный аппарат для учета указанных явлений наиболее полно разработан в работах [1–3]. Длительное буксование в реальных условиях может привести к невозможности выполнять транспортным средством заданные функции в связи с экскавационным эффектом. С ростом буксования тяга перестает увеличиваться, и вся энергия двигателя тратится на преодоление увеличивающейся силы сопротивления движению. Таким образом, одной из значительных составляющих сопротивления движению является сопротивление в результате экскавационных эффектов, которые накладывают свою специфическую связь на взаимодействие соседних колес.

На эффективность работы машин на местности существенным образом оказывают влияние схемы трансмиссии: способ связи между колесами, способ связи между мостами (тип межосевого привода). Модель движения СТС, представленная в раках данной статьи, дополнена системой уравнений, описывающей динамику трансмиссии с заблокированной межосевой и межколесной связью. Данная система уравнений устанавливает связь между моментом двигателя, моментами, приложенными к колесам, угловой скоростью вращения вала двигателя и угловыми ускорениями вращения колес. Необходимо отметить, что в модели может быть реализована любая схема трансмиссии.

При погружении колеса в снег, превышающем дорожный просвет, возникает дополнительная сила сопротивления  $F_{f_{\text{дн}}}$ , обусловленная взаимодействием со снежным покровом днища корпуса или элементов шасси. Это сопротивление складывается, в основном, из затрат на вертикальную деформацию снега  $F_{f_{\text{дн}q}}$  и трения о поверхность полотна пути  $F_{f_{\text{дн тр}}}$  [4, 5].

Сила сопротивления за счет вертикальной деформации снега днищем может быть вычислена по зависимости (при допущении, что днище машины плоское) [4, 5]:

$$F_{f_{\text{дн}q}} = 1/2 \cdot b_{\text{дн}} \cdot k \cdot h_{\text{дн}}^2, \quad (8)$$

где  $b_{\text{дн}}$  – ширина днища машины;  $h_{\text{дн}}$  – величина погружения днища;  $k$  – дорожный просвет.

Сопротивление движению за счет трения днища о поверхность полотна пути определяется как [4, 5]:

$$F_{f_{\text{дн тр}}} = (c_{\alpha} + q_{\text{дн}} \cdot \text{tg} \varphi_{\alpha}) A_{\text{дн}}, \quad (9)$$

где  $c_{\alpha}$ ,  $\text{tg} \varphi_{\alpha}$  – параметры, характеризующие трение материала корпуса о снег;  $q_{\text{дн}}$  – величина давления днища на снег;  $A_{\text{дн}}$  – площадь днища.

Методика расчета сопротивления при погружении колес в снег, превышающем дорожный просвет, для машин с фигурным днищем представлена в работе [3].

Резюмируя сказанное, следует отметить, что при выводе дифференциального уравнения движения центра масс автомобиля в качестве составляющих обобщенной функции сопротивления движению необходимо принимать силу сопротивления опорной поверхности качению колес  $\Sigma F_{fi}$ , силу сопротивления, возникающую при погружении днища машины в снег  $F_{\text{дн}}$ , силу тяги на крюке  $F_{\text{кр}}$ . Движущей силой корпуса автомобиля является сумма сил тяги по сцеплению ведущих колес со снегом при внешнем скольжении  $\Sigma R_{x\varphi_i}$ , приложенных к их осям.

Таким образом, дифференциальное уравнение движения корпуса СТС имеет вид:

$$m_a \frac{dV_a}{dt} = \Sigma R_{x\varphi_i} - \Sigma F_{fi} - F_{\text{дн}} - F_{\text{кр}}. \quad (10)$$



Величина буксования, определяющего параметры взаимодействия каждого колеса со снегом, зависит от двух фазовых координат: действительной угловой скорости колеса и линейной скорости центра масс автомобиля. В рассматриваемой модели корпус и оси вращения колес соединены жестко, следовательно, при движении испытывают одинаковые перемещения, скорости и ускорения. Таким образом, выражение для определения коэффициента внешнего скольжения имеет вид

$$s = 1 - \frac{V_a}{w_k r_d} \quad (11)$$

Сцепление колеса со снежным покровом и сопротивление качению колеса также являются функциями двух переменных. Поскольку названный коэффициент входит и в уравнение движения центра масс транспортного средства, и в уравнения движения колес, они представляют собой систему уравнений, решение которых должно осуществляться совместно.

Система уравнений (7), (10)–(11) является достаточной для описания движения полноприводного двухосного транспортного средства по снежному покрову с достаточной точностью и для анализа факторов, влияющих на эффективность колесной машины.

В рамках данного исследования расчетной оценке эффективности функционирования при движении по снегу подвергались следующие автомобили:

- ВПК-233114 Тигр-М;
- EAGLE IV (производитель – «MOWAG», Швейцария);
- Iveco LMV M65 (производитель – «IVECO», Италия).

Краткие технические характеристики представленных автомобилей приведены в табл. 1.

Для решения системы дифференциальных уравнений использовался метод визуально-ориентированного блочного имитационного моделирования сложных динамических систем. При данном подходе уравнения, описывающие процесс движения колесной машины по снегу, приводятся к виду, удобному для решения. После определения начальных условий дифференциальных уравнений, разрешенных относительно старших производных, следует реализация математической модели средствами MATLAB/Simulink с включением инструментов визуализации результатов.

Таблица 1

## Краткие технические характеристики объектов исследований

	ВПК-233114 Тигр-М	EAGLE IV	«IVECO» LMV M65
Масса снаряженного автомобиля, кг	6000	6300	5430
Полная боевая масса, кг	7500	8500	7000
Перевозимый вес, кг	1500	2200	1300
Дорожный просвет, мм	400	400	330
Количество мест (с водителем), чел.	2+7	1+4	1+4
Двигатель	ЯМЗ-5347-10	Cummins ISBe5,9	IVECO F1C31TD
Мощность, кВт/мин-1.	158/2600	180/2700	136/3700
Макс. момент, Нм/мин-1	750/1500	686/1600	456/1800
Трансмиссия	механ., 5 скор.	Allison S2500, автомат.	ZF 6HP26, автомат.
Шины	12,00R18 KI-115AM	335/80 R20 Michelin	325/85R16 Michelin XML

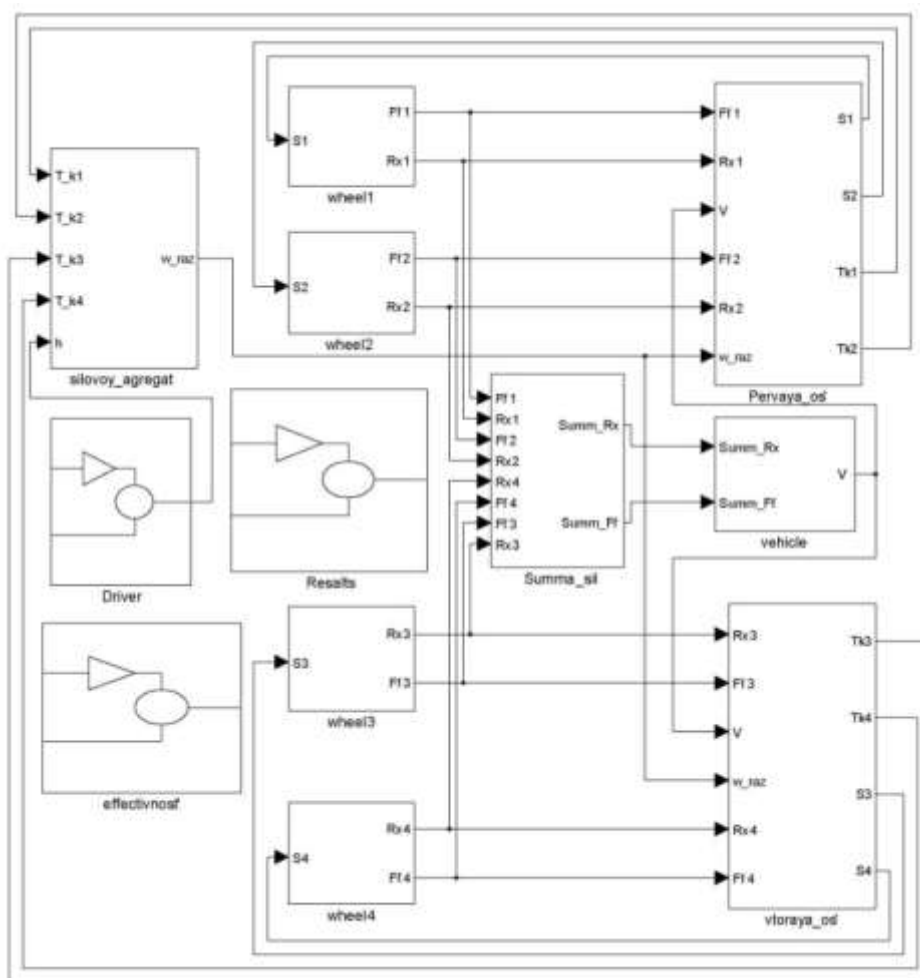
На рис. 2 приведена блок-схема разработанной модели, представляющая собой совокупность подсистем, описывающих посредством соответствующих зависимостей процессы, протекающие в тех или иных частях (узлах) транспортного средства. Эти блоки моделируют

контакт колеса с дорогой, работу дифференциала, следовательно, представляют собой модели указанных узлов. Таким образом, структура модели отражает структуру машины.

Для оценки проходимости наземных транспортных средств снежный покров дифференцирован на четыре типа [1-5] с соответствующими значениями параметров (табл. 2).

**Таблица 2**  
**Численные значения параметров снега**

Тип снега	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma$ , кПа/м	$C_0$ , кПа	$\text{tg } \varphi$
1	0,15	20	0,5	0,25
2	0,20	30	1,0	0,30
3	0,25	50	2,5	0,33
4	0,30	100	5,0	0,36

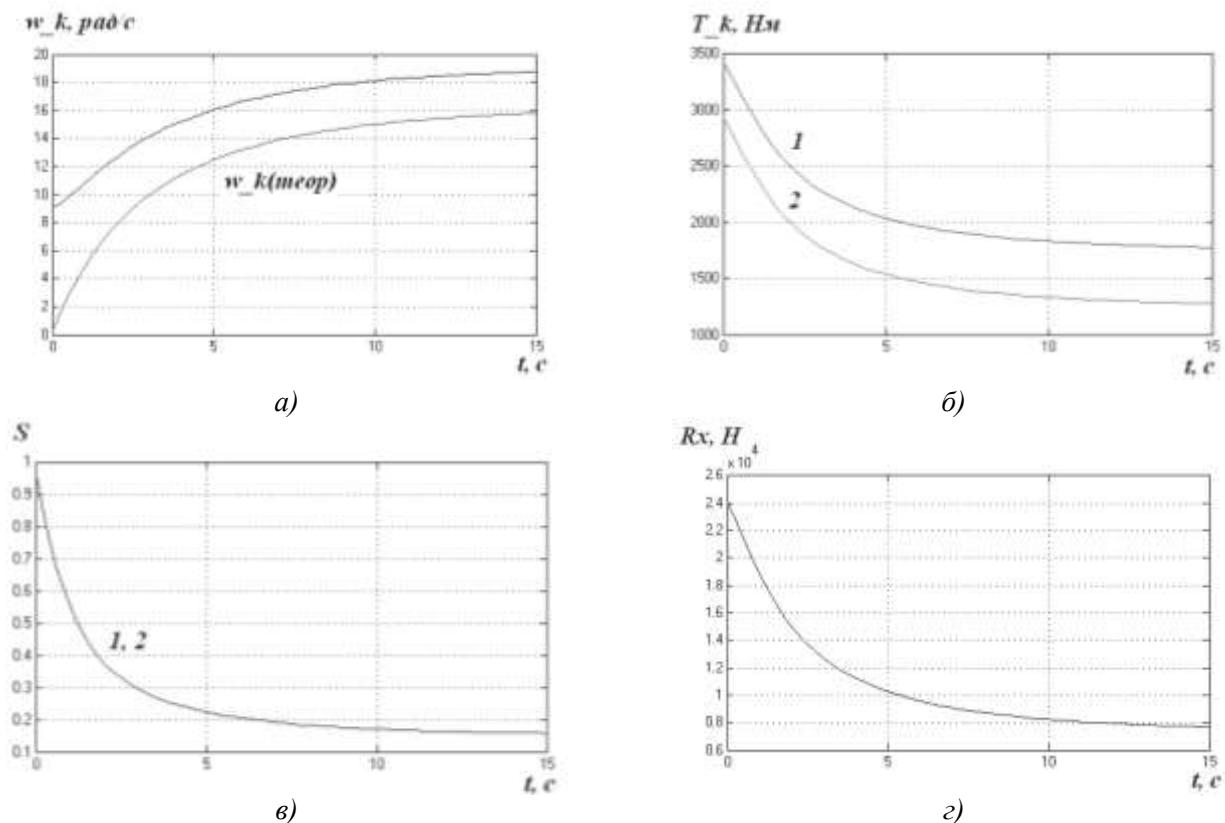


**Рис. 2. Блок-схема Simulink-модели**

На рис. 3 представлен пример результатов моделирования прямолинейного движения ТС ВПК-233114 Тигр-М с заблокированным приводом колес по снегу типа 4 глубиной  $H = 0,4$  м. Цифрами на графиках обозначена принадлежность к соответствующей оси машины.

Наиболее рациональным оценочным показателем проходимости наземных транспортных средств по снегу является критерий, предложенный Л. В. Барахтановым [4]. В соответствии с данным критерием проходимость машин по снегу предлагается оценивать по зависимости запаса силы тяги  $\Delta P$  от высоты снежного покрова  $H_{\text{пр}}$ . При этом условием проходимости является наличие запаса силы тяги ( $\Delta P > 0$ ), а показателем проходимости – преодолева-

емая высота данного снежного покрова  $H_{пр}$ . Авторы работы [5] уточнили данный критерий, совместно рассмотрев зависимость запаса силы тяги  $\Delta P$  от высоты снега и тяговую характеристику машины  $P_d = f(V)$ , с целью определения скоростей движения в зависимости от высоты снега.



**Рис. 3. Пример результатов моделирования прямолинейного движения СТС ВПК-233114 Тигр-М по снегу:**

*a* – угловые скорости колес; *б* – крутящий момент, подводимый к колесам; *в* – буксование колес; *г* – суммарная упорная реакция грунта, реализуемая колесами

Таким образом, построение поверхности, характеризующей изменение запаса силы тяги  $\Delta P$  в зависимости от высоты снега  $H$  и скорости движения машины  $V$  (рис. 4), предоставляет возможность оценки проходимости и подвижности СТС с учетом физико-механических свойств снега.

Эффективность функционирования СТС в условиях заснеженной местности во многом определяется потенциальным буксованием колесных движителей. Пример поверхности проходимости в зависимости от высоты снега и буксования колесного движителя машины представлен на рис. 5.

Одним из радикальных средств повышения эффективности использования СТС в условиях снежной целины является снижение давления воздуха в шинах. На рис.6 представлены примеры теоретических зависимостей показателя проходимости ВПК-233114 Тигр-М при различных давлениях воздуха в шинах. Из графика видно, что с ростом давления воздуха в шинах проходимость машины ухудшается.

Таким образом, решение вопросов проходимости с научно-технической точки зрения лежит в области исследования взаимодействия движителя с опорной поверхностью.

В рамках данного исследования были экспериментально проанализированы величина и характер распределения нормальных давлений в зоне контакта шин КИ-115АМ 12.00 R18 с регулируемым давлением воздуха с опорным основанием.

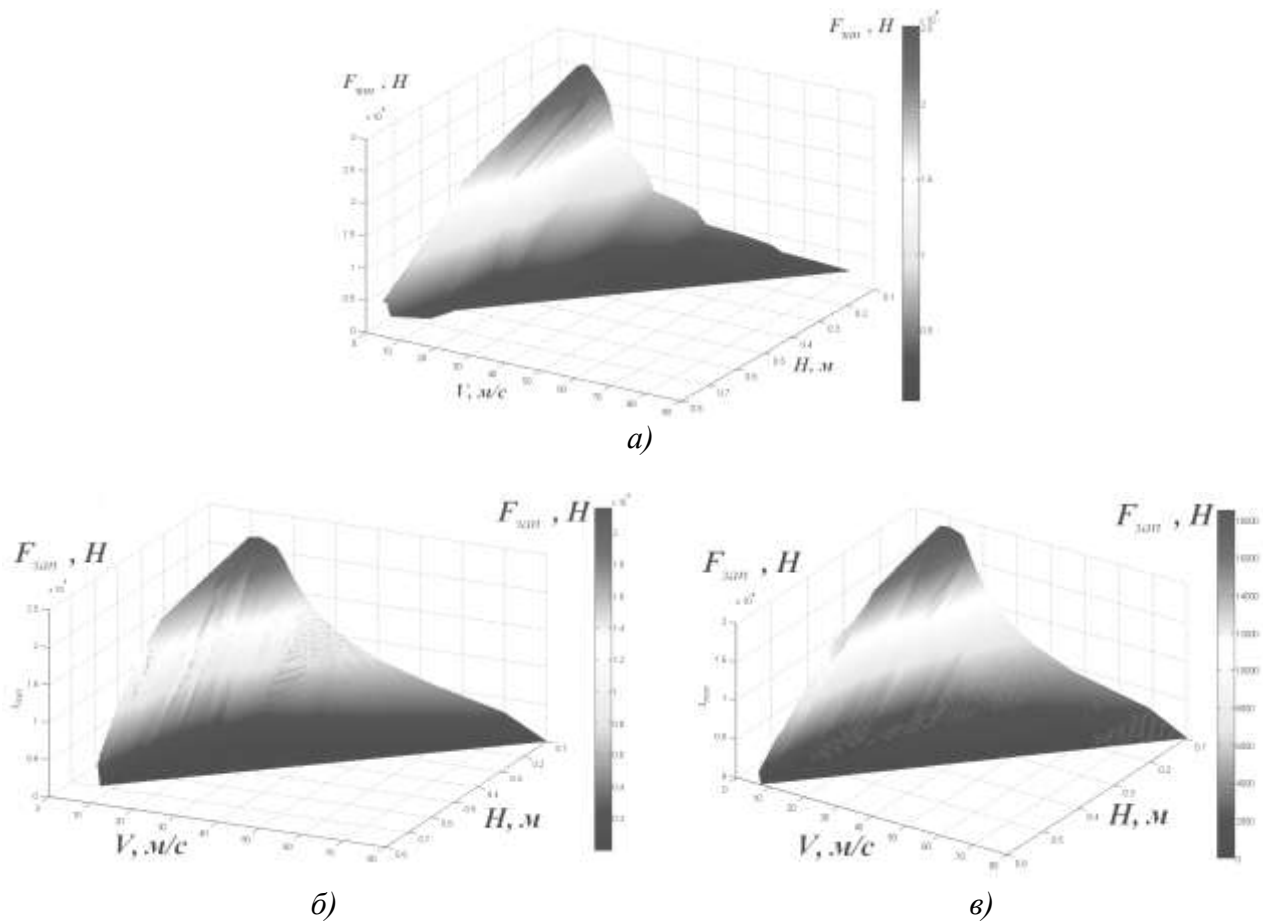


Рис. 4. Поверхности, характеризующие изменение запаса силы тяги специальных транспортных средств в зависимости от высоты снега и скорости движения:

*a* – ВПК-233114 Тигр-М; *б* – EAGLE IV; *в* – Iveco LMV M65

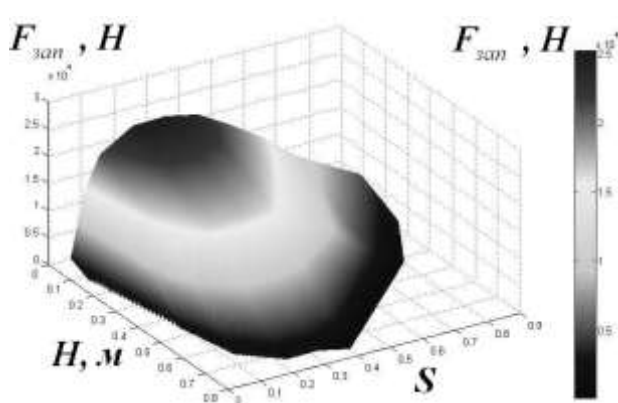


Рис. 5. Поверхность проходимости в зависимости от высоты снега и буксования движителя (ВПК-233114 Тигр-М)

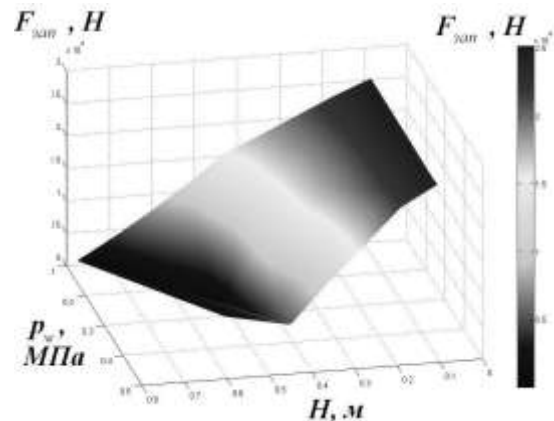


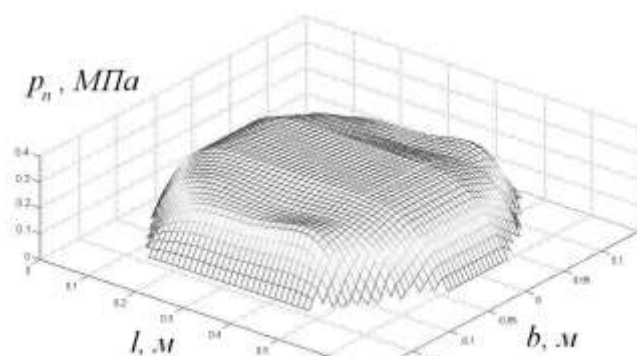
Рис. 6. Поверхность проходимости в зависимости от высоты снега и давления воздуха в шинах (ВПК-233114 Тигр-М)

Методика проведения испытаний и структурно-функциональная схема соединения измерительно-регистрирующей аппаратуры подробно описаны в работе [6].

В результате проведенных испытаний получены трехмерные эпюры распределений нормальных давлений в зоне контакта колес СТС ВПК-233114 Тигр-М с опорной поверхностью при различных внутренних давлениях воздуха в шинах (рис. 7) [7].



а)



б)

**Рис. 7. Пример результатов экспериментальных исследований:**  
 а – объект экспериментальных исследований ВПК-233114 Тигр-М;  
 б – трехмерная эпюра нормальных давлений в контакте  
 шины КИ-115АМ 12.00 R18 с уплотненным снежным покровом ( $p_0 = 0,9 \text{ кг/см}^2$ )

Исследования распределения напряжений в контакте шин КИ-115АМ с опорной поверхностью показали, что при внутренних давлениях воздуха 07-0,9 кг/см<sup>2</sup> (минимально допустимые давления воздуха в шинах) эпюра давлений имеет ярко выраженную площадку с равномерным распределением давлений. Глубина образуемой при движении колеи определяется максимальными значениями давлений в контакте [8, 9]. Следовательно, наиболее равномерный вид эпюры способствует снижению глубины колеи и уменьшению потерь на деформацию снега, обеспечивая при этом наилучшие показатели эффективности функционирования СТС в условиях заснеженной местности.

В рамках данного исследования проводились испытания по оценке эффективности движения СТС по снегу. В качестве параметров для оценки были выбраны следующие показатели: наибольшая сила тяги на крюке автомобиля; сила сопротивления движению (качению) транспортного средства.

Объектами исследований для данных испытаний являлись СТС "Тигр-М", ГАЗ «Каратель». В качестве измерительного прибора использовался механический динамометр ДПУ -5-2-У2.

Фрагменты проведения экспериментальных исследований представлены на рис. 8.



**Рис. 8. Фрагменты испытаний «Тигр-М» и СТС «Каратель»  
 для оценки эффективности движения**

Целью проведения экспериментальных исследований являлась, прежде всего, оценка возможности применения приведенной математической модели для исследований эффективности функционирования СТС при движении по снегу. Кроме того, в ходе испытаний оценивалось влияние параметров контактного взаимодействия колесных движителей со снежным полотном пути на тягово-динамические характеристики движения СТС.

Сравнительная оценка результатов экспериментальных и расчетных исследований показала, что учет реального характера распределения давления в зоне контакта колеса с опорной поверхностью существенно повышает точность расчетной оценки эффективности функционирования СТС в условиях снежной целины. Расхождение значений показателей, полученных в результате выполненных расчетов, с экспериментальными данными не превышает по максимальной силе тяги на крюке – 12 %, глубине образуемой колеи – 6 %.

Таким образом, анализ результатов исследований работоспособности математической модели подтвердил возможность её использования для оценки эффективности функционирования СТС при движении по снегу.

С использованием разработанной математической модели проведена расчетная оценка эффективности наиболее известных и востребованных на рынке специализированной техники СТС при движении по снегу. В результате расчетов установлено, что более высоким уровнем эффективности функционирования в условиях заснеженной местности обладает СТС ВПК-233114 Тигр-М. При этом решающее влияние на уровень показателей подвижности машины оказывают соотношение «типоразмер шин – полная масса машины», конфигурация протектора шины, внутреннее давление воздуха в шинах, дорожный просвет автомобиля. Необходимо отметить, что прослеживается взаимосвязь между показателями проходимости и удельной нагруженностью шин, характеризующей степень соответствия нагрузочных и размерно-жесткостных характеристик шин условиям движения по снегу.

Также помимо характеристик движения особенностью автомобиля ТИГР-М является то, что при движении по снегу лобовая часть машины способствует отбрасыванию снега по бортам машины (рис. 9, а), что способствует снижению сопротивления от смятия снега под колесами и днищем машины. Для IVECO характерно образование большого экскавационного холма перед машиной (рис. 9, б).



Рис. 9. Движение автомобилей ТИГР-М (а) и IVECO (б) по снежной целине

Анализ экспериментально-теоретических данных и построение комплекса представленных поверхностей позволяет не только прогнозировать проходимость и подвижность [10] СТС и проводить их сравнение при проектировании новых и модернизации существующих конструкций, но и позволяет определить влияние параметров машины на эффективность использования машины в условиях снежной целины и наметить пути её повышения.

#### Библиографический список

1. Вездеходные транспортно-технологические машины / под ред. В. В. Белякова и А. П. Куляшова. – Н. Новгород.: ТАЛАМ, 2004. – 960 с.
2. Макаров, В.С. Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009 г. –161 с.
3. Гончаров, К.О. Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов на проходимость

- многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2011. – 259 с.
4. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
  5. **Аникин, А.А.** Теория передвижения колесных машин по снегу / А.А. Аникин, В.В. Беляков, И.О. Донато. – М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
  6. **Беляков, В.В.** Распределение давлений в контакте шины с дорогой / В.В. Беляков [и др.] // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2011. №1(49). С. 15–18.
  7. **Блохин, А.Н.** Определение нормальных усилий в контакте шины сверхнизкого давления с опорной поверхностью / А.Н. Блохин, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, А.А. Алипов // Журнал ААИ. Журнал автомобильных инженеров. 2011. №2(67). С. 30–33.
  8. **Блохин, А.Н.** Исследования взаимодействия пневмоколесного движителя сверхнизкого давления со снежным полотном пути / А.Н. Блохин [и др.] // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». – # 08, август 2011 <http://technomag.edu.ru/doc/214145.html>
  9. **Макаров, В., Беляков, В.** Расчет проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 2012. – 160 с.
  10. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2012. №1. С. 35–38.

*Дата поступления  
в редакцию 17. 04.2012*

**V.V. Belyakov, D.A. Galkin, A.S. Zaytsev, D.V. Zezulin, E.M. Kudryashov, V.S. Makarov**

### **EVALUATION OF EFFECTIVENESS OF SPECIAL VEHICLES IN SNOW-COVERED TERRAIN**

The Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev,  
Ltd. «Military Industrial Company» (Moscow),  
Ltd. «The military engineering centre»

**Subject/topic/purpose:** The question of methods development for evaluation of effectiveness of special vehicles in snow-covered terrain is considered.

**Methodology of work:** The simulation model of vehicles movement on snow is presented. The model is realized by means of numerical computing environment MATLAB. As a result of the comparison of calculated data with experimental studies of the MIC-233114 «Tiger-M» is determined that the proposed model is suitable for evaluation of the effectiveness of wheeled vehicles when driving on snow. The experimental results of contact interaction tires «KI-115AM» (with adjustable air pressure) with road are presented. It is shown that the inclusion of the real nature of the pressure distribution in the contact area of wheel with the supporting surface substantially increases the accuracy of the estimation of the efficiency of vehicles during the driving on snow.

**Results/application:** As a result, the methods for evaluation of effectiveness of special vehicles in snow-covered terrain are obtained. A comparison of performance indicators of MIC-233114 «Tiger-M» with the world-famous analogues (EAGLE IV, Iveco LMV M65) is made. The results are important for the activity of research laboratories and automotive companies involved in the design of multi-purpose wheeled vehicles to operate in cold regions.

**Findings:** Decisive influence on level of effectiveness of the vehicle has a degree of consistency of size-stiffness characteristics of the tire with the conditions of snow-covered terrain, the design of the front part and the bottom of the vehicle.

*Key words:* effectiveness of special vehicles, snow, simulation model, experimental results, pressure distribution.

УДК 629.113

Л.В. Барахтанов<sup>1</sup>, С.Е. Манянин<sup>2</sup>**ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ СНЕГА СЖАТИЮ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ООО «Трансмаш», Нижний Новгород<sup>2</sup>

Статья посвящена оценке зависимостей сопротивления снега сжатию. Рассмотрены зависимости вертикальной деформации снега от нормальной нагрузки, предложенные Н.И. Фуссом, Р. Бернштейном, Горячкиным – Летошневым, М. Беккером, Л. Карафанзом, А. Рисом, МВТУ им. Н.Э.Баумана, НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Получены зависимости сопротивления снега сжатию с учетом наиболее важных параметров снежного покрова: высоты, плотности снега и его начальной жесткости.

*Ключевые слова:* снежный покров, нагрузка, деформация, параметры снега, кривая погружения.

Для анализа движения колесной машины по снежной поверхности необходимо знать сопротивление снега сжатию (зависимость вертикальной деформации снега от нормальной нагрузки), так как оно определяет погружение движителя, сопротивление движению и в значительной степени проходимость машины в целом.

Отечественными и зарубежными учеными предложен ряд зависимостей для определения сопротивления грунта сжатию. Используя модель винклеровского основания, Н.И. Фуссом предложена линейная зависимость между нагрузкой и деформацией [1]:

$$p = c \cdot h,$$

где  $c$  – коэффициент постели;  $h$  – погружение штампа.

Указанная зависимость справедлива для очень узкого диапазона давлений на снег ( $0 \div 0,01$  МПа), т.е. ей можно описывать только начальный участок кривой «нагрузка-осадка».

Зависимость, предложенную Р. Бернштейном [1]:

$$p = ch^{\frac{1}{2}},$$

нельзя использовать для снега, так как показатель степени у кривой погружения всегда больше единицы.

Для определения сопротивления грунта сжатию широко применяется степенная зависимость между нагрузкой и деформацией, сформулированная в общем виде Горячкиным – Летошневым [1]:

$$p = c \cdot h^n, \quad (1)$$

где  $c$ ;  $n$  – константы грунта;  $h$  – глубина погружения.

В дальнейшем зависимость (1) была модернизирована М. Беккером [1]:

$$p = \left( k_\phi + \frac{k_c}{b} \right) h^n, \quad (2)$$

где  $b$  – ширина штампа;  $k_\phi$ ,  $k_c$  – модули трения и сцепления, соответственно,  $h$  – глубина погружения;  $n$  – константа, зависящая от грунта;

Л. Карафанзом:

$$p = p_s + \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n,$$

где  $p_s$  – начальное сопротивление.

и А. Рисом [1]:

$$p = (ck_c + \gamma bk_\phi) \left( \frac{h}{b} \right)^n, \quad (3)$$



где  $b$  – ширина штампа;  $c, \gamma$  – сцепление и объемный вес грунта;  $h$  – деформация грунта;  $k_c, k_\phi, n$  – эмпирические коэффициенты.

В зависимости, предложенной МВТУ им. Н.Э. Баумана [2], произведен учет скорости внедрения штампа в грунт:

$$q = (ck_c + \gamma vk_\phi) \left( \frac{h}{\delta} \right)^n (1 + c_n \cdot h'^m), \quad (4)$$

где  $c$  – сцепление;  $\gamma$  – объемный вес грунта;  $h$  – деформация грунта;  $b$  – ширина штампа;  $h'$  – скорость внедрения штампа в грунт;  $k_c, k_\phi, c_n, m$  – эмпирические коэффициенты.

Применение формул (1–4) для определения сопротивления снега сжатию вызывает ряд затруднений. Во-первых, в литературе практически отсутствуют численные значения коэффициентов  $c$  и  $n$  для снега. Во-вторых, эмпирические коэффициенты  $c$  и  $n$  не связаны с такими важными параметрами снежного покрова, как высота  $H$ , плотность снега  $\rho$  и его начальная жесткость  $\gamma$ .

На наш взгляд, наиболее адекватно зависимость между давлением  $q$  и деформацией снега  $h$  отражает формула, предложенная в НГТУ [3]:

$$h = \frac{q}{\left( \frac{1}{h_{\max}} \right) q + \gamma} \quad (5)$$

или

$$q = \frac{\gamma h h_{\max}}{h_{\max} - h}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент начальной жесткости снега, характеризующий удельное сопротивление снега сжатию, представляет собой коэффициент жесткости ( $\text{Н/м}^3$ ) в начальной стадии деформации;  $h_{\max}$  – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению:

$$h_{\max} = H \frac{n_y b + d}{b + d}, \quad (7)$$

где  $H$  – высота снежного покрова;  $b$  – ширина штампа;  $n_y$  – коэффициент уплотняемости снега;  $d$  – эмпирический коэффициент.

Согласно экспериментальным исследованиям, проведенным В.А. Малыгиным в ОНИЛ ВМ:

$$n_y = \frac{a}{\rho + a},$$

где  $\rho$  – начальная плотность снега;  $a = 0,3 \text{ г/см}^3$ .

На основании этих же экспериментальных данных зависимость  $d$  от  $H$  хорошо согласуется с выражением вида:

$$d = 0,0287(100H)^{3/2}.$$

Таким образом, зная легко определяемые параметры (начальную плотность снега  $\rho$  и его начальную жесткость  $\gamma$ ), определяется глубина погружения плоского штампа на снежной целине заданной высоты  $H$  в зависимости от нагрузки.

Тогда:

$$h = \frac{q}{\left[ \frac{b + d}{H(n_y b + d)} \right] q + \gamma}. \quad (8)$$

Вместе с тем, следует отметить, что зависимости (1–4) широко применялись как отечественными, так и зарубежными учеными при расчете процессов колееобразования, сопротивления движению и проходимости колесных и гусеничных машин. Поэтому была постав-

лена задача: попытаться связать эмпирические коэффициенты  $c$  и  $n$  с такими важными параметрами снежного покрова, как высота  $H$ , начальная плотность снега  $\rho$  и коэффициент начальной жесткости  $\gamma$ . Вначале по формуле (5) были построены зависимости вертикальной деформации снега от нормальной нагрузки в диапазоне начальных плотностей  $\rho=0,15 - 0,30$  г/см<sup>3</sup> и коэффициентов начальной жесткости  $\gamma=20 - 100$  кПа/м. Затем те же зависимости были построены по формуле (1) и подобраны коэффициенты  $c$  и  $n$ .

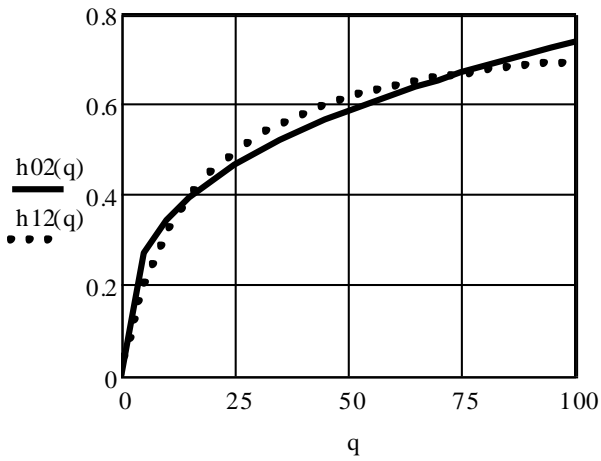


Рис. 1. Зависимость вертикальной деформации (м) снега от нагрузки (кПа)  $\rho=0,15$  г/см<sup>3</sup>

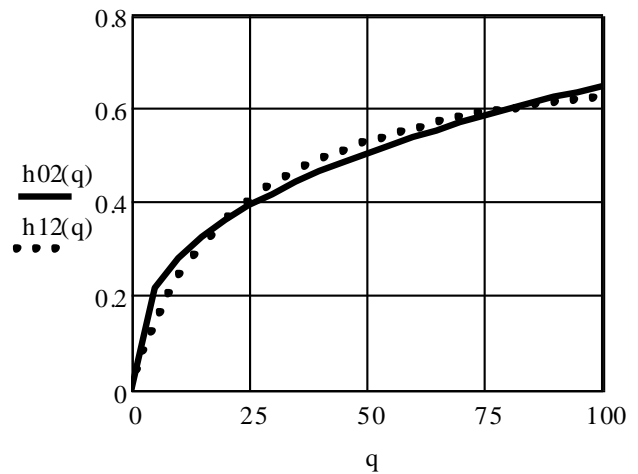


Рис. 2. Зависимость вертикальной деформации (м) снега от нагрузки (кПа)  $\rho=0,20$  г/см<sup>3</sup>

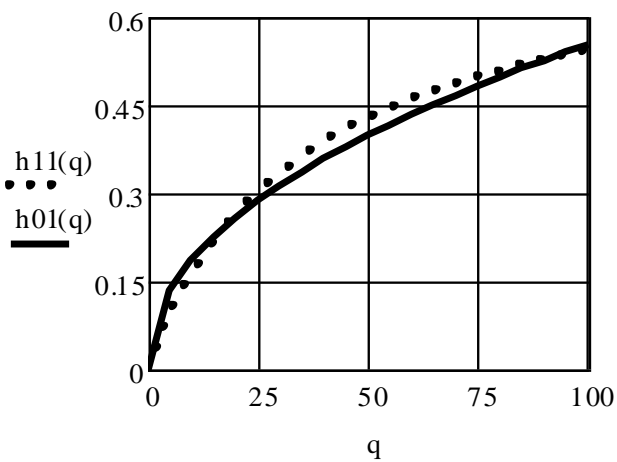


Рис. 3. Зависимость вертикальной деформации (м) снега от нагрузки (кПа)  $\rho=0,25$  г/см<sup>3</sup>

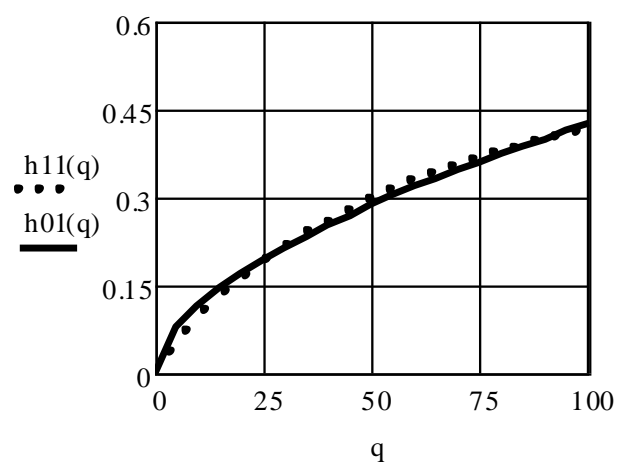


Рис. 4. Зависимость вертикальной деформации (м) снега от нагрузки (кПа)  $\rho=0,30$  г/см<sup>3</sup>

На рис. 1–4 приведены зависимости вертикальной деформации снега от нормальной нагрузки (индекс 0 – фор. 1, индекс 1 – фор. 5) при высоте  $H=1,0$  м.

При других значениях высот снега были получены следующие соотношения:

$$\begin{matrix}
 \underline{H} := \\
 \underline{\underline{H}}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 0.4 \\
 0.6 \\
 0.8 \\
 1.0 \\
 1.2
 \end{pmatrix}
 \quad
 \begin{matrix}
 \underline{n(H)} := \\
 \underline{\underline{n(H)}}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 2.0 \\
 2.35 \\
 2.7 \\
 3.0 \\
 3.3
 \end{pmatrix}
 \quad
 \begin{matrix}
 \underline{c(H)} := \\
 \underline{\underline{c(H)}}
 \end{matrix}
 \begin{pmatrix}
 700 \\
 500 \\
 340 \\
 250 \\
 170
 \end{pmatrix}$$

Анализ графиков зависимостей вертикальной деформации снега от нормальной нагрузки, посчитанных по зависимостям (1) и (5), показал, что они имеют вполне удовлетворительную сходимость. В диапазоне реально залегающих высот снежного покрова их разница не превышала пяти процентов.

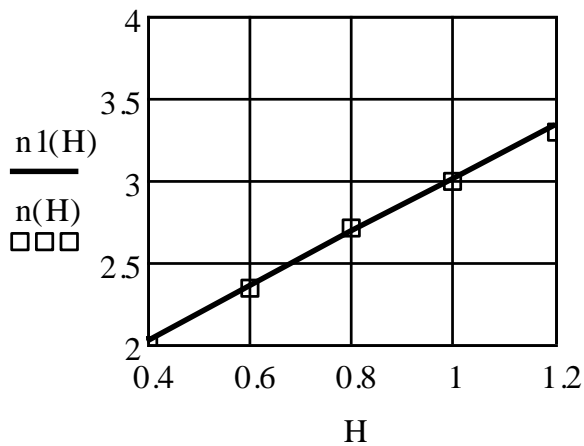


Рис. 5. Зависимости коэффициентов  $n_1$  и  $n$  от высоты снега (м)

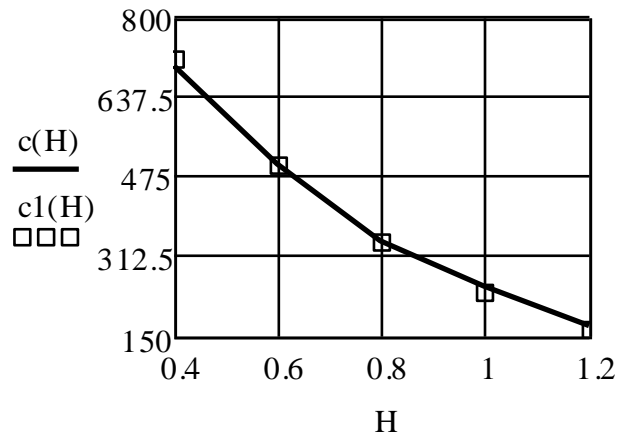


Рис. 6. Зависимости коэффициентов  $c_1$  и  $c$  от высоты снега (м)

На рис. 3 и 4 приведены зависимости коэффициентов  $n$  и  $c$  от высоты снежного покрова  $H$ .

Анализ графиков показывает, что зависимость  $n(H)$  носит линейный характер:

$$n = n_1(H) = a_1 H + b_1. \quad (9)$$

Зависимость  $c(H)$  может быть аппроксимирована убывающей экспонентой:

$$c = c_1(H) = k_1 e^{-k_2 h_{\max}(H)} + \gamma, \quad (10)$$

где  $a_1, b_1, k_1, k_2$  – коэффициенты аппроксимации;  $h_{\max}$  – м,  $\gamma$  – кПа/м.

Далее были проанализированы зависимости коэффициентов  $c$  и  $n$  при различных значениях начальных плотностей  $\rho$ . Анализ показал, что при всех значениях начальных плотностей указанные зависимости (9, 10) сохраняют свой характер.

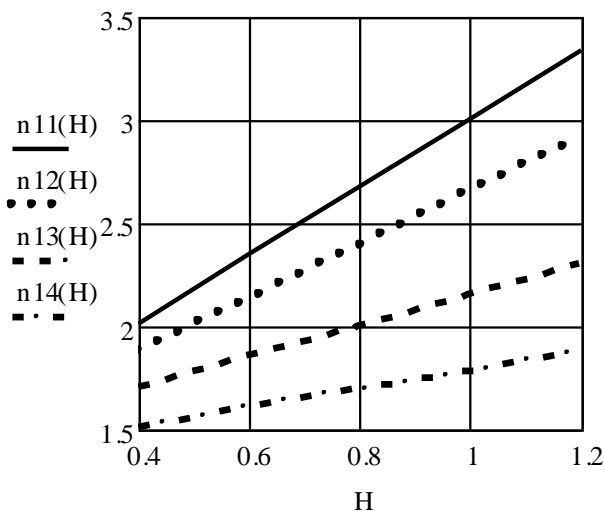


Рис. 7. Зависимости коэффициента  $n_1$  от высоты снега (м)

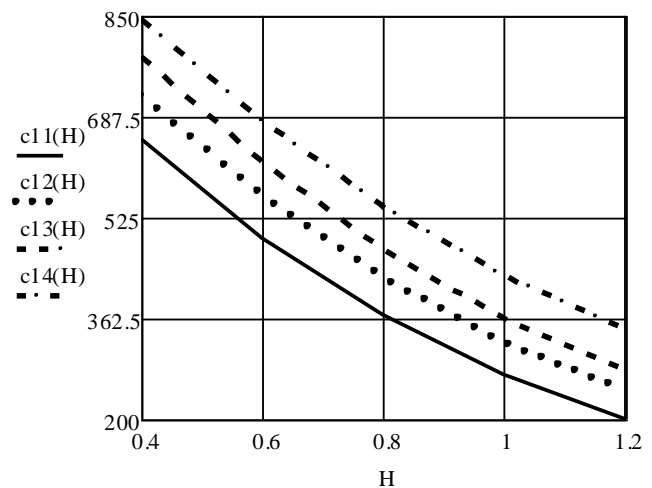


Рис. 8. Зависимости коэффициентов  $c_1$  от высоты снега (м)

На рис. 5 и 6 приведены зависимости коэффициентов  $n_1$  и  $c_1$  от высоты снега  $H$  (11, 12, 13, 14 для  $\rho=0,15; 0,20; 0,25; 0,30$  г/см<sup>3</sup> – соответственно).

Величина коэффициента аппроксимации  $a_1$  в фор. (10) линейно зависит от плотности:

$$a_1 = -a_{11}\rho + b_{11} \quad (13)$$

где  $a_{11}=8,0; b_{11}=2,84; \rho$  – г/см<sup>3</sup>.

Значения коэффициентов  $b_1, k_1, k_2$  в фор. (11, 12) постоянны –  $b_1=1,35, k_1=1100, k_2=1,73$ .

Далее, учитывая (10) и (11), была получена зависимость вертикальной деформации снега от нормальной нагрузки:

$$q = (k_1 e^{-k_2 h_{\max}(H)} + \gamma) h^{[a_1 n_1(H) + b_1]} \quad (12)$$

или

$$h = \left[ \frac{q}{k_1 e^{-k_2 h_{\max}(H)} + \gamma} \right]^{\frac{1}{a_1 n_1(H) + b_1}} \quad (13)$$

Таким образом, используя выражения (12) или (13) можно рассчитывать сопротивление снега сжатию с учетом наиболее важных параметров снежного покрова: высоты  $H$ , плотности снега  $\rho$  и его начальной жесткости  $\gamma$ .

#### Библиографический список

1. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
2. **Забавников, Н.А.** Сравнение зависимостей давление-деформация грунта / Н.А. Забавников, А.Ф. Батанов, А.В. Мирошниченко // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1982. №390. С. 72–80.
3. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.

Дата поступления  
в редакцию 17. 04.2012

L.V. Barakhtanov<sup>1</sup>, S.E. Manyanin<sup>2</sup>

#### THE ESTIMATION OF THE DEPENDENCIES TO DEFORMING THE SNOW

The Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev<sup>1</sup>  
ООО ” TRANSPORT”, N. Novgorod<sup>2</sup>

**Purpose:** The theoretical investigation of the dependencies to deforming the snow.

**Design/methodology/approach:** The study is based on analysis of equations that describes the process of deforming the snow.

**Findings:** It is possible to apply the theoretical results for the motion resistance of machines on snow.

**Research limitation/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the field of off-road capabilities of machines on snow.

**Originality/value:** The main peculiarity of the study is new approach of theoretical of deforming the snow from normal load.

*Key words:* snow cover, load., deforming, parameters of the snow, dependencies of deforming.

УДК 629.113

Л.В. Барахтанов<sup>1</sup>, В.И. Котляренко<sup>2</sup>, С.Е. Манянин<sup>3</sup>, И.А. Соколов<sup>3</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИН  
СВЕРХНИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
МГТУ (МАМИ)<sup>2</sup>,  
ООО «Трансмаш», Нижний Новгород<sup>3</sup>

Представлено описание последовательности расчетного исследования базовых характеристик шин сверхнизкого давления методом конечных элементов. Приведено сопоставление результатов расчетных и натуральных экспериментов при различных уровнях внутреннего давления воздуха в шине.

*Ключевые слова:* шина сверхнизкого давления, метод конечных элементов, нагрузочные характеристики.

Для определения основных характеристик наиболее распространенных шин сверхнизкого давления были проведены исследования полноразмерных натуральных образцов шин: 1300x600-533 «Трэкол», 52,2x25,5-24 LT модели Я-671 «Арктиктранс» в камерном и бескамерном исполнениях и разным вылетом диска (ЯШЗ), 49x23,5-21 LT модели «Авторос» и 38x18,00-16 модели «Кайман».

Исследования проводились по «Единой методике испытаний и оценки тракторных шин в лабораторных и полевых условиях», разработанной ОАО «ФИИЦ М» (г. Чехов).

Согласно программе исследования проводились при рабочих внутренних давлениях воздуха в шинах от 0,01 МПа до 0,07 МПа в соответствии с нагрузочными рядами, рекомендованными заводами-изготовителями, а также предельными нагрузками до потери шиной устойчивости. Исследования были проведены на универсальном функциональном стенде СИБ-1М для испытаний шин в ОАО «ФИИЦ М».

При движении ТС шина претерпевает сложные деформации, изменяющие ее первоначальную форму и размеры отдельных элементов. При этом максимальные деформации соответствуют участкам шины, находящимся в зоне контакта с опорной поверхностью. Основной нагрузкой воспринимаемой шиной является нормальная нагрузка, приводящая к образованию радиального прогиба шины.

Радиальный (нормальный) прогиб шины является одной из важнейших характеристик, обуславливающий мембранные и изгибные напряжения, определяющие ее работоспособность. На основании зависимости нормального прогиба от нормальной нагрузки (нагрузочной характеристики) определяются несущая способность шины и ее жесткость или эластичность. Чрезмерное увеличение прогиба приводит к повышению напряжения в материале шины, повышенному теплообразованию, снижению усталостной прочности и долговечности, а также к увеличению сопротивления качению шины. Для практических расчетов необходимо знать зависимость между нормальным прогибом шины и ее конструктивными и эксплуатационными параметрами.

Исследования нагрузочных характеристик шин от нормальной нагрузки проводились на твердой опорной поверхности рабочего стола стенда СИБ-1М. Оценивались прогиб шины  $h_z$ , коэффициент радиальной жесткости шин  $C_z$  и коэффициент поглощения энергии в шине  $\psi$ . Зависимости радиального прогиба шин от нормальной нагрузки при различных давлениях воздуха в шинах приведены на рис. 1 и 2.

Зависимость нормального прогиба  $h_z$  от радиальной нагрузки  $G_K$  носит нелинейный характер, однако в зоне рабочих нагрузок эта зависимость достаточно линейна, и в этих об-

лостях жесткость шин мало зависит от нагрузки. Зависимость нормальной жесткости от давления воздуха в шине возрастает с увеличением давления практически в прямой пропорции.

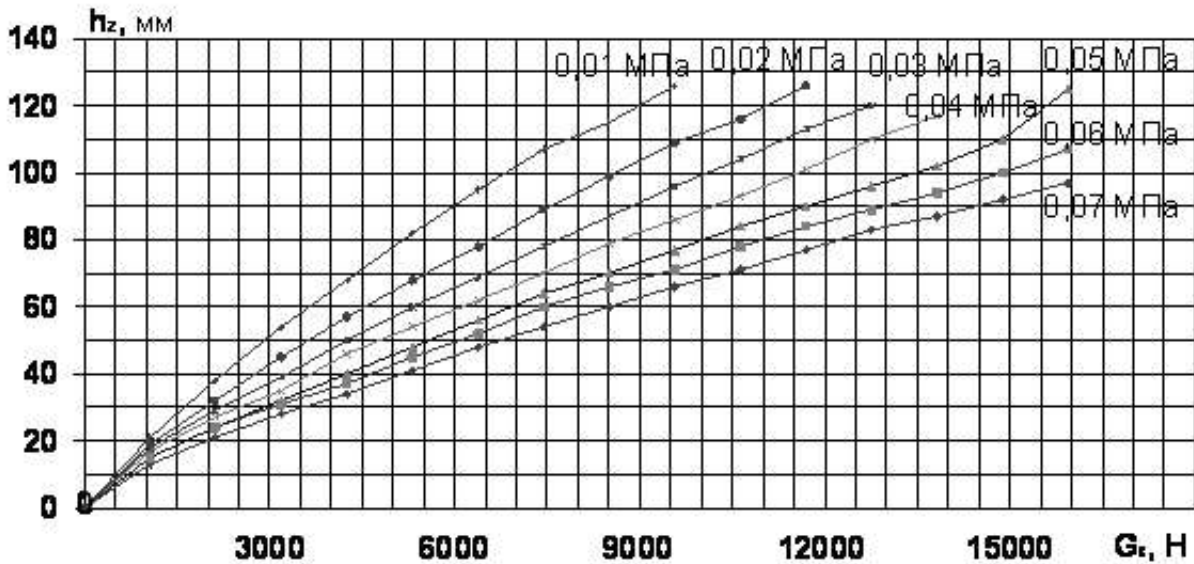


Рис. 1. Нагрузочная характеристика шины Я-671 в камерном исполнении

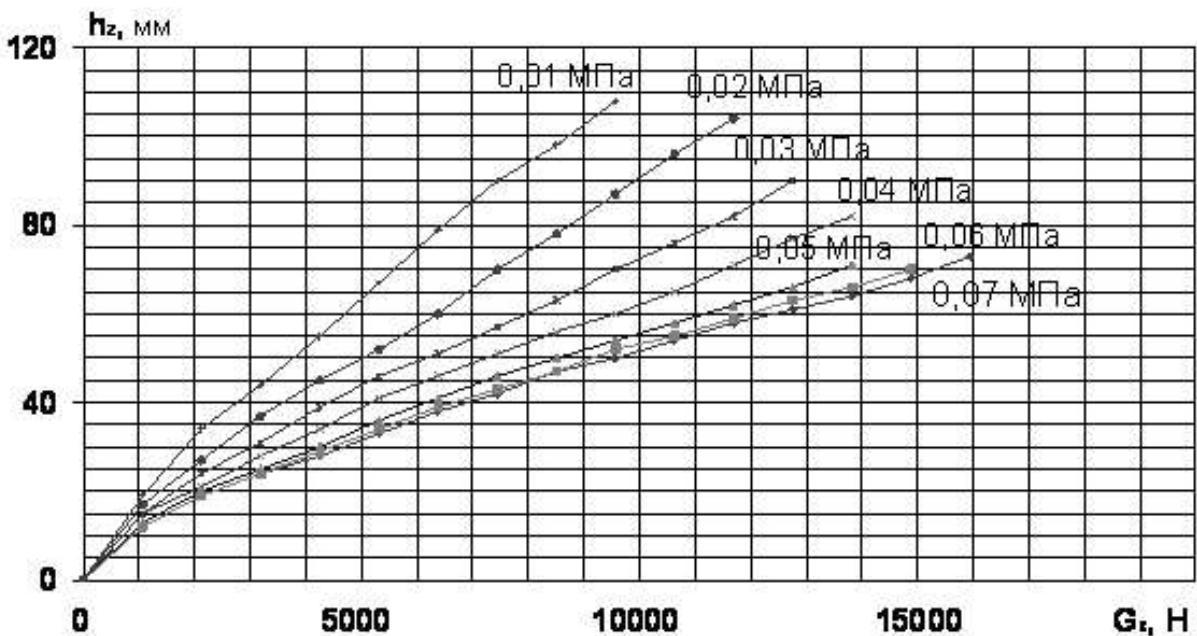


Рис. 2. Нагрузочная характеристика шины Я-671 в бескамерном исполнении

Для расчета нагрузочных характеристик применяются эмпирические и полуэмпирические зависимости, позволяющие оценить нормальный прогиб в зависимости от нормальной нагрузки и внутреннего давления воздуха в шине. Наиболее известными из указанных зависимостей являются выражения, приведенные далее [1].

Формула Р. Хедекеля:

$$G_k = \pi p_w h_z \sqrt{2R_{пр} D}, \quad (1)$$

где  $h_z$  – нормальная деформация шины;  $p_w$  – внутренне давление воздуха в шине;  $D$  – наружный диаметр шины;  $R_{пр}$  – радиус кривизны протектора.

Формула В.Л. Бидермана:

$$G_K = \frac{h_Z^2}{C_1 + C_2 \frac{h_Z}{p_W + p_0}}, \quad (2)$$

где  $p_0 = 0,1 - 0,3 \text{ кг/см}^2$  – давление в контакте шины при отсутствии в ней давления воздуха. Для широкопрофильных шин регулируемого давления  $p_0 = 0,3 \text{ кг/см}^2$ .  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные для данной шины коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров шины и материалов.

$$C_1 = \frac{\Psi_1 h_{\text{пр}}}{K_H \Psi_2 E_{\text{пр}} \pi \sqrt{2R_{\text{пр}} D}},$$

где  $K_H$  – коэффициент насыщенности рисунка протектора шины;  $\Psi_1$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения давлений по площади контакта шины;  $\Psi_2$  – коэффициент увеличения жесткости шины в связи с затрудненностью поперечных деформаций;  $E_{\text{пр}}$  – модуль упругости протекторной резины;  $h_{\text{пр}}$  – толщина протектора.

$$C_2 = \frac{1}{k_1 \pi \sqrt{2R_{\text{пр}} D}}.$$

Формула Я.С. Агейкина:

$$G_K = \frac{\pi^2}{4} h_Z (p_W + p_0) \left( \frac{B}{H} + \frac{3H}{2B} \right) \left( 1 - \frac{h_Z}{B} \right) \sqrt{D h_Z - h_Z^2}, \quad (3)$$

где  $H$  – высота профиля шины;  $p_0$  – составляющая давления в контакте от жесткости оболочки.

Формула Хэлла:

$$G_K = K p_W^{0,585} B_1^{1,3} (d + B), \quad (4)$$

где  $K = 0,0810 \div 0,0978$  – для широкопрофильных шин;  $K = 0,1096 \div 0,1254$  – для широкопрофильных шин, заменяющих одинарные шины;  $K = 0,077 \div 0,094$  – для широкопрофильных шин регулируемого давления воздуха;  $B_1$  – приведенная ширина профиля шины.

$$B_1 = \frac{B - 0,46B_{\text{об}}}{0,713},$$

где  $B_{\text{об}}$  – ширина обода.

Формула Б.В. Ненахова:

$$G_K = \frac{p_W h_Z \sqrt{R_{\text{пр}} D}}{C_1 p_W + C_c}, \quad (5)$$

где  $C_1 = 0,0489 - 0,0532$  и  $C_2 = 0,142 - 0,166$  – для широкопрофильных шин нерегулируемого давления воздуха с отношением  $\frac{H}{B} = 0,63 \div 0,80$ ;  $C_1 = 0,0502 - 0,0840$  и  $C_2 = 0,144 - 0,234$  – для широкопрофильных шин нерегулируемого давления воздуха с отношением  $\frac{H}{B} = 0,58 \div 0,63$ ;  $C_1 = 0,0744 - 0,0820$  и  $C_2 = 0,117 - 0,229$  – для широкопрофильных шин регулируемого давления воздуха.

Для проверки оценки приведенных выражений применительно к шинам сверхнизкого давления были проведены расчеты для шести моделей шин при внутреннем давлении воздуха в шинах 0,02 МПа; 0,04 МПа и 0,06 МПа. Базовая нагрузка 6000 Н.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что формула Хедкеля неприменима при давлениях внутреннего воздуха в шинах 0,02 МПа, ошибка может составлять от 23 до 200%. При давлениях внутреннего воздуха в шине 0,04 МПа и 0,06 МПа ошибка составляет 28–48%.

Расчеты по формуле В.Л. Бидермана могут дать погрешность до 53%. Формула имеет лучшую сходимость при более высоких значениях внутреннего давления воздуха в шине. При давлениях внутреннего воздуха в шине 0,06 МПа ошибка не превышает 21–22%.

Формула Я.С. Агейкина по сравнению с другими исследованными зависимостями более применима при расчетах нагружения шин сверхнизкого давления нормальной нагрузкой. Расчеты по ней могут дать погрешность не более 20–40%. При этом формула имеет указанную погрешность при всех значениях внутреннего давления воздуха в шине.

Формула Хелла дает наибольшую погрешность – до 360%. При давлении внутреннего воздуха 0,02 МПа она имеет лучшую сходимость. Ошибка составляет от 5% до 27%. Для шины 38x18.00-16 эта формула неприменима, так как при всех давлениях внутреннего воздуха ошибка составляет более 200%.

Расчет по формуле 8 Б.В. Ненахова дает погрешность в 2–3 раза.

Как видно из изложенного, при расчетах по приведенным формулам можно получить достаточно большую погрешность. Это можно объяснить тем, что упомянутые зависимости были получены в основном для многослойных шин высокого и низкого давления.

Была поставлена задача определения нагрузочных характеристик шин сверхнизкого давления, обеспечивающих более высокую точность расчетов.

С конца 60-х годов к расчету пневматических шин начали применять метод конечных элементов [2]. Этот метод для расчета шины представляет в целом достаточно сложную задачу, но при этом позволяет получить наиболее точный результат. На основе этого метода при помощи современных программных средств был произведен расчет шин сверхнизкого давления.

Объектом моделирования была выбрана шина модели Я-671 (52,2x25,5-25 LT). Шина имеет двухслойный текстильный корд. Протектор покрышки на первом этапе исследования в модели не отражен.

На начальной стадии моделирования было построено радиальное сечение покрышки, где были представлены слои резины, наполнительный шнур, бортовая проволока, текстильный корд, бортовая лента и обод колеса с прижимными кольцами. Методом вращения была получена объемная модель шины, которая была разбита на оболочные и объемные конечные элементы.

Всем элементам модели были присвоены соответствующие материалы и свойства. Важной частью подготовительных работ для проведения динамического нелинейного анализа является задание параметров расчета и контактных условий.

Вертикальное нагружение модели осуществляется в несколько этапов.

1. Закрепление шины на колесном диске. Производится путем перемещения прижимных колец навстречу друг другу.

2. Задание давления в шине. Осуществляется путем увеличения внутреннего давления в шине.

3. Вертикальное нагружение. Осуществляется путем закрепления обода и перемещения опорной поверхности в вертикальном направлении.

Результатами, полученными на данном этапе исследования, являются: напряженно-деформированное состояние шины в условиях вертикального нагружения (рис. 3), графики изменения нормальной деформации от нагрузки при различных значениях внутреннего давления.



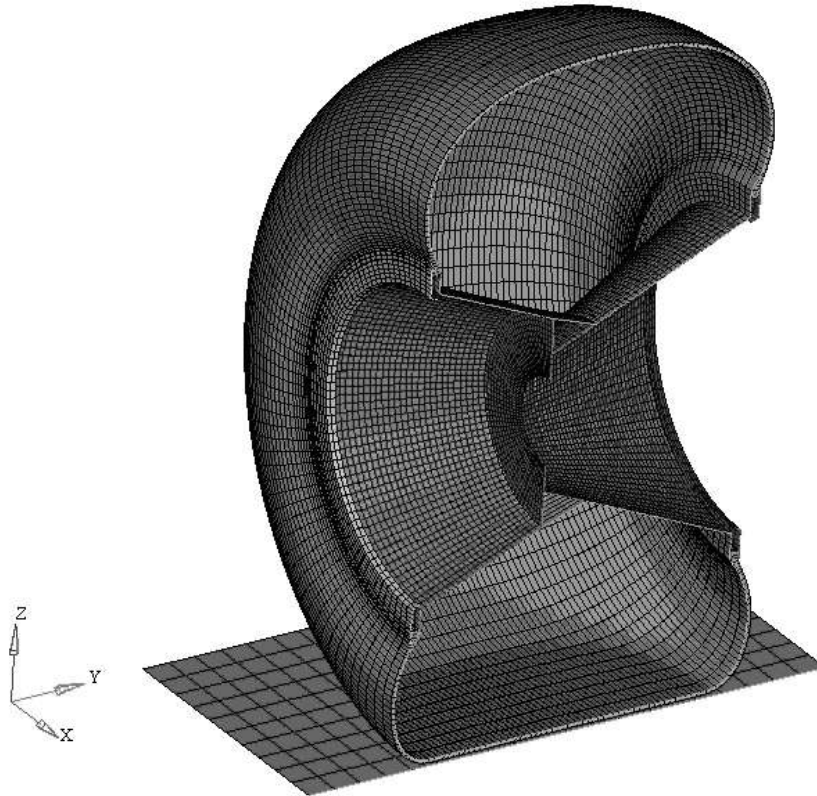


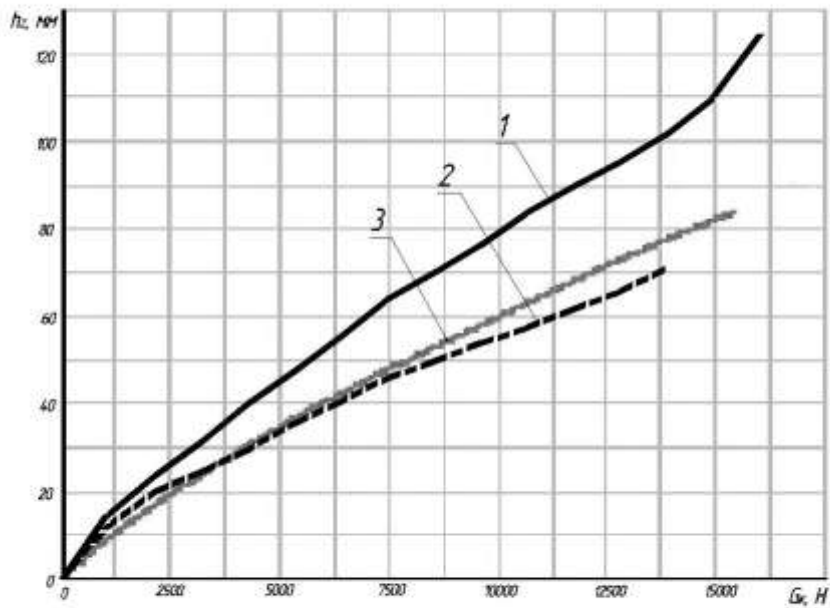
Рис. 3. Конечно-элементная модель колеса (разрез, деформированное состояние шины)

Для проверки адекватности составленной модели, а также соответствия полученных характеристик параметрам реальных шин был проведен сравнительный анализ на основании данных, полученных при экспериментальных исследованиях шин сверхнизкого давления.



Рис. 4. Нагрузочные характеристики шин

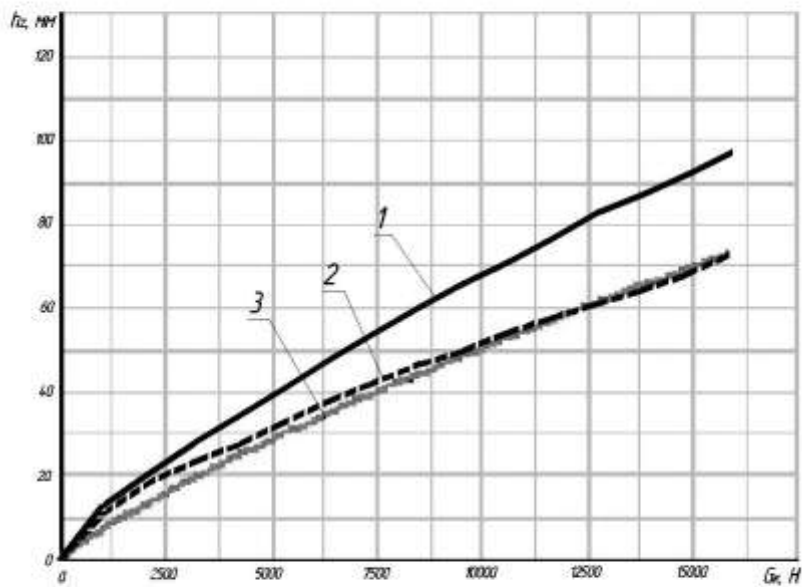
Нагрузочная характеристика шины Я-671 (52,2x25,5-24LT)  
при внутреннем давлении воздуха 0,05 МПа



1. Шина в камерном исполнении
2. Шина в бескамерном исполнении
3. Конечно-элементная модель шины

Рис. 5. Нагрузочные характеристики шин

Нагрузочная характеристика шины Я-671 (52,2x25,5-24LT)  
при внутреннем давлении воздуха 0,07 МПа



1. Шина в камерном исполнении
2. Шина в бескамерном исполнении
3. Конечно-элементная модель шины

Рис. 6. Нагрузочные характеристики шин

Для сопоставления и анализа данных были построены совместные графики нагрузочных характеристик для шин в камерном, бескамерном исполнении, а также конечно-элементной модели (рис. 4, 5, 6). В случае компьютерного моделирования расхождение составляет 7–10%. На основании этого можно сделать вывод о применимости данной конечно-элементной модели для дальнейших исследований в области машин на шинах сверхнизкого давления, связанных с плавностью хода, управляемостью и устойчивостью, а также для изучения процесса взаимодействия высокоэластичного колесного движителя с опорной поверхностью.

#### Библиографический список

1. **Бидерман, В.Л.** Автомобильные шины / В.Л. Бидерман. – М.: Госхимиздат, 1963. – 304 с.
2. **Афанасьев, Б.А.** Проектирование колесных машин с использованием моделирования / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 25 с.

*Дата поступления  
в редакцию 23.04.2012*

**L.V. Barakhtanov<sup>1</sup>, V.I. Kotlyarenko<sup>2</sup>, S.E. Manyanin<sup>3</sup>, I. A. Sokolov<sup>3</sup>**

#### INVESTIGATION OF BASE CHARACTERISTICS OF TYRES OF ULTRALOW PRESSURE

The Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev<sup>1</sup>,  
Moscow State Technical University<sup>2</sup>,  
ООО "TRANSPORT", N. Novgorod<sup>3</sup>

**Purpose:** The settlement research of loading characteristics of tyres of ultralow pressure.

**Design/methodology/approach:** The study is based on analysis of equations that describes the process of deforming the tyre.

**Findings:** It is possible to apply the results for the mathematical description of movement.

**Research limitation/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the field of off-road capabilities of machines on snow.

**Originality/value:** The main peculiarity of the study is new approach of theoretical of deforming the snow from normal load.

*Key words:* snow cover, load, deforming, parameters of the snow, dependencies of deforming.

---

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

---

УДК 629.12.001

М.Э. Францев

### АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ В МОДЕЛИ ПРОЕКТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ АМФИБИЙНЫХ КАТЕРОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ПассажиРОВ

АО «Нептун-Судомонтаж», г. Москва

Рассматривается способ проектного анализа эксплуатационных и экономических характеристик пассажирских амфибийных катеров на воздушной подушке, имеющих различные типы гибких ограждений. В качестве анализируемых параметров рассматриваются интегральные величины, объединяющие характеристики массы, мощности и скорости. Обработана база данных по построенным отечественным амфибийным катерам на воздушной подушке. Методами регрессионного анализа получены зависимости, позволяющие производить сравнение их эксплуатационных и экономических характеристик.

*Ключевые слова:* амфибийные катера на воздушной подушке, пассажирские перевозки, характеристики массы, мощности и скорости.

На территории России существует достаточно большое количество мест, где возможно эффективное применение амфибийных катеров на воздушной подушке (АКВП) для круглогодичных и сезонных перевозок. В качестве наиболее известных пассажирских транспортных маршрутов, на которых используются АКВП, можно привести такие линии, как Благовещенск – Хэйхэ (КНР), Салехард – Лабытнанги, Нижний Новгород – Бор, Самара – Рождествено и др.

В то же время массовое применение АКВП для пассажирских перевозок сдерживается отсутствием новых эффективных проектов судов этого типа. Важной проблемой проектирования пассажирских АКВП является отсутствие отработанных моделей их оптимизации, содержащих блоки эксплуатационных и экономических расчетов эффективности судов данного типа на предполагаемых линиях.

В условиях рыночной экономики одной из главных задач в проектировании судов становится повышение конкурентоспособности проекта судна. Это требование может быть реализовано за счет следующих мероприятий:

- обеспечения судну при проектировании повышенных по сравнению с судами-претендентами потребительских качеств без пропорционального повышения строительной стоимости судна и стоимости его эксплуатации;
- повышения качества проектных работ, особенно на ранних стадиях проектирования;
- уменьшения издержек на многовариантные проработки и сокращение общих сроков выработки проекта.

Одной из важнейших задач разработки проекта нового судна является блок эксплуатационных и экономических аспектов его применения. Экономическая и эксплуатационная эффективность судна в большой степени обеспечивается за счет применения при его создании передовых проектных решений [1, 3].

В рамках проектного анализа, опирающегося на блок эксплуатационных и экономических качеств пассажирских АКВП, должны быть рассмотрены следующие вопросы:

- предложены и обоснованы типы пассажирских АКВП, рассматриваемые в качестве судов-претендентов для выполнения маршрутных перевозок, включая их компоновочные аспекты;
- обоснованы качества АКВП, рассматриваемых в качестве судов-претендентов, в виде их главных размерений, полной массы, характеристик энерговооруженности, мощности и вместимости;
- обоснован выбор амфибийных качеств АКВП, рассматриваемых в качестве судов - претендентов, включая конструкцию гибкого ограждения воздушной подушки (ГО) и характеристики управляемости, исходя из навигационных условий предполагаемого района эксплуатации;
- обоснован выбор по степени предпочтительности характеристик мощности, скорости, полезной нагрузки и вместимости АКВП, рассматриваемых в качестве судов - претендентов, с точки зрения экономической эффективности пассажирских перевозок;
- выполнен сравнительный анализ различных вариантов конструкции АКВП, рассматриваемых в качестве судов-претендентов, отличающихся характеристиками мощности, скорости, полезной нагрузки и вместимости, а также амфибийными качествами, по критерию экономической эффективности, и выбран оптимальный вариант;
- обоснованы эксплуатационные качества АКВП, рассматриваемых в качестве судов-претендентов, в виде характеристик ходкости, маневренности и мореходности, а также их расходных характеристик, при этом определено потребное количество судов для организации пассажирских перевозок на рассматриваемых линиях;
- обоснованы маневренные характеристики на малых скоростях АКВП, рассматриваемых в качестве судов-претендентов, и рассмотрено их взаимодействие с плавучими причальными сооружениями при посадке и высадке пассажиров – для варианта эксплуатации при наличии открытой воды и невозможности выхода на берег;
- выполнены расчеты провозной способности АКВП, рассматриваемых в качестве судов – претендентов, и обоснование их экономической эффективности на предполагаемых линиях;
- обоснованы технологические и экономические вопросы постройки АКВП, рассматриваемых в качестве судов-претендентов, определена строительная стоимость головного судна, а также всех судов установочной серии;
- получены другие эксплуатационные и экономические показатели работы АКВП, рассматриваемых в качестве судов-претендентов, вплоть до структуры эксплуатационных расходов, а также цен билетов на различных линиях, определяющих порог окупаемости, и цен билетов для льготных категорий пассажиров.

В соответствии с практикой современного проектирования, разработке аван-проекта (проектного предложения) амфибийного катера на воздушной подушке, содержащего основные принципиальные решения по выбору главных размерений, характеристик вместимости и полезной нагрузки, энерговооруженности, примененных аэро- и гидродинамических схем, в том числе схем гибкого ограждения и ряда других, предшествует проектный анализ этих характеристик с использованием баз данных судов-претендентов. При этом весьма важен анализ эксплуатационных и экономических качеств этих судов.

Известно, что наибольшую долю в совокупной структуре прямых расходов на эксплуатацию скоростного судна и, в частности, амфибийных катеров на воздушной подушке, составляют расходы на топливо. Поэтому при обосновании основных принципиальных решений в проекте АКВП целесообразно выполнять сравнительный анализ их интегрированных расходных характеристик, включающих удельный расход топлива главных двигателей, их мощность, полную массу судна, его скорость и характеристики его полезной нагрузки с аналогичными характеристиками судов-претендентов.

Методами анализа баз данных, сформированных на основании информации о судах-претендентах, опубликованной в открытых источниках (в том числе ресурсах сети Internet),

рассчитан ряд зависимостей и построены графики, позволяющие проследить изменения ряда характеристик АКВП [2, 4]. Наибольший интерес для проектного анализа эксплуатационных и экономических качеств АКВП представляют следующие характеристики:

1. Коэффициент утилизации по дедвейту (полезной нагрузке)  $\eta = \frac{DW}{D}$ ;
2. Энерговооруженность  $\Theta = \frac{N}{D}$ ;
3. Расход топлива на перемещение 1 т полной массы на 1 км пути  $P_D = \frac{qN}{Dv}$ ;
4. Расход топлива на перемещение 1 пассажира на 1 км пути  $P_{Пасс} = \frac{qN}{nv}$ ,

где  $D$  - полная масса, т;  $N$  - мощность главных двигателей, кВт;  $DW$  – дедвейт (полезная нагрузка), т;  $q$  - удельный расход топлива двигателей на номинальном режиме, кг/кВт. ч;  $v$  - скорость крейсерского хода, км/ч;  $n$  - пассажироместимость, чел.

В качестве примера, приведены элементы сравнительного анализа эксплуатационных и экономических качеств судов – претендентов в виде АКВП с двухъярусным гибким ограждением и АКВП с гибким ограждением, использующим надувные скеги.

В качестве объектов анализа рассматривались АКВП следующих проектов:

- с двухъярусным ГО:
  - пр.18800 «Гепард»;
  - пр.18801-18803 «Пума»;
  - пр.15060-15063 «Ирбис»;
  - ГО пр. 110 «Арго»;
  - ГО «Леопард»;
- АКВП с ГО с надувными скегами «СВП-500»:
  - «Хивус-6»;
  - «Хивус-10»;
  - «Хивус-32»;
  - «Марс-700»;
  - «Марс-2000».

Известно, что при большом количестве внешних различий все эти амфибийные катера на воздушной подушке имеют достаточно много общего как в части основных конструктивных решений, так и в области примененных в конструкции материалов и технологий.

Все они характеризуются широким применением в конструкции легких сплавов и композиционных материалов, использованием главных двигателей автомобильного типа, наличием отдельных подъемных комплексов, работающих за счет отбора мощности двигателей, применением при изготовлении авиационных технологий и рядом других сходных черт. Наибольшее различие у этих АКВП имеет устройство гибкого ограждения воздушной подушки. Именно по этому признаку суда сгруппированы в базе данных.

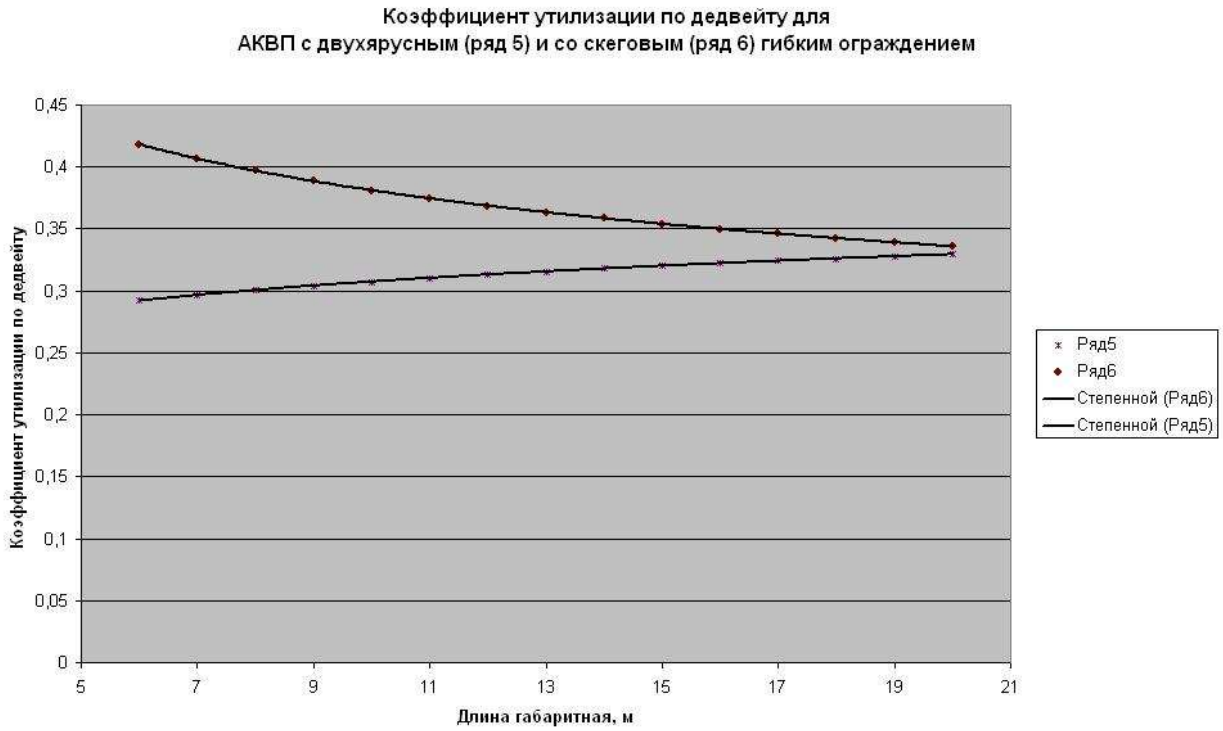
Методами регрессионного анализа произведена аппроксимация зависимостей, полученных при обработке базы данных, содержащей множества значений, представляющих собой тактико-технические качества объектов анализа [2, 4]. В графическом виде эти зависимости представлены на рис. 1 – рис. 4.

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы:

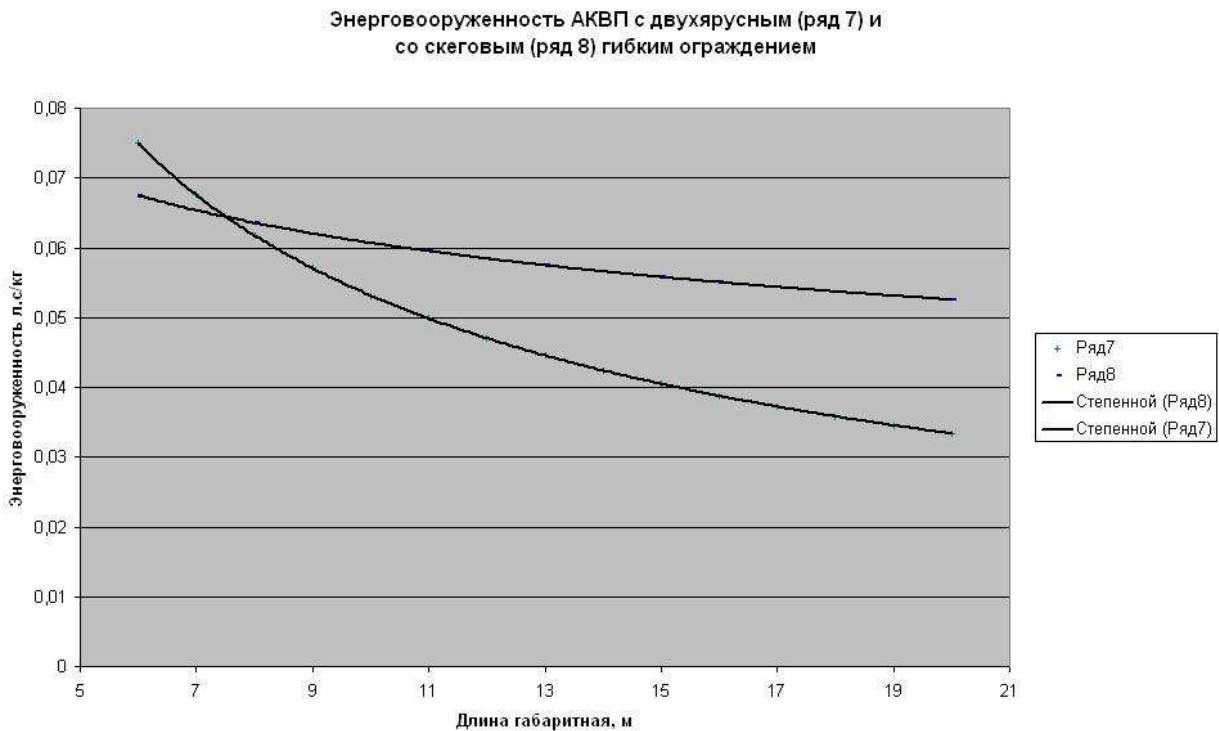
- для амфибийных катеров на воздушной подушке малых размеров и вместимости более эффективной является схема гибкого ограждения воздушной подушки, использующая надувные скеги;
- с ростом размеров амфибийного катера на воздушной подушке преимущества схемы гибкого ограждения, использующей надувные скеги, уменьшаются и, примерно, при

значениях габаритной (базовой) длины АКВП, равной 10–11 м, обе схемы с точки зрения эффективности являются равноценными;

Сохранение эффективности при дальнейшем увеличении размеров амфибийного катаера на воздушной подушке может быть обеспечено лишь за счет использования двухъярусной схемы гибкого ограждения.



**Рис. 1. Изменение коэффициента утилизации по дедвейту (полезной нагрузке) АКВП по интервалу габаритной (базовой) длины**



**Рис. 2. Изменение энерговооруженности АКВП по интервалу габаритной (базовой) длины**

Расход топлива на перемещение 1 т полной массы на 1 км пути для АКВП с двухъярусным (ряд 1) и со скеговым (ряд 2) гибким ограждением по интервалу габаритной длины

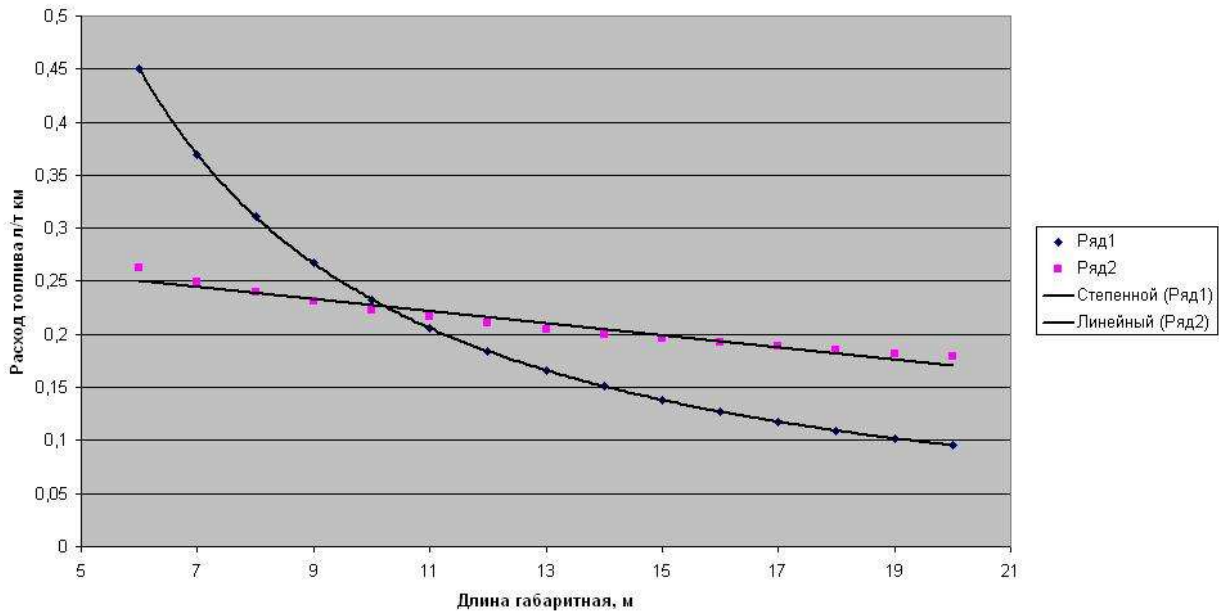


Рис. 3. Изменение расхода топлива АКВП на перемещение 1 т полной массы на 1 км пути по интервалу габаритной (базовой) длины

Расход топлива на перемещение 1 пассажира на 1 км пути для АКВП с двухъярусным (ряд 3) и со скеговым (ряд 4) гибким ограждением

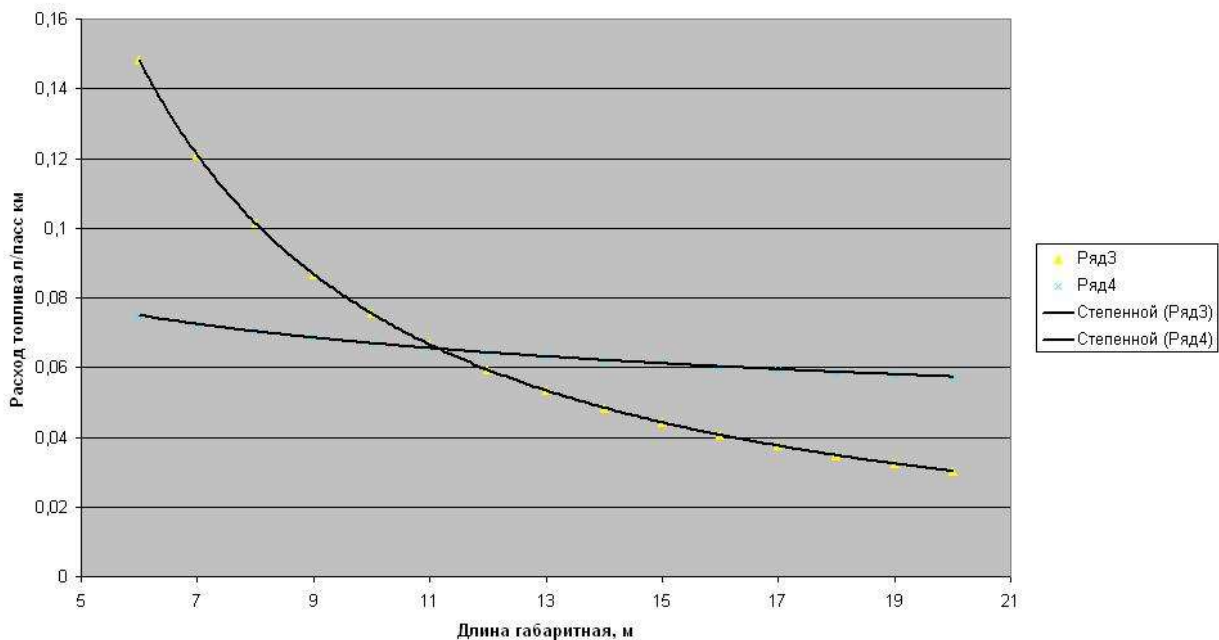


Рис. 4. Изменение расхода топлива АКВП на перевозку 1 пассажира на 1 км пути по интервалу габаритной (базовой) длины

Полученные выводы могут быть объяснены с точки зрения конструкции АКВП. Как было уже сказано, существует определенное подобие конструктивных решений АКВП обоих типов в части компоновки, конструкции верхних строений в виде надстройки и/или рубки,



судовой энергетической установки, подъемно-двигательных комплексов и ряда других элементов судна. Известно, что для катеров небольших размеров толщина корпусных конструкций определяется соотношениями не столько общей, сколько местной прочности. Использование надувных скегов в конструкции ГО воздушной подушки позволяет обеспечить существенный выигрыш в массе корпуса за счет минимизации контактов корпуса с опорной поверхностью (экраном), обеспечиваемых этой схемой. Существует также определенный выигрыш в массе самого гибкого ограждения за счет более простой и менее объемной конструкции по отношению к двухъярусной схеме ГО.

С ростом размеров судна необходимость обеспечения общей прочности корпуса требует увеличения размеров его связей, что приводит к сопоставимой массе корпусных конструкций АКВП обоих типов. В то же время необходимость обеспечения прочности надувных элементов ГО в виде скегов, находящихся в непрерывном контакте с опорной поверхностью (экраном), вызывает опережающий рост массы конструкций самого ГО. При этом важным фактором становится меньшая (по сравнению с двухъярусной схемой гибкого ограждения воздушной подушки) эффективность схемы ГО, использующей надувные скеги. Совокупность указанных факторов приводит к снижению эффективности с ростом размеров судна на удельных эксплуатационных и экономических характеристиках АКВП, имеющих ГО с надувными скегами, по отношению к аналогичным характеристикам АКВП с двухъярусным гибким ограждением.

В заключение необходимо отметить, что модель оптимизации пассажирского АКВП, позволяющая обеспечить заданные эксплуатационные качества судна, а также конкурентоспособность проекта, реализуемая при проектировании, в обязательном порядке должна содержать анализ эксплуатационных и экономических показателей, обосновывающих выбор проектных характеристик судна.

#### Библиографический список

1. Ашик, В.В. Проектирование судов / В.В. Ашик. – Л., Судостроение, 1985. – 486 с.
2. Лоран, П.-Ж. Аппроксимация и оптимизация / П.-Ж. Лоран. – М.: Мир, 1975. – 498 с.
3. Пашин, В.М. Оптимизация судов / В.М. Пашин. – Л., Судостроение, 1983. – 286 с.
4. Суворов, А.И. Информационная технология экспериментальных и научных исследований в судостроении. Проблемные разработки программного обеспечения новой информационной технологии: сб. науч. тр. – Калинин. 1990. Вып. 3. С. 118–126.

*Дата поступления  
в редакцию 14.11.2011*

**M. E. Frantsev**

#### **ANALYSIS OF OPERATIONAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE MODEL DESIGN OPTIMIZATION OF AMPHIBIOUS HOVERCRAFT FOR THE CARRIAGE OF PASSENGERS**

The method of project analysis of operational and economic characteristics of the passenger amphibious hovercrafts which have the different types of flexible air bag protection is considered in this paper. The integral quantities which combining the characteristics of mass, power and speed are considered as parameters in analyze. The data base of amphibious hovercraft which is contained the characteristics of these boats is processed. The data base which contains the characteristics of amphibious hovercrafts was processed by the method regression analysis. The dependence which obtained by this way allow to compare operational and economic characteristics of hovercrafts.

*Key words:* amphibious hovercrafts, passenger transportation, characteristics of mass, power and speed.

УДК 629.12

Н.В. Ершов, Н.Ф.Ершов

## ПРЕДЕЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКОГО РАДИУСА И МЕТАЦЕНТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается предельное положение прямостенного корпуса корабля – на грани опрокидывания. За предельную характеристику принимается возвышение центра тяжести над основной линией. Метацентрический радиус и метацентрическая высота определяются для этого положения, когда корпус наклоняется до выхода и после выхода скулы из воды. Показывается, что такая характеристика остойчивости как начальная метацентрическая высота не может являться определяющей характеристикой в предельном положении судна.

*Ключевые слова:* предельное положение, метацентрический радиус, метацентрическая высота, судно, опрокидывание, центр тяжести, центр величины.

Под предельным положением судна понимается положение на грани опрокидывания. В качестве предельной характеристики принято возвышение центра тяжести над основной линией [2].

Обычно морские суда имеют в средней части вертикальные борты, в оконечностях же шпангоуты имеют развал. Такого типа обводы можно приближенно рассматривать как прямостенные [1].

Рассмотрим сначала вертикальное положение корпуса шириной  $B$  и осадкой  $T$  (рис. 1).

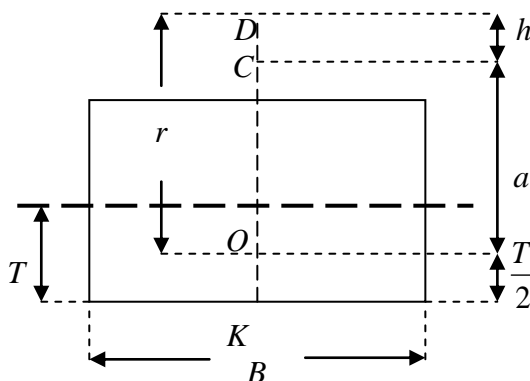


Рис. 1. Вертикальное положение корпуса

Здесь точка  $O$  - центр величины, точка  $C$  - предельное положение центра тяжести,  $D$  - метациентр,  $OC = a$ ,  $OD = r = \frac{B^2}{12T}$  - метацентрический радиус,  $CD = h$  - начальная метацентрическая высота,  $h = r - a$ .

Ранее [2] было показано, что в предельном положении  $KC = \frac{T}{2} + \frac{B^2}{12T}$ . Тогда предельное значение начальной метацентрической высоты будет  $h = 0$ .

Рассмотрим наклоненное положение корпуса без оголения скулы (рис. 2).

Обозначим через  $y$  и  $z$  координаты центра величины  $O_1$  при крене в осях, начало которых совпадает с центром величины в прямом положении судна  $O$ . Ось  $y$  направлена в сторону наклона, а ось  $z$  вертикально вверх. Получим выражения координат центра величины.

Здесь  $ABED$  объем погруженной части, равный  $TB$ . Ранее [2] было получено в равновесном предельном состоянии  $h_1 = T - \frac{B}{2} \operatorname{tg} \varphi$ ,  $h_2 = T + \frac{B}{2} \operatorname{tg} \varphi$ . Значения  $O_1K_1$  и  $O_1K_2$  как центра тяжести трапеции

$$O_1K_1 = \frac{T}{2} + \frac{B^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{24T}, \quad O_1K_2 = \frac{B}{2} - \frac{B^2 \operatorname{tg} \varphi}{12T}.$$

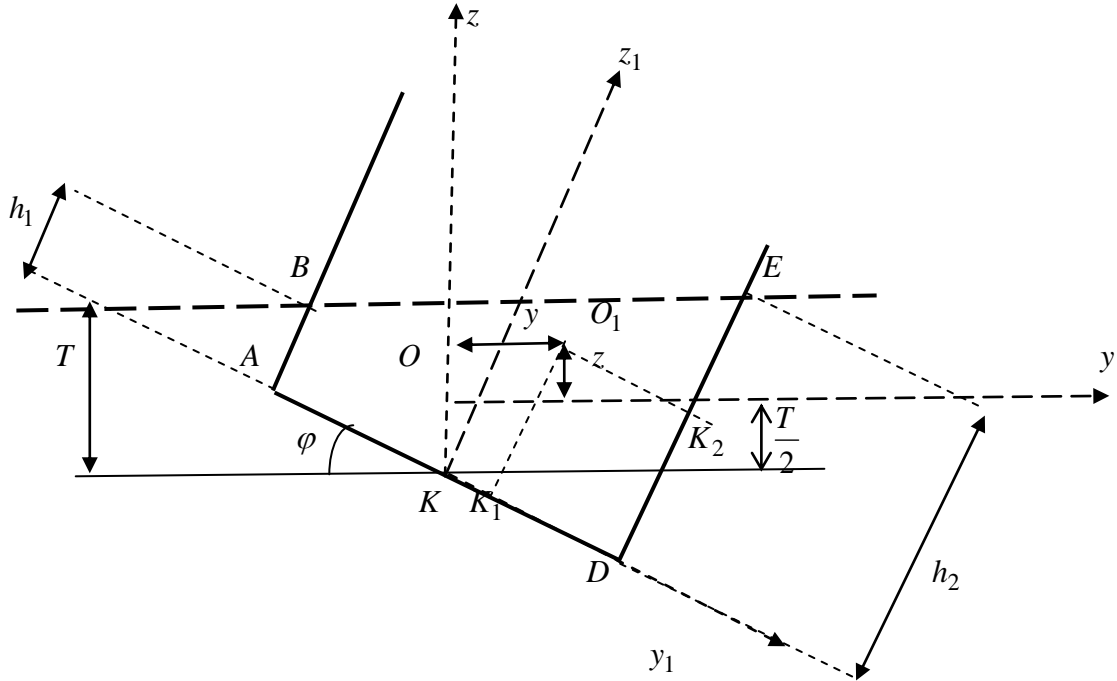


Рис. 2. Наклонение до оголения скулы

Из геометрических соотношений можно получить координаты центра величины  $O_1$

$$y = \frac{T}{2} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} \left[ 1 + \frac{B^2}{6T^2} \left( 1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{2} \right) \right], \quad z = \frac{T}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} \right) + \frac{B^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}{24T \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}.$$

Исключая угол  $\varphi$ , получаем траекторию центра величины. Радиус кривизны (мета-

центрический радиус) получается из выражения  $r = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{dy}{dz} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\left| \frac{d^2y}{dz^2} \right|}$ .

Получим выражение для радиуса кривизны в относительном движении, т.е. в координатах  $y_1, z_1$ , связанных с отсеком (рис. 2).

В этой подвижной системе координаты точки  $O_1$ , как центра тяжести трапеции, равны

$$y_1 = \frac{B^2}{12T} \operatorname{tg} \varphi, \quad z_1 = \frac{T}{2} + \frac{B^2}{24T} \operatorname{tg}^2 \varphi.$$

Предельное значение  $KC = \frac{T}{2} + \frac{B^2}{24T} (2 + \operatorname{tg}^2 \varphi)$  [2]. Тогда радиус кривизны траектории (метацентрический радиус) равен

$$r = \frac{B^2}{12T} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}.$$

Тогда обобщенная метацентрическая высота в предельном состоянии с учетом значения  $KC$  в наклоненном предельном положении [2] в относительном движении равна

$$h = \frac{B^2}{12T} \operatorname{tg}^2 \varphi \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}.$$

Таким образом, в предельном состоянии метацентрическая высота зависит линейно от отношения  $\frac{B}{T}$  и ширины отсека  $B$ .

На границе выхода скулы из воды  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{2T}{B}$  и  $h = \frac{T}{3} \sqrt{1 + \frac{4T^2}{B^2}}$ .

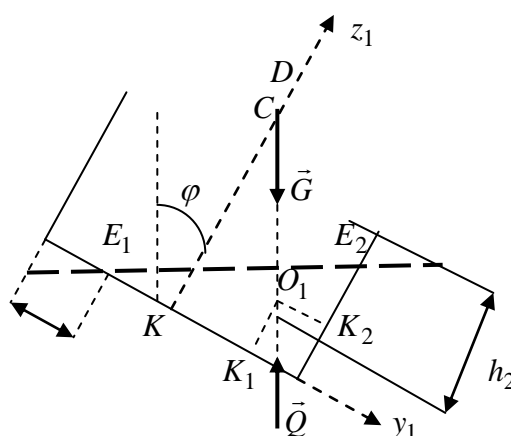


Рис. 3. Наклонение с оголением скулы

В случае оголения скулы имеем (рис. 3)  $O_1K_1 = \frac{1}{3}h_2 = \frac{1}{3}\sqrt{2TB \operatorname{tg} \varphi}$ ,  $O_1K_2 = \frac{1}{3}(B - b) = \frac{1}{3}\sqrt{\frac{2TB}{\operatorname{tg} \varphi}}$ . Тогда в неподвижной системе отсчета координаты центра величины  $O_1$  будут

$$y = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} \left[ \frac{B}{2} + \frac{\sqrt{2TB}}{3\sqrt{\operatorname{tg} \varphi}} (\operatorname{tg}^2 \varphi - 1) \right],$$

$$z = \frac{T}{2} - \frac{T}{3\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} \left( 2\sqrt{\frac{2B}{T}} \operatorname{tg} \varphi - \frac{3B}{2T} \operatorname{tg} \varphi \right).$$

В подвижной системе отсчета  $y_1 = \frac{B}{2} - O_1K_2 = \frac{B}{2} - \frac{1}{3}\sqrt{\frac{2TB}{\operatorname{tg} \varphi}}$ ,  $z_1 = O_1K_1 = \frac{1}{3}\sqrt{2TB \operatorname{tg} \varphi}$ .

Тогда уравнение кривой центра величины

$$z_1 = \frac{2}{9} \frac{TB}{\frac{B}{2} - y_1}.$$

Радиус кривизны траектории (метацентрический радиус) равен

$$r = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{dz_1}{dy_1} \right)^2 \right]^{3/2}}{\left| \frac{d^2z_1}{dy_1^2} \right|} = \frac{B}{6 \operatorname{tg} \varphi} \sqrt{\frac{2T}{B \operatorname{tg} \varphi}} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)^{3/2}.$$

Для этого положения предельное значение  $KC$  равно [2]

$$KC = \frac{B}{2 \operatorname{tg} \varphi} - \frac{T}{3} \sqrt{\frac{2B}{T}} \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi}{\operatorname{tg} \varphi \sqrt{\operatorname{tg} \varphi}}.$$

Метацентрическая высота будет равна

$$h = \frac{B}{6} \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}{\operatorname{tg} \varphi \sqrt{\operatorname{tg} \varphi}} \left[ \sqrt{\frac{2T}{B}} (3 + \operatorname{tg}^2 \varphi) - 3\sqrt{\operatorname{tg} \varphi} \right].$$

Тогда, например, при  $\frac{B}{T} = 2.5$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $h = 0.136B$ ; при  $\frac{B}{T} = 5$ ,  $\varphi = 21^\circ 45'$ ,  $h = 0.0716B$ ;

при  $\frac{B}{T} = 3$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $h = 0.011B$ ; при  $\varphi = 30^\circ$ ,  $h = 0.117B$ .

Построение кривой центра величины в системе координат, связанных с отсеком.

На рис. 4 показаны координатные оси  $y_1, z_1$  связанные с отсеком в каком-то наклонном положении. В первоначальном вертикальном положении эта система координат обозначена  $y_1^0, z_1^0$ . При наклонении точка  $K$  будет перемещаться, и ее положение  $K_1$  зависит от угла наклона  $\varphi$ . Рассмотрим точку  $M$ , принадлежащую кривой центра величины. Ее координаты в неподвижной системе отсчета  $yOz$  будут  $y, z$ . Координаты в подвижной системе  $y_1K_1z_1$  будут равны  $y_1, z_1$ . Эти координаты связаны соотношениями

$$y = y_0 + y_1 \cos \varphi + z_1 \sin \varphi, \quad z = z_0 - y_1 \sin \varphi + z_1 \cos \varphi. \quad (1)$$

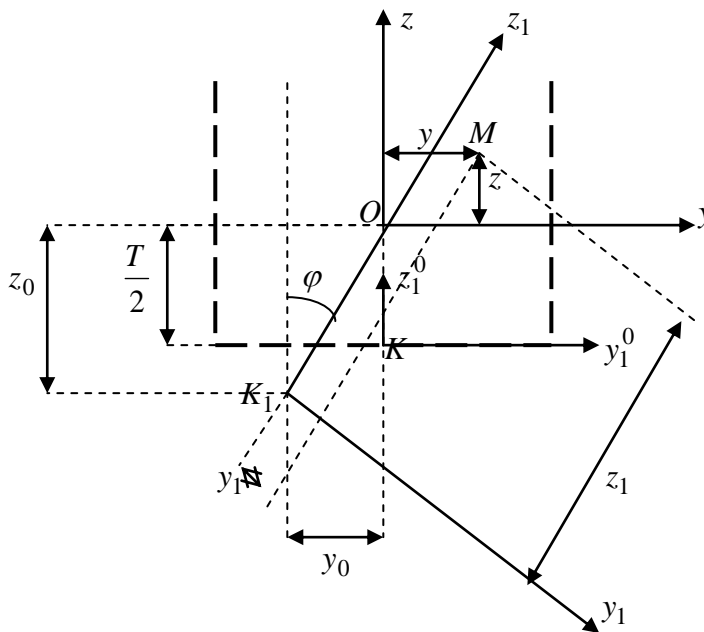


Рис. 4 Система координат, связанных с отсеком

В исходном вертикальном положении  $y_0 = 0$ ,  $z_0 = -\frac{T}{2}$ . Ранее были получены выражения для координат  $y_1, z_1, y, z$  через угол наклона  $\varphi$ . Следовательно, для каждого угла наклона мы можем определить конкретные значения всех этих четырех координат. Из зависимостей (1) определяем начало подвижной системы координат  $K_1$ , относительно начала неподвижной  $O$ . Это положение определяют координаты  $y_0, z_0$ .

Тогда построив координатную систему  $y_1K_1z_1$  и отложив в ней соответствующие значения координат  $y_1, z_1$ , получим положение точки  $M$  в подвижной системе отсчета. Беря ряд значений углов наклона  $\varphi$  и строя каждый раз свою систему  $y_1K_1z_1$ , в конечном счете, получаем кривую центра величины. На рис. 5 для отсека  $\frac{B}{T} = 2.5$  построены кривые центра величины: 1 – в неподвижной системе  $yOz$  (верхняя); 2 – в подвижной системе  $y_1K_1z_1$  (нижняя). Получаем, что до углов наклона  $\varphi < 20^\circ$  эти кривые практически не отличаются друг от друга. В табл. 1 для отсека  $\frac{B}{T} = 2.5$  приведены значения  $y_0, z_0$ .

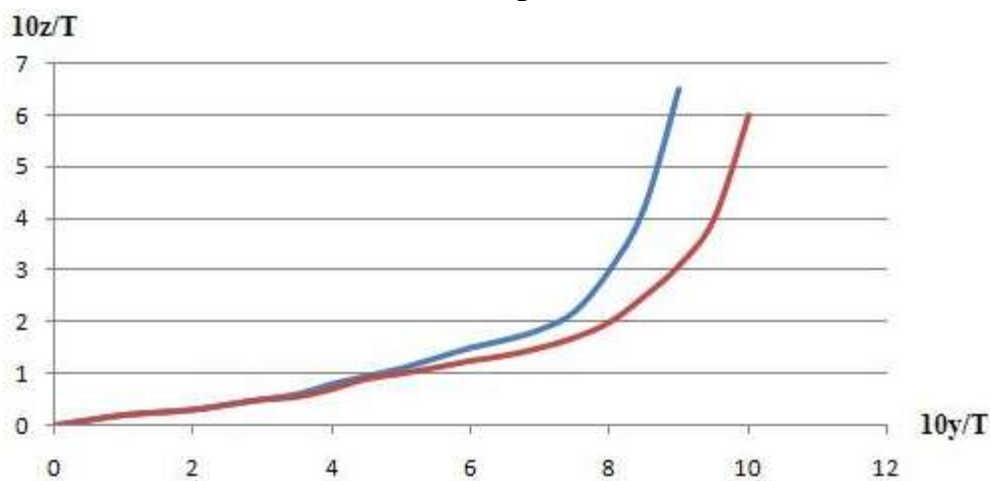


Рис. 5. Кривые центра величины для  $B/T/2.5$

Таблица 1

Координаты точки  $K$  основной линии

$\varphi$	$0^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$38^\circ 40'$	$45^\circ$	$60^\circ$
$y_0$	0	$0.018T$	$-0.005T$	$-0.09T$	$-0.353T$	$-0.443T$
$z_0$	$-0.5T$	$-0.381T$	$-0.217T$	$-0.047T$	$0.43T$	$1.59T$

В табл. 2 для отсека  $\frac{B}{T} = 2.5$  приведены значения обобщенной метацентрической высоты в предельном положении для различных углов наклона.

Таблица 2

Метацентрическая высота в предельном положении

$\varphi$	$0^\circ$	$20^\circ$	$38^\circ 40'$ оголение скулы	$45^\circ$
Точная (наше решение)	$h = 0$	$h = 0.0208B$	$h = 0.172B$	$h = 0.215B$
На базе теории клиньев [4]	$h = 0$	$h = 0.041B$	$h = 0.22B$	$h = 0.386B$

При  $\frac{B}{T} = 5$  в момент оголения скулы  $\varphi = 21^{\circ}80'$  получаем  $h = 0.0716B$ , а на базе теории клиньев  $h = 0.098B$ .

Таким образом, в предельном положении такая характеристика остойчивости как метацентрическая высота теряет смысл. В литературе [3] указывается, что даже очень большая начальная метацентрическая высота не может гарантировать от потери остойчивости.

В нашей работе [2] такой предельной характеристикой предложено брать возвышение центра тяжести над основной линией.

#### Библиографический список

1. **Благовещенский, С.Н.** Справочник по статике и динамике корабля. Ч. 1. Статика корабля / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодшин – Л.: Судостроение, 1970. – 336 с.
2. **Ершов, Н.В.** Анализ опрокидывания плавсредств в предельном состоянии. / Н.В. Ершов, Н.Ф. Ершов // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: мат. Всероссийской научно-технической конференции; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. С. 81–95.
3. **Аксютин, Л.Р.** Аварии судов от потери остойчивости / Л.Р. Аксютин, С.Н. Благовещенский – Л.: Судостроение, 1975. – 200 с.
4. **Алферьев, М.Я.** Теория корабля / М.Я. Алферьев.– М.: Транспорт, 1972. – 446 с.

*Дата поступления  
в редакцию 20.04.2012*

**N.V. Ershov, N.W. Ershov**

#### LIMIT VALUES of METACENTRIC RADIUS AND METACENTRIC HEIGHT

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

We consider the limiting position straight wall hull - on the verge of tipping over. For the limiting characteristic elevation of the center of gravity is taken over the main line. Metacentric radius and metacentric height are determined for this position when the enclosure is tilted up and out after the cheekbones from the water. It is shown that such a characterization of stability as the initial metacentric height can not be a defining characteristic in the extreme position of the vessel. The authors propose to use the elevation of the center of gravity above the base line as a limiting characteristic.

*Key words:* limit position, the radius of the metacentric, metacentric height, ship breaking, the center of gravity, center of values.

УДК 621.4-2

В.Л. Химич, Н.А. Хрипач, Л.Ю. Лежнев, Б.А. Папкин,  
Ф.А. Шустров, Д.А. Иванов, В.И. Сонкин, И.А. Папкин

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ОКИСЛИТЕЛЬНОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Московский государственный технический университет «МАМИ»

Рассмотрена одномерная модель окисления CO, CH и NO<sub>2</sub> для расчета вредных выбросов на выходе из перспективного дизельного каталитического нейтрализатора. Модель базируется на законах сохранения массы, энергии и химических веществ в каталитическом нейтрализаторе и использует упрощенную схему гетерогенных химических реакций на поверхности катализатора. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными подтверждает достоверность модели.

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, дизель, окислительный каталитический нейтрализатор, химические реакции.

Для выполнения вводимых в России с 2014 г. перспективных экологических норм Евро-5, а в дальнейшем Евро-6 на вредные выбросы с отработавшими газами (ОГ) дизельного двигателя необходимо иметь 4-компонентную систему нейтрализации для контроля CO, CH, NO<sub>x</sub> и дисперсных частиц. Такая система обычно включает дизельный окислительный катализатор, селективно-восстановительный катализатор и сажевый фильтр, каждый из которых выполняет свои собственные, в том числе новые функции [1-3]. Например, окислительный нейтрализатор, помимо окисления CO и CH, может участвовать в активной и/или пассивной регенерации сажевого фильтра, предотвращая повышение противодавления на выпуске и потерю топливной экономичности. При этом для эффективной пассивной регенерации окислительный нейтрализатор должен обеспечивать на входе в фильтр отношение NO<sub>2</sub>/NO = 1,0. В связи с усложнением системы нейтрализации моделирование играет все более важную роль в разработке и оптимизации ее компонентов.

Целью данной работы является разработка и проверка модели перспективного дизельного окислительного каталитического нейтрализатора.

Предлагаемая модель дизельного окислительного нейтрализатора базируется на физической и химической теориях, которые описывают химическую кинетику и характеристики переноса тепла и массы в одномерной квазистационарной постановке. Модель учитывает: конвективный перенос тепла и массы от ОГ к поверхности катализатора; гетерогенные химические реакции на поверхности катализатора; тепловые потери в окружающую среду и теплопроводность вдоль каталитического нейтрализатора. Влияние гомогенных реакций в газовой фазе мало и поэтому не учитывается. Отработавшие газы состоят из O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub> и CH.

**Основные уравнения.** Основные уравнения модели рассматривают сохранение массы, энергии и химических веществ в одном канале нейтрализатора. Для упрощения неравномерность распределения потока на входе не учитывается, а при описании переноса массы и энергии между газом и твердой поверхностью используются эмпирические коэффициенты из литературных источников.

Далее приведены уравнения сохранения энергии и веществ в газовой среде и на поверхности катализатора в форме, предложенной в работе [4]. Для одномерной модели уравнение сохранения массы газовой фазы в канале имеет вид

$$\frac{\partial u \cdot Y_{gi}}{\partial z} + k_m \varepsilon_g (Y_{gi} - Y_{si}) = 0,$$



где  $u$  – скорость потока в одном канале,  $z$  – осевое направление канала;  $Y_{gi}$  – концентрация  $i$ -го вещества в газовой фазе, а  $Y_{sj}$  – концентрация на твердой стенке  $k_m$  – коэффициент массообмена,  $\varepsilon_g$  – геометрическая площадь поверхности.

Уравнение сохранения энергии газовой фазы имеет вид

$$\rho_g c_{pg} u \frac{\partial T_g}{\partial z} + h \varepsilon_g (T_g - T_w) = 0,$$

где  $c_{pg}$  – удельная теплоемкость газа,  $T_g$  – температура газа,  $T_w$  – температура стенки,  $h$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $\rho_g$  – плотность газа.

Уравнение сохранения индивидуальных веществ на стенке имеет вид

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial Y_{si}}{\partial t} = k_m \varepsilon (Y_{gi} - Y_{si}) - r_i S_a,$$

где  $\varepsilon$  – пористость,  $r_i$  – скорость химической реакции вещества,  $S_a$  – масса катализатора на единицу объема каталитического блока,  $t$  – время.

Уравнение сохранения энергии на стенке имеет вид:

$$(1 - \varepsilon) \rho_w c_{pw} \frac{\partial T_w}{\partial t} = (1 - \varepsilon) \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} + \sum H_i r_i S_a + h \varepsilon_g (T_g - T_w),$$

где  $H_i$  – теплота реакции  $i$ -го вещества,  $\lambda_w$  – теплопроводность стенки.

**Каталитические реакции.** Гетерогенные химические реакции на поверхности дизельного окислительного катализатора моделируются по трехреакционной схеме.



Окисление оксида углерода в диоксид углерода является упрощенным и поясняется уравнением (1). Окисление углеводородов дается уравнением (2). В качестве углеводорода выбран пропилен ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ), который часто используют в аналогичных моделях, как более удобный для моделирования.

Для моделирования реакций используются кинетические выражения типа Ленгмюра-Хиншельвуда, учитывающие ингибирующее влияние NO на скорости  $r$  химических реакций (1–3):

$$r_{\text{CO}} = k_{\text{CO}} Y_{\text{CO}} Y_{\text{O}_2} / G,$$

$$r_{\text{C}_3\text{H}_6} = k_{\text{C}_3\text{H}_6} Y_{\text{C}_3\text{H}_6} Y_{\text{O}_2} / G,$$

$$r_{\text{NO}} = k_{\text{NO}} Y_{\text{NO}} Y_{\text{O}_2} / G,$$

где  $k_i$  и  $Y_i$  – константа скорости реакции и концентрация  $i$ -го вещества ( $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{NO}$ ), а  $G$  – ингибирующий фактор, который учитывает влияние на общую кинетику адсорбции и десорбции реагентов и продуктов.

Константа скорости реакции  $k_i$  имеет вид уравнения Аррениуса

$$k_i = A_{Ri} e^{-E_{Ri}/RT},$$

где  $A_{Ri}$  – предэкспоненциальный множитель, а  $E_{Ri}$  – энергия активации  $i$ -го вещества. Значения этих констант заимствованы из работы [5].

Ингибирующий фактор  $G$  задается выражением

$$G = T \times [1 + K_1 Y_{\text{CO}} + K_1 Y_{\text{C}_3\text{H}_6}]^2 \times [1 + K_3 Y_{\text{CO}}^2 Y_{\text{C}_3\text{H}_6}^2] \times [1 + Y_{\text{NO}}^{0.7}]. \quad (4)$$

Первый член уравнения (4)  $T$  отражает температурную зависимость модифицированного уравнения Аррениуса для скорости реакции. Второй член уравнения  $[1 + K_1 Y_{\text{CO}} + K_1 Y_{\text{C}_3\text{H}_6}]^2$ , является функцией, которая учитывает ингибирующее влияние хемисорбции CO и  $\text{C}_3\text{H}_6$ . Третий член уравнения  $[1 + K_3 Y_{\text{CO}}^2 Y_{\text{C}_3\text{H}_6}^2]$  используется для калибровки модели с учетом экспериментальных данных, полученных при повышенных концентрациях

СО и С<sub>3</sub>Н<sub>6</sub>. Последний член уравнения  $[1 + Y_{\text{NO}}^{0,7}]$  учитывает ингибирующее влияние NO на скорости окисления СО и С<sub>3</sub>Н<sub>6</sub>.

Константа равновесия адсорбции  $K_i$ , заимствована из работы [5] и также моделируется в форме уравнения Аррениуса с помощью выражения

$$K_i = A_{Ai} e^{-E_{Ai}/RT}$$

**Перенос тепла и массы.** Помимо химических реакций характеристики окислительно-нейтрализатора существенно зависят от переноса массы и тепла от ОГ к поверхности катализатора. Конвективный перенос тепла от ОГ к каталитическому блоку и тепло, генерируемое при экзотермических реакциях на поверхности катализатора, являются основными источниками тепла в каталитическом нейтрализаторе. Перенос массы в каналах катализатора обусловлен градиентом концентрации между ОГ и подложкой. Из-за низких концентраций массоперенос осуществляется вследствие диффузии и рассчитывается с учетом аналогии тепло- и массопереноса.

Процессы конвективного тепло- и массопереноса моделируются по упрощенной модели. В этой модели безразмерные числа Нуссельта (Nu) и Шервуда (Sh) характеризуют скорости тепло- и массопереноса. Коэффициенты теплопереноса и массопереноса рассчитываются по формулам:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_g}{D_h},$$

$$k_{D,j} = \frac{Sh \cdot D_j}{D_h},$$

где  $D_h$  – гидравлический диаметр канала ячейки нейтрализатора.

Исследования показывают, что числа Нуссельта и Шервуда зависят от структуры течения в узких каналах нейтрализатора. В настоящей модели для упрощения расчетов принято, что течение является полностью развитым стационарным и ламинарным. Для таких течений значения Nu и Sh изменяются в диапазоне от 3,0 до 4,5. В настоящей работе, с учетом результатов исследования [6], использовались фиксированные значения чисел Нуссельта и Шервуда, равные 3.

**Граничные и начальные условия.** Для решения основных уравнений модели, необходимо задать граничные и начальные условия. Граничными условиями являются концентрации вредных веществ и температура ОГ на входе в дизельный окислительный катализатор. Начальные условия для температуры на поверхности катализатора выбраны равными окружающей температуре.

Таблица 1

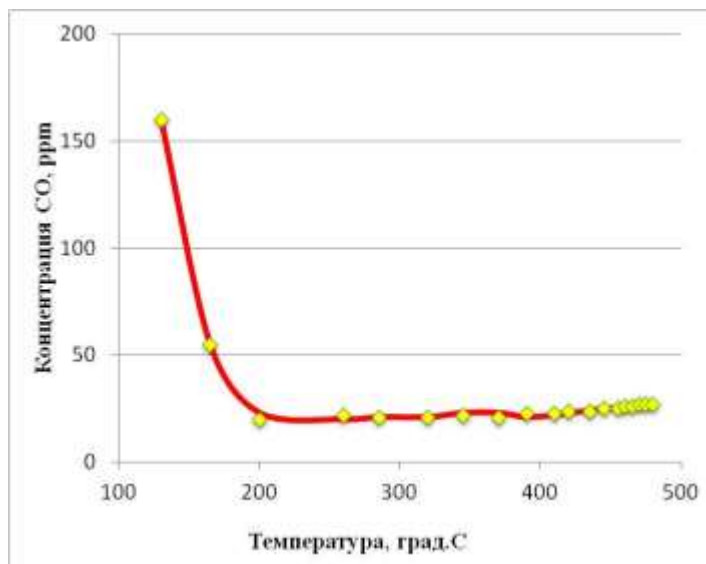
## Краткая техническая характеристика двигателя и окислительного нейтрализатора

Тип двигателя	4-тактный, дизельный с турбонаддувом
Число и расположение цилиндров	6, рядное
Рабочий объем, л	8,1
Номинальная мощность, кВт	$175 \times 2200 \text{ мин}^{-1}$
Размерность: диаметр x длина, мм	$267 \times 152,4$
Материал каталитического блока	Кордиерит
Геометрия ячеек	Квадратные
Плотность и число ячеек, яч./дюйм <sup>2</sup>	300
Ширина канала, мм	1,47
Толщина стенки канала, мм	0,19
Фронтальная площадь, см <sup>2</sup>	559
Объем, л	8,51

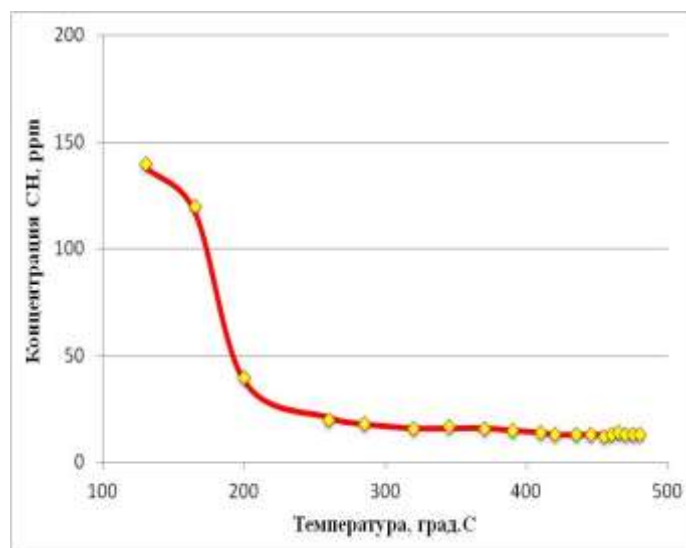
При моделировании в качестве начальных и граничных условий использовались опубликованные экспериментальные данные.

**Проверка модели.** Для проверки достоверности модели результаты моделирования дизельного окислительного нейтрализатора были сопоставлены с соответствующими экспериментальными данными [5].

Краткая техническая характеристика двигателя и окислительного нейтрализатора приведена в табл. 1.



**Рис. 1. Изменение концентрации CO в ОГ в зависимости от температуры окислительного катализатора при 1400 мин<sup>-1</sup>:**  
сплошная линия – результаты моделирования,  
отдельные точки – экспериментальные данные

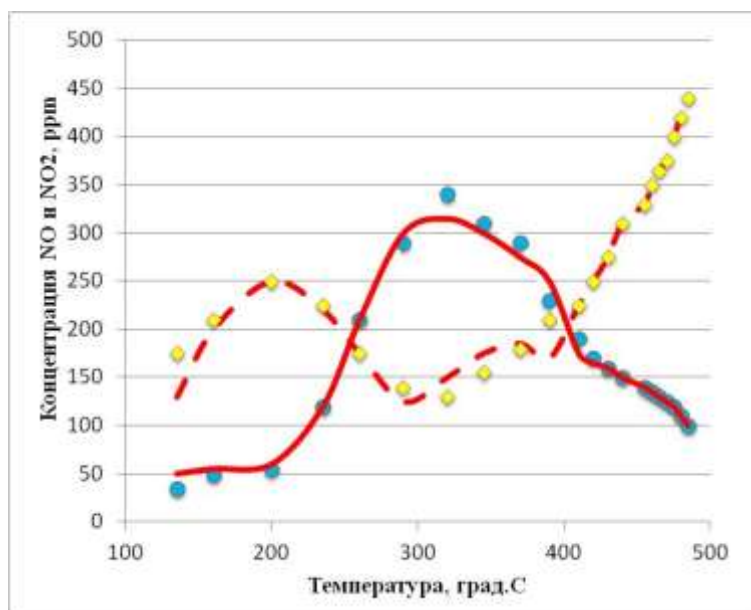


**Рис. 2. Изменение концентрации CH в ОГ в зависимости от температуры окислительного катализатора при 1400 мин<sup>-1</sup>:**  
сплошная линия – результаты моделирования, отдельные точки – экспериментальные данные

Испытания были выполнены на дизельном топливе с низким содержанием серы (~15 ppm) и предусматривали измерение концентрации CO, CH, NO и NO<sub>2</sub> в ОГ на различных установившихся скоростных и нагрузочных режимах. Указанные в таблице данные по

катализатору использовались при моделировании. В расчетах принималось, что теплопроводность кордиерита равна 1,255 Вт/мК, объемная плотность - 0,44 г/см<sup>3</sup>, удельная теплоемкость – 836,8 Дж/кгК.

На рис. 1–3 показано изменение концентрации в отработавших газах CO, CH, NO и NO<sub>2</sub> на выходе из дизельного окислительного катализатора в зависимости от температуры катализатора по данным экспериментального исследования и результатам моделирования.



**Рис. 3. Изменение концентрации NO и NO<sub>2</sub> в ОГ в зависимости от температуры окислительного катализатора при 1400 мин<sup>-1</sup>:**  
пунктирная линия – моделирование NO; сплошная линия – моделирование NO<sub>2</sub>;  
отдельные точки – экспериментальные данные

Из графиков видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными в диапазоне температур от 150 до 490°С. Приведенные результаты сравнительного исследования экологических характеристик подтверждают достоверность модели дизельного окислительного каталитического нейтрализатора.

Настоящая работа проводится при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### Библиографический список

1. **Панчишный, В.И.** Дизельные фильтры и фильтры-нейтрализаторы отработавших газов дизелей / В.И. Панчишный // Автомобильная промышленность. 2008. № 12.
2. **Панчишный, В.И.** Нейтрализаторы отработавших газов дизелей / В.И. Панчишный // Автомобильная промышленность. 2008. № 11.
3. Ferrari G., Piscaglia F., Onorati A. «1D Modeling of the Hydrodynamics and of the Regeneration Mechanism in Continuous Regenerating Traps», SAE Paper, № 2006-01-3011, 2006.
4. York A.P.E., Cox J. P., Watling T. C., Walker A. P., Bergeal D., Allansson R., Lavenius M. «Development and Validation of a One-Dimensional Computational Model of the Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter (CR-DPF) System», SAE Paper, № 2005-01-0954, 2005.
5. Triana A. P., Johnson J. H., Yang S. L., Baumgard K. J. «An Experimental and Numerical Study of the Performance Characteristics of the Diesel Oxidation Catalyst in a Continuously Regenerating Particulate Filter», SAE Paper, № 2003-01-3176, 2003.
6. Day E. G. W., Benjamin S. F., Roberts C. A. «Simulating Heat Transfer in Catalyst Substrates with Triangular and Sinusoidal Channels and the Effect of Oblique Inlet Flow», SAE Paper № 2000-01-0206, 2000.

7. **Каменев, В.Ф.** Конструктивное исполнение нейтрализатора отработавших газов и экологические показатели автомобиля / В.Ф. Каменев [и др.] // Автомобильная промышленность. 2007. № 1.
8. **Ипатов, А.А.** Автономные системы выработки тепловой и электрической энергии на биотопливе" / А.А. Ипатов [и др.] // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. № 3. С. 6–12.
9. **Ипатов, А.А.** "Разработка технологической схемы автономной системы с комбинированным тепло- и электроснабжением отдельно стоящих объектов с возможностью использования в качестве топлива продуктов переработки биомассы" / А.А. Ипатов [и др.] // Труды НАМИ / ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Вып. № 242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств: сб. науч. ст. – М., 2009. С. 85–95.
10. **Ипатов, А.А.** Разработка элементов автономной когенерационной установки, работающей на биотопливе / А.А. Ипатов [и др.] // Труды НАМИ / ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Вып. № 242: Комбинированные энергоустановки автотранспортных средств: сб. науч. ст. – М., 2009. С. 96–104.

*Дата поступления  
в редакцию 27.04.2012*

**V.L. Khimich, N.A. Khripach, L.Yu. Lezhnev, B.A. Papkin,  
F.A. Shustrov, D.A. Ivanov, V.I. Sonkin, I.A. Papkin**

### **SIMULATION OF PROMISING DIESEL OXIDATION CATALYST**

The purpose of this work is to develop and test models of prospective diesel oxidation catalytic converter. The one-dimensional oxidation model of the of CO, CH and NO<sub>2</sub> was considered to calculate emissions at the outlet from the diesel promising of oxidation catalyst. The model is based on the laws of conservation of mass, energy and chemicals in the oxidation catalyst and uses a simplified method of calculation of heterogeneous chemical reactions on the catalyst surface. Comparison of simulation results with experimental data confirms the validity of the model. The proposed model of the diesel oxidation catalyst based on the physical and chemical theories that describe the chemical kinetics and the characteristics of heat and mass transfer in a one-dimensional quasi-stationary formulation. The model takes into account: the convective heat and mass transfer from the exhaust gas to the catalyst surface, heterogeneous chemical reactions on the catalyst surface, heat rub into the environment and the thermal conductivity along the catalytic converter. The influence of homogeneous reactions in the gas phase is small and not considered. Exhaust gases are composed of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, and CH.

*Key words:* internal combustion engine, diesel engine, oxidation catalyst, chemical reactions.

УДК 347.79

В.П. Лобастов, Е.В. Зеличенко

**ИНТЕГРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАСТИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА  
В РАМКАХ СОТРУДНИЧЕСТВА РОССИИ И ЕК ООН**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлено исследование приоритетного направления в сфере водного транспорта, в частности, судов типа «река-море». Отмечены преимущества судов «река-море» плавания, на основании которых представлен документ относительно возможности разработки технических требований к судам данного типа. Изложены актуальность и методология разработки технических предписаний ЕК ООН к судам типа «река-море». Рассмотрены рекомендации по формированию предписаний, применимых к судам «река-море» плавания. Разобраны вопросы классификации судов, предназначенных для эксплуатации в ограниченных районах плавания в диапазоне волн  $h_{3\%}$  от 3,5 до 6,0 м. Приведены основные разделы предписаний и решение проблем выбора типа сцепного устройства и количества степеней свободы, которые сцепные устройства обеспечивают при соединении секций в толкаемый состав типа «река-море». Результатом данной статьи является объединение двух этапов главы 20В «Особые положения, применяемые к судам типа «река-море» плавания» в единый перечень требований.

*Ключевые слова:* Резолюция № 61, директива, глава 20В, суда «река-море» плавания, ЕК ООН, сцепные устройства.

**Развитие судоходства «река-море» – один из факторов  
интеграционного процесса «Россия-Европа»**

В условиях, когда для целого ряда европейских стран осуществление внешнеэкономических связей сдерживается из-за отсутствия производственно-технической базы морского транспорта, а переориентация внешнеторговых перевозок на железнодорожный транспорт ограничена рядом обстоятельств и в первую очередь необходимостью использования транспортных коммуникаций третьих стран, все большее участие в обеспечении внешнеторговых связей принимают суда «река-море» плавания.

Этому благоприятствует ряд факторов, важнейшими из которых являются:

- наличие у европейских стран крупных межбассейновых соединений, объединивших в единую систему глубоководные пути и создавших благоприятные предпосылки для эффективного обслуживания обширных территорий не только стран Западной Европы, но и России, Украины, Казахстана, Туркмении, Азербайджана и других стран с развитой обрабатывающей промышленностью, крупной и разнообразной сырьевой базой, многоотраслевым сельским хозяйством, которые обладают мощным потенциалом для развития внешнеэкономической деятельности;
- исключение перевалочных операций в устьевых портах и возможность в ряде случаев обеспечивать перевозки от «двери» отправителя до «двери» получателя, что сокращает сроки транспортировки и повышает сохранность грузов;
- наличие специфического и устойчивого рынка для этих судов – все возрастающие потребности в обеспечении мелкопартионных перевозок, возможность захода в мелководные порты, исключительная эффективность применения в прибрежном судоходстве, интенсивно развивающемся в Средиземноморье, Черном, Балтийском и Северном морях.

И именно это направление судоходства вызывает у Европейского союза наибольший интерес: ведь именно суда смешанного «река-море» плавания позволяют ускорить и реализовать интеграционные процессы внутреннего водного транспорта в формате Европа-Россия, необходимость которых очевидна.

Во-первых, внутренний водный транспорт является одним из самых экономичных видов транспорта.

Во-вторых, внутренний водный транспорт является экологически наиболее «чистым» видом транспорта.

В-третьих, внутренний водный транспорт удобен для доставки грузов в глубинные районы.

В-четвертых, внутренний водный транспорт чрезвычайно удобен при мульти- или интермодальных перевозках, особенно на конечном этапе доставки грузов потребителю.

Учитывая отмеченные преимущества судов смешанного «река-море» плавания, Российской Федерацией был представлен в ЕЭК ООН документ относительно возможности способов и методологии разработки технических требований к судам типа «река-море» [1].

Разработка предложений по техническим предписаниям ЕЭК ООН к судам «река-море» плавания для включения их в главу 20В Резолюции №61 «Рекомендации, касающиеся согласованных на европейском уровне технических предписаний, применимых к судам внутреннего плавания» [2] была поручена Российскому Речному Регистру (далее РРР).

Техническое руководство осуществляли В.Т. Огарков (Главное управление РРР), В.П. Лобастов (Верхне-Волжский филиал РРР).

Техническое сопровождение проводили В.Ю. Иванова и В.В. Воронцов (Главное управление РРР).

Активное участие в разработке предложений по техническим предписаниям принимали специалисты нижегородской корабельной школы П.И. Бажан (Центр разработки Правил РРР), В.А. Зуев (НГТУ им. Р.Е. Алексеева).

### О разработке технических предписаний экз оон к судам типа «река-море»

Варианты транспортных систем для перевозки грузов в судах «река-море» плавания представлены на рис. 1.

Каждая из этих систем, очевидно, имеет свои преимущества и недостатки и при определенных условиях эксплуатации может оказаться наиболее эффективной.

В настоящее время приоритетное направление было отдано самоходным судам и толкаемым составам «река-море» плавания. Применительно к данному направлению, формирование редакции Главы 20В «Особые положения, применяемые к судам типа «река-море» плавания» выполнялось в два этапа:

- на первом этапе работа велась применительно к грузовым судам (сухогрузным и наливным), пассажирским судам, буксирам и баржам (сухогрузным и наливным);
- на втором этапе работа выполнялась применительно к толкаемым составам «река-море» плавания. Этой работе предшествовало обоснование выбора сцепного устройства и количества степеней свободы, которые сцепные устройства обеспечивают при соединении состава.



Рис. 1. Варианты транспортных систем для перевозки грузов в судах смешанного «река-море» плавания

**Общие положения**

Для целей главы 20В устанавливаются следующие условия и зоны плавания судов в море:

i) ограниченная зона между портами одной страны, в которой допускаются к плаванию суда внутреннего плавания с эксплуатационными ограничениями по временам года и волнению при выполнении специальных требований администрации и/или признанного классификационного общества к мореходным характеристикам, устойчивости, конструкции корпуса, механизмам и электрооборудованию, навигационному оборудованию и средствам связи.

ii) зона RS 2,0 (высота волны до 2,0 м (здесь и далее высота волны означает высоту волны 3%-ной обеспеченности)): морские районы в конкретных географических границах бассейнов, в которые допускаются суда «река-море» плавания с ограничениями по временам года;

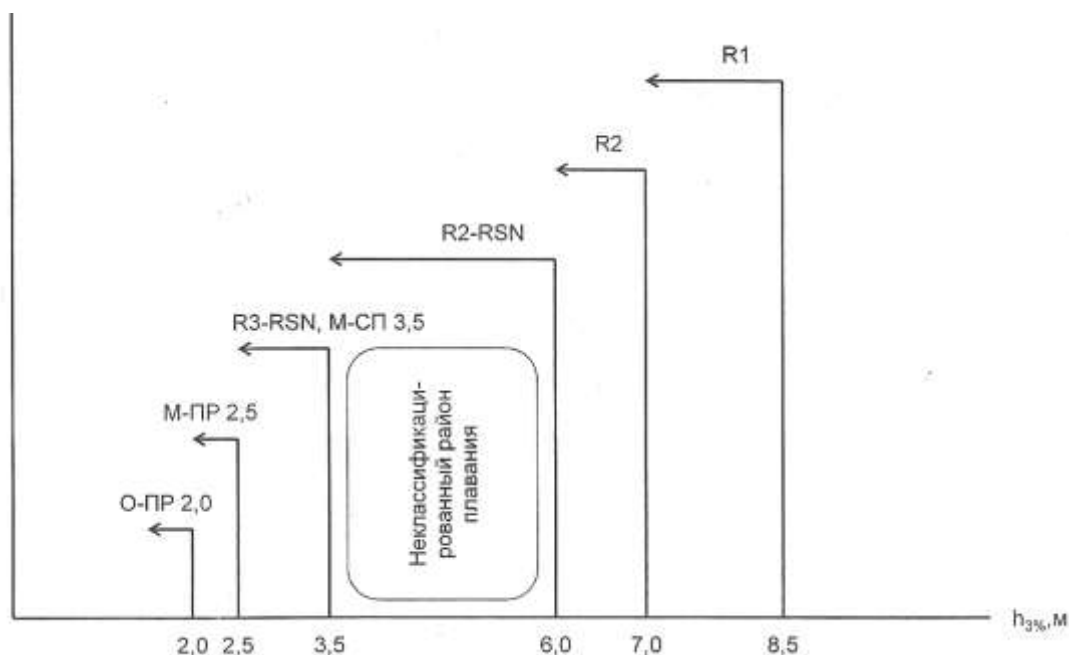
iii) зона RS 3,0 (высота волны до 3,0 м): морские районы в конкретных

iv) географических границах бассейнов, в которые допускаются суда «река-море» плавания с ограничениями по временам года;

v) зона RS 3,5 (высота волны до 3,5 м): морские районы в конкретных географических границах бассейнов, в которые допускаются суда «река-море» плавания с ограничениями по временам года;

vi) зона RS 4,5 (высота волны до 4,5 м): морские районы, в которые допускаются суда «река-море» плавания: в закрытых морях при удалении от мест убежища до 100 миль (расстояние между местами убежища до 200 миль), в открытых морях при удалении от мест убежища до 50 миль (расстояние между местами убежища до 100 миль);

vii) зона RS 6,0 (высота волны до 6,0 м): морские районы, в которые допускаются суда «река-море» плавания: в закрытых морях при удалении от мест убежища до 100 миль (расстояние между местами убежища до 200 миль), в открытых морях при удалении от мест убежища до 50 миль (расстояние между местами убежища до 100 миль).



**Рис. 2. Ограничения районов плавания по классификации Российского Морского Регистра судоходства и РРР**

При подготовке предложений было учтено, что районы плавания, характеризующиеся волнением в диапазоне  $h_{3\%}$  от 3,5 до 6,0 м, оказались неклассифицированными (рис. 2). Если учесть, что использование судов класса R2-RSN на смешанных (река-море) перевоз-



ках из-за значительной металлоемкости корпуса судна экономически не всегда оправдано, а использование судов класса «3-RSN, «М-СП 3,5» из-за ограничений географии плавания, обусловленных расстояниями между портами убежищ, для судовладельцев экономически не всегда привлекательно, было принято решение проработать вопросы классификации судов, предназначенных для эксплуатации в ограниченных районах плавания в диапазоне волн  $h_{3\%}$  от 3,5 до 6,0 м.

По результатам разработок были предложены зоны RS 6,0 и RS 4,5. География морских районов для зон RS 2,0, RS 3,0 и RS 3,5 была рекомендована применительно к судам класса О-ПР 2,0, М-ПР 2,5 и М-СП 3,5 согласно классификации Правил РРР [3].

Предполагаемую географию морских районов применительно к условиям зон RS 6,0 и RS 4,5 с ограничениями по допустимому волнению  $h_{3\%} \leq 6,0$  м,  $h_{3\%} \leq 4,5$  м рекомендуется назначать без сезонных ограничений и при нормируемом удалении судна от мест убежища до 100 миль в закрытых морях (расстояние между местами убежища до 200 миль) и до 50 миль в открытых морях (расстояние между местами убежища до 100 миль), как это предусмотрено в Правилах Российского Морского Регистра судоходства (далее РМРС) [4].

Специальные технические предписания для судов зоны RS 6,0 в части эксплуатационных ограничений по временам года и волнению (пункт 20В-1.1.2 (i)), по мореходным характеристикам, конструкции корпуса (раздел 20В-3), остойчивости (разделы 20В-3.4, 20В-3.5), деления на отсеки (раздел 20В-3.4), судовых устройств (разделы 20В-5-3, 20В-5.4) рекомендовать с учетом требований Правил классификации и постройки морских судов РМРС к судам класса «R2-RSN» и требований международных конвенций.

Специальные технические предписания для судов внутреннего плавания в части эксплуатационных ограничений по временам года и волнению, по мореходным характеристикам, остойчивости, непотопляемости, конструкции корпуса, механизмов и электрооборудования, навигационному оборудованию и средствам связи (пункт 20В-1.1.2 (vii)) рекомендуется назначить в соответствии с требованиями и правилами администрации и/или признанного классификационного общества (пункт 20В-1.1.4), например, в Бельгии на основании Королевского Указа о судах внутреннего плавания, используемых также для каботажного плавания.

### ***Прочность***

Уровень требований к прочности корпусов судов «река-море» плавания непосредственно связан с волновыми условиями плавания и определяется основным символом класса судна. Вопрос обеспечения прочности морских судов Конвенция СОЛАС-74 [5] относит к компетенции признанной администрацией классификационного общества (правило 3-1 части А-1 «Устройство судов»).

В Резолюции № 61 ЕЭК ООН вопросы прочности судов внутреннего плавания также отнесены к компетенции администрации, поэтому и для судов «река-море» плавания в Главе 20В использован такой же подход в части обеспечения прочности.

### ***Остойчивость***

Рекомендации к остойчивости судов «река-море» плавания разработаны на основе действующих Правил РРР, РМРС и соответствуют Кодексу остойчивости неповрежденных судов всех типов, принятом в 1993 году [6].

### ***Деление на отсеки***

Рекомендации раздела «Деление на отсеки» гармонизированы с Правилами РРР, РМРС для судов «река-море» плавания и требованиям Международной конвенции (СОЛАС-74) не противоречат.

### ***Критерии для проверки остойчивости судов***

Рекомендации по основному критерию (критерию погоды) гармонизированы с Кодексом остойчивости неповрежденных судов всех типов и с учетом коррекций, выполненных

доктором технических наук, профессором В.А. Зуевым, уточнены по значению давления ветра и коэффициентом определения амплитуды качки, а также по критерию ускорения.

*Коррекция 1.* Принятая в пункте 20В-3.5.2.2 Рекомендаций формула для определения плеча ветрового кренящего момента соответствует формуле, приведенной в Кодексе остойчивости неповрежденных судов всех типов для судов неограниченного района плавания. Для судов ограниченного района плавания статическое давление ветра  $P_v$  в Правилах классификационных обществ, например, в Правилах РМРС и РРР принимается меньших значений, что требует введение коррекции в формулу.

В частности:

i) по Кодексу остойчивости неповрежденных судов всех типов статическое давление ветра  $P_v$  принимается  $P_v = 504$  Па, с примечанием, что «величина  $P_v$ , применяемая для судов в ограниченном плавании, может быть уменьшена с одобрения администрации»;

ii) По Правилам РМРС:

- для судов неограниченного района плавания  $P_v = 504$  Па;

- для судов I ограниченного района плавания (высота расчетной волны до 8,0 м)  $P_v = 353$  Па;

- для судов ограниченного района плавания II, II-СП, III-СП (высота расчетной волны до 7,0 ÷ 3,5 м)  $P_v = 252$  Па;

iii) По Правилам РРР для пассажирских судов класса М-СП (RS 3,5)  $P_v = 252$  Па.

Для судов остальных типов (непассажирских) Правила РРР рекомендуют для судов «река-море» плавания М-СП (RS 3,5), М-ПР (RS 3,0) и О-ПР (RS 2,0) условное расчетное давление ветра принимать, как для судов внутреннего плавания класса «М 3,0» и «О 2,0» соответственно, при этом давление ветра принимается в зависимости от возвышения центра парусности.

При изменениях центра парусности от 0,5 до 6,0 м и более давление ветра принимается:

- от 177 до 324 Па для судов класса «М 3,0» (среднее значение  $P_v = 251$  Па);

- от 157 до 304 Па для судов класса «О 2,0» (среднее значение  $P_v = 231$  Па).

Принятая в Правилах РРР зависимость условного расчетного давления ветра от возвышения центра парусности является физически обоснованной и справедливой для динамического давления ветра. В Кодексе остойчивости неповрежденных судов всех типов речь идет о статическом давлении ветра, а динамика («порыв ветра») учитывается повышающим коэффициентом 1,5 при определении плеча кренящего момента, что нашло полное отражение в определении ветрового кренящего момента в Рекомендациях.

На основании изложенного в коррекции значение  $P_v$  принято равным 252 Па, вне зависимости от возвышения центра парусности.

*Коррекция 2.* Значения коэффициента  $S$  для определения амплитуды качки  $\theta$ , согласно пункту 20В-3.5.2.3 принимались с учетом следующих положений:

i) согласно Кодексу остойчивости неповрежденных судов всех типов для судов неограниченного района плавания в зависимости от периода бортовой качки судна  $\tau$  значения  $S$  имеют величины, представленные в табл. 1;

Таблица 1

$\tau$ , с	6 и менее	7	8	12	14	16	18	20 и более
$S$	0,100	0,098	0,093	0,065	0,053	0,044	0,038	0,035

ii) в Правилах РМРС эта таблица, полностью соответствующая Кодексу остойчивости неповрежденных судов всех типов, дополняется значениями  $S$  для судов ограниченного района плавания I, II, II-СП, III-СП (высота расчетной волны до 8,0 ÷ 3,5 м), которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\tau$ , с	5 и менее	6	7	8	10	12	14 и более
$S$	0,100	0,093	0,083	0,073	0,053	0,040	0,035

Значения коэффициента  $S$ , принятые в Правилах РРР для пассажирских судов класса «М-СП» (RS 3,5), полностью соответствуют табл. 2.

На основании данного анализа значения  $S$ , приведенные в табл. 2, принимаются для судов «река-море» плавания зон RS 4,5 и RS 3,5.

Для судов «река-море» плавания других типов и зон, у которых расчетная высота волны до 3,0 м и менее, значения  $S$  могут быть уменьшены с одобрения администрации и/или классификационного общества, что нашло свое отражение в примечании к табл. 20В-3.5.2.3.

*Коррекция 3.* В соответствии с Правилами классификационных обществ остойчивость судов, перевозящих навалочные грузы, должна проверяться по критерию ускорения  $k^*$ .

$$k^* = \frac{0,3}{a_{\text{расч}}} \geq 1,0, \quad (1)$$

где  $a_{\text{расч}}$  – расчетное ускорение в долях  $g$  (ускорения свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ).

Норма критерия ускорения имеется и в Правилах РМРС, и в Правилах РРР, которая распространяется на все суда «река-море» плавания. Структура формулы для определения расчетного ускорения в Правилах РРР представляется достаточно обоснованной и взята за основу:

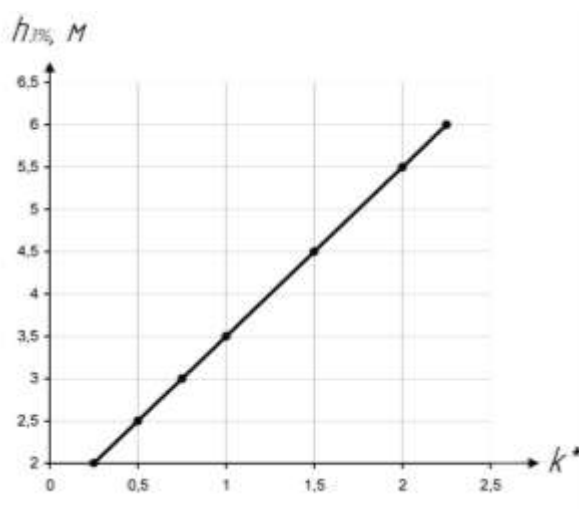
$$a_{\text{расч}} = 1,1 \cdot 10^{-3} B m^2 \theta_r. \quad (2)$$

В тех случаях, когда  $k^* < 1,0$ , по обоснованному представлению судовладельца администрация может допустить эксплуатацию судна при ограниченной высоте волны. При этом высота волны 3 %-ной обеспеченности определяется в зависимости от критерия  $k^*$  по табл. 20В-3.5.3.1. Значения табл. 20В-3.5.3.1 приняты из предпосылки линейной зависимости  $h$  от  $k^*$ , приведенной на графике рис. 3.

В основу построения графика положены значения  $k^* < 1$  по назначению допустимой высоты волны 3 %-ной обеспеченности в соответствии с Правилами РРР (табл. 3).

Таблица 3

$k^*$	1,0 и более	1,0÷0,50	0,50 и менее
$h_{3\%}$ , м	3,5	3,0	2,5

Рис. 3. График зависимости высоты волны от расчетных значений  $k^*$

### ***Противопожарная защита***

В качестве требований по обеспечению конструктивной противопожарной защиты к судам «река-море» плавания включено предписание о выполнении требований СОЛАС-74 к судам, осуществляющим как каботажные, так и международные рейсы (пункт 20В-3А.1.1).

### ***Надводный борт и грузовая марка***

Высота наименьшего надводного борта судов для плавания в море, не совершающих международных рейсов, для плавания в зонах RS 3,5 (кроме пассажирских), RS 3,0, RS 2,0, назначается в соответствии с требованиями администрации и/или признанного классификационного общества.

Высота наименьшего летнего надводного борта судов зон RS 6,0, RS 4,5, RS 3,5 (пассажирские), независимо от вида рейса (каботажный или международный), должна назначаться в соответствии с требованиями Международной конвенции о грузовой марке (КТМ 66/88) [7].

### ***Якорные устройства***

Предписания раздела для судов классов RS 2,0, RS 3,0, RS 3,5, RS 4,5 и RS 6,0 составлены по результатам анализа Правил РРР, Правил РМРС, Резолюции ЕЭК ООН № 61, Правил освидетельствования судов на Рейне, Конвенции СОЛАС-74 с поправками, Конвенции МАРПОЛ, выполненного доктором технических наук, профессором П.И. Бажаном, в зависимости от характеристики снабжения.

Предлагается ряд формул для определения суммарной массы носовых якорей (пункт 20В-5.3.5) и суммарной длины якорных цепей (пункт 20В-5.3.6). Поскольку данные формулы предлагаются впервые, то для их обоснования были выполнены тестовые расчеты. Сходимость полученных результатов составила от 0,3 до 0,9 %.

### **Обоснование выбора типа сцепного устройства и количества степеней свободы, которые сцепные устройства обеспечивают при соединении секций в толкаемый состав**

Главной причиной, которая долго сдерживала развитие морских и океанских перевозок грузов толкаемыми составами, было отсутствие достаточно надежного сцепного устройства толкача и баржи. Из большого количества предложенных и запатентованных сцепных устройств в условиях эксплуатации нашло применение, проверено практикой и продолжает внедряться ограниченное число сцепов.

Однако, как показали данные сравнительной оценки результатов испытаний моделей толкаемых составов морского, «река-море» и внутреннего плавания, составы «река-море» плавания имеют специфические особенности (по соотношению главных размерений, значениям грузоподъемности осадке, взаимодействию толкача и баржи при плавании на волнении и др.), которые требуют совершенствования и доработки сцепных устройств применительно к данному типу толкаемых составов.

Все сцепные устройства, успешно применяющиеся на реках и озерах, оказались непригодными в морских условиях. Они быстро разрушались из-за несинхронности колебаний кормы баржи и соединенной с ней носовой части толкача во время килевой качки даже на небольшом волнении.

Схема классификации сцепных устройств толкаемых составов по различным отличительным признакам приведена на рис. 4.

К составам с врезным упором относятся составы, в которых толкач на определенную длину входит в кормовой вырез баржи и там счаливается с ней. К составам с транцевым упором относятся составы, в которых корма толкаемой баржи выполнена без выреза для входа толкача, при этом толкание осуществляется соответствующими упорами, выполненными как составной элемент сцепного устройства.

К настоящему времени разработаны и проверены практикой оба типа толкаемых составов. С характерными примерами конструкций сцепных устройств толкаемых составов с врезным и транцевым упорами можно познакомиться на примере ряда систем, перечисленных далее.



Рис. 4. Схема классификации сцепных устройств толкаемых судов

Все сцепные устройства, в зависимости от того, какой тип соединения они образуют, можно разделить на три основные группы. За основу такого разделения сцепных устройств на группы принято количество степеней свободы, которое они (сцепные устройства) обеспечивают при соединении. Первая группа сцепов образует неподвижное соединение, при котором толкач после счаливания с баржей образует единое конструктивное целое, исключаяющее всякое взаимное перемещение обеих секций состава относительно друг друга. Такие сцепные устройства применены на толкаемых составах систем T.B.S., Mitsui T.B.S., Murviker, Catug и др. Вторая группа сцепов образует ограниченно-подвижное соединение, при котором толкач после счаливания с баржей имеет возможность перемещаться относительно баржи с одной или двумя степенями свободы (килевая или килевая и вертикальная качки).

В развитии сцепов с ограниченно-подвижным типом соединения наметились два различных направления, которые по названиям основных деталей узлов сцепа известны как шарнирное и швартовно-кранцевое соединение. Наибольшее развитие получила шарнирная система счаливания. В настоящее время широко известны системы Artubar, Fist Joiut, Articouple. Швартовно-кранцевое сцепное устройство, являясь одним из простых видов устройств, не нашло широкого распространения, так как составы с этой системой счала могут, по мнению специалистов, плавать в основном в закрытых морях или на небольшом удалении от берега. Швартовно-кранцевые сцепные устройства применены на толкаемых составах бельгийских владельцев и составах японской фирмы Mitsui Zosen.

Третья группа сцепов образует подвижное соединение, при котором толкач после счаливания с баржей имеет возможность перемещаться относительно баржи с тремя степенями свободы (бортовая, килевая и вертикальная качки) или с четырьмя степенями свободы (бортовая, килевая, вертикальная качки и относительные поперечные перемещения по оси движения). Примером гибкого соединения толкача и баржи может служить система Seebeck, разработанная германской фирмой Weser.

Из двух наиболее надежных и перспективных типов сцепного устройства (неподвиж-

ный или ограниченно-подвижный) предпочтительным для мелкосидящих толкаемых составов «река–море» плавания зон RS 2,0, RS 3,0, RS 3,5, RS 4,5 следует считать ограниченно-подвижный (шарнирный) сцеп, позволяющий иметь одну степень свободы (килевую качку) при плавании на волнении и, при необходимости, две степени свободы (килевая и вертикальная качки) при плавании на тихой воде.

Для толкаемых составов «река–море» плавания зоны RS 6,0 наиболее перспективным может оказаться неподвижный тип соединения судов в состав.

По результатам обоснования выбора типа сцепного устройства в специальные требования раздела 20B-8 для толкаемых «река–море» составов включены составы с врезным и транцевым упорами, имеющими ограниченно–подвижное или неподвижное соединения.

Разработаны отдельные требования к конструкции толкача и баржи при выборе ледовых подкреплений, мощности главных механизмов, сцепного, рулевого, якорного и швартовного устройств.

Рабочая группа по внутреннему водному транспорту ЕЭК ООН одобрила проект главы 20B «Особые положения, применяемые к судам «река–море» плавания» и рекомендовала представить официальное предложение по проекту главы 20B к 55-й сессии Комитета по внутреннему транспорту ЕЭК ООН [8].

#### Библиографический список

1. Документ ЕЭК ООН: ECE/TRANS/SC.3/2006/8 «О разработке технических предписаний ЕЭК ООН к судам типа «река–море» // 50-я сессия ЕЭК ООН, Женева. 11-13 октября, 2006.
2. Резолюции №61 «Рекомендации, касающиеся согласованных на европейском уровне технических предписаний, применимых к судам внутреннего плавания» // ECE/TRANS/SC.3/172 – Нью Йорк, Женева, 2006. 234 с.
3. Положение о классификации судов внутреннего и смешанного «река–море» плавания // Российский Речной Регистр. – М.: «По Волге», 2008. Т. 1. – 272 с.
4. Правила классификации и постройки морских судов // Российский морской регистр судоходства. – СПб: «Российский морской регистр судоходства», 2008. Т. 1. – 500 с.
5. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС-74) // Лондон, 1974. 976 с.
6. Кодекс остойчивости неповрежденных судов всех типов // Резолюция А.749(18) / 1993.
7. Конвенция о грузовой марке (КГМ 66/88) // Лондон, 1966. 270 с.
8. Документ ЕЭК ООН: ECE/TRANS/SC.3/2011/CRP.2.

*Дата поступления  
в редакцию 20.04.2012*

**V. Lobastov, E. Zelichenko**

### **INTEGRATION PROCESSES IN WATER TRANSPORT IN THE COOPERATION OF RUSSIA AND UN EC**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

The aim of this work is to research the priority direction in the field of water transport, in particular, the “river-sea” navigation vessels. On the basis of the advantages of “river-sea” vessels was presented document concerning the possibility of developing technical regulations for vessels of this type. The relevance and methodology of the technical requirements of the UN EC to “river-sea” vessels are stated in the work. The recommendations to forming requirements for «river-sea» vessels are considered. The questions of classification of vessels for operation in confined navigation areas in the wavelength range h3% from 3.5 to 6.0 m are analyzed. The main sections of regulations and solving of problems of the selection the type of coupling device and the quantity of degrees of freedom, which the coupling devices provide during connection sections in a “river-sea” pushed convoy. The result of this article is the integration of two stages of chapter 20B “Special provisions applicable to river-sea navigation vessels” in a single list of requirements.

*Key words:* Resolution №61, Directive, Chapter 20B, “river-sea” vessels, UN EC, coupling devices.

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

С.М. Дмитриев<sup>1</sup>, А.С. Плехов<sup>2</sup>, В.Г. Титов<sup>1</sup>, Д.Ю. Титов<sup>1</sup>, С.Н. Яшин<sup>1</sup>

### АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ ГАРМОНИК В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ООО «Энергосбережение»<sup>2</sup>

Предлагаются энергосберегающие системы электрооборудования для предприятий промышленности и жилищно-коммунального хозяйства. Обсуждаются комплексные технические решения с использованием компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока частотно-управляемого электропривода. Обсуждаются вопросы синтеза алгоритмов управления работой активных фильтров гармоник. Предложены технические решения для их реализации.

*Ключевые слова:* компенсационный преобразователь частоты, компенсация гармонических искажений, формирование сигналов управления активными фильтрами гармоник.

Принципиальная однолинейная схема узла нагрузки распределительной сети электроснабжения приведена на рис. 1. На ней представлены условные группы потребителей  $Z_{i/i=1,\dots,5}$ , которые соответственно характеризуются:

- избыточностью потребляемой мощности;
- потреблением реактивной мощности;
- наличием нелинейностей – генерацией высших гармоник;
- несимметрией нагрузок;
- разным качеством электроснабжения.

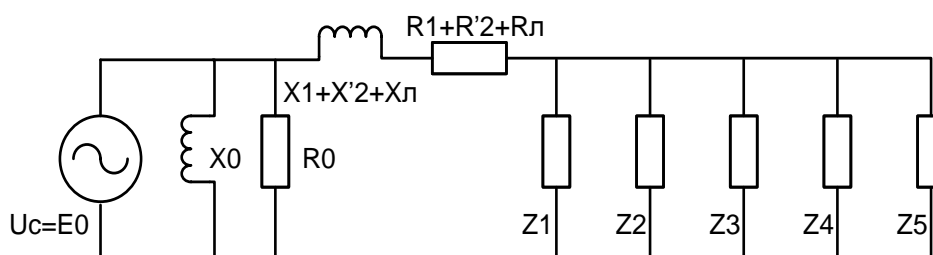


Рис. 1. Принципиальная однолинейная схема узла нагрузки

На рис. 1 использованы обозначения:  $U_c = E0$  – принимаемое неизменным напряжение питающей сети, совпадающее с э.д.с. трансформатора в Г-образной схеме замещения;  $X0, R0$  – индуктивное и активное сопротивление контура намагничивания;  $X1, R1; X'2, R'2; Xл, Rл$  – индуктивные сопротивления рассеяния и активные сопротивления соответственно первичной, вторичной обмоток трансформатора и линии (токопровода);  $Z_{i/i=1,\dots,5}$  – комплексные сопротивления условных нагрузок. Эти параметры позволяют известными методами определить ущерб от потребления электроэнергии ненадлежащего качества, вызванный особенностями условных нагрузок.

Нивелировать перечисленные недостатки нагрузок потребителей возможно посредством применения средств регулируемого интеллектуального электропривода, в частности, компенсационных преобразователей [1].

Реактивная мощность оказывает отрицательные воздействия на сеть, выражающиеся в увеличении тока нагрузки, что приводит к росту потерь, а также к увеличению оплаты за потребленную электроэнергию.

Применение энергосберегающей технологии управления компенсационным преобразователем частоты открывает широкие возможности для применения частотно-управляемого электропривода переменного тока благодаря его быстрой окупаемости за счет экономии потребляемой электроэнергии при компенсации реактивной мощности и других известных свойств энергосберегающих компенсационных преобразователей электроэнергии [1]. Однако такие преобразователи нагружают сеть токами высших гармоник, которые необходимо учитывать как при расчете необходимой установленной мощности, так и при формировании сигналов, управляющих ключевыми приборами преобразователя [2].

Развитие современных технологий полупроводников ведет к росту количества электроустановок, управляемых тиристорными и транзисторными коммутаторами, регуляторами напряжения и конверторами. Однако конверторы увеличивают значение индуктивной реактивной мощности и ухудшают форму кривой сетевого напряжения за счет высших гармоник тока.

Но и при синусоидальном периодическом изменении активной проводимости нагрузки появляются «неканонические» гармоники [3]. Например, если мощность потребителя регулируется с частотой  $\omega_p$ , которая значительно меньше частоты сети  $\omega$ , то при этом для сети изменяется проводимость нагрузки  $Y(t)$  по отношению к ее среднему значению  $Y_0$ :

$$Y(t) = Y_0[1 + \sin(\omega_p t)] \quad | \quad \omega_p \ll \omega,$$

тогда при активной мощности, потребляемой такой нагрузкой,  $P = 3U_c^2 Y_0$  из сети будет потребляться полная мощность  $S = 3U_c I = 3 \cdot 1,22 \cdot U_c^2 Y_0$ . То есть нестационарные процессы даже в линейных цепях приводят к появлению несинусоидальных токов, которые содержат дополнительные гармоники, с частотой некратной частоте сети.

Эти помехи в питающей сети ведут к повреждениям и ошибочным включениям оборудования и приборов:

- появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях;
- затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов, которые могут длительно работать при перегрузке их токами высших гармоник (ВГ) не более, чем на 30%;
- сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов;
- ухудшается работа устройств автоматики, телемеханики и связи.

При работе асинхронного электродвигателя в условиях несинусоидального напряжения несколько снижаются его коэффициент мощности и вращающий момент на валу. При этом можно назвать катастрофическим влияние ВГ на изоляцию электрических машин и конденсаторов, измерительные приборы и устройства автоматики, а также на системы управления вентилями преобразователями, вызывающее автоколебания в таких системах. Кроме того, учет электроэнергии при несинусоидальных режимах сопряжен со значительными погрешностями, например, при нелинейных нагрузках происходит «переучет» электроэнергии: положительные погрешности измерения энергии, потребляемой тиристорными преобразователями, могут достигать 4–6%. Исследования показывают, что использование электронных счетчиков не решает проблему измерений энергии при несинусоидальных режимах [4].

Стандартом России ГОСТ 13109-97 нормируются значение коэффициента несину-



соидальности  $k_{\text{НСУ}}$  по напряжению и отдельных гармоник напряжения в электрических сетях трехфазного и однофазного тока общего назначения.

Активные фильтры гармоник в составе преобразователей частоты позволяют снизить отрицательные воздействия путем компенсации как реактивной мощности, так и гармонических составляющих, как высших, так и неканонических.

Алгоритмы управления активным фильтром гармоник (АФГ) можно разделить на две группы:

- 1) алгоритмы, основанные на преобразованиях во временной области;
- 2) алгоритмы, основанные на преобразованиях в частотной области.

К первой группе относят алгоритмы, основанные на теории мгновенной мощности. Одна из таких теорий –  $p$ - $q$  теория мгновенной мощности [5]. Эта теория основана на преобразовании мгновенных значений электрических переменных в фазах питающей сети к трем ортогональным осям  $\alpha\beta 0$ .  $P$ - $Q$  теория позволяет преобразовать токи и напряжения из  $abc$  координат к  $\alpha\beta 0$  координатам и далее определить мгновенную мощность в этих координатах.

Структурная схема (алгоритм) расчета компенсационного тока основанная на  $p$ - $q$  теории мгновенной мощности, приведена на рис. 2.

Приведем описание блоков структурной схемы:

1. Блок СТ – прямое преобразование Кларка:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

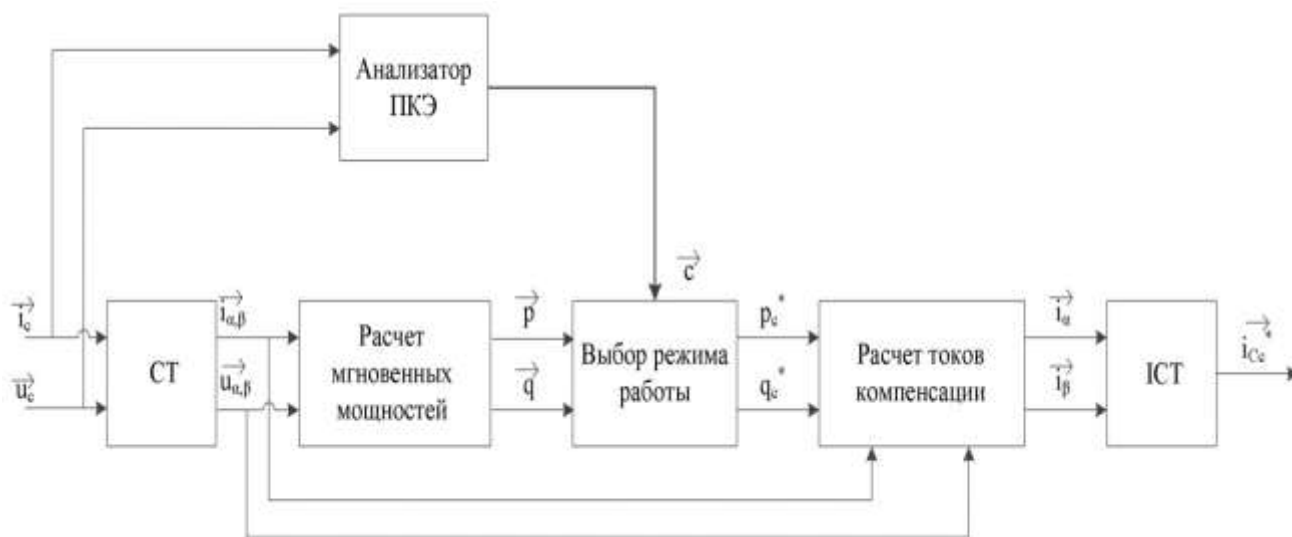


Рис. 2. Структурная схема (алгоритм) расчета компенсационного тока, основанная на  $p$ - $q$  теории мгновенной мощности

2. Блок расчета мгновенных мощностей:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

3. Блок выбора режима работы в зависимости от управляющего сигнала с блока

«Анализатор ПКЭ» (ПКЭ – параметры качества электроэнергии) выбирает мощности для компенсации:  $\tilde{p}$ ,  $\bar{p}$ ,  $\tilde{q}$  или  $\bar{q}$ ,

где  $\tilde{p}$  – колебательная составляющая активной мощности;  
 $\bar{p}$  – постоянная составляющая активной мощности;  
 $\tilde{q}$  – колебательная составляющая мнимой мощности;  
 $\bar{q}$  – постоянная составляющая мнимой мощности.

Из 14 возможных комбинаций для компенсации мощностей подходящими являются три:

- $\tilde{p} + \tilde{q}$  – компенсация ВГ;
- $\tilde{q} + \bar{q}$  – компенсация реактивной мощности;
- $\tilde{p} + \tilde{q} + \bar{q}$  – компенсация ВГ и реактивной мощности.

4. Блок расчета токов компенсации:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c^* \\ q_c^* \end{bmatrix}. \quad (4)$$

5. Блок ИСТ – обратное преобразование Кларка:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Модель, выполненная в среде Matlab Simulink, реализующая данный алгоритм расчета тока компенсации АФГ, приведена на рис. 3.

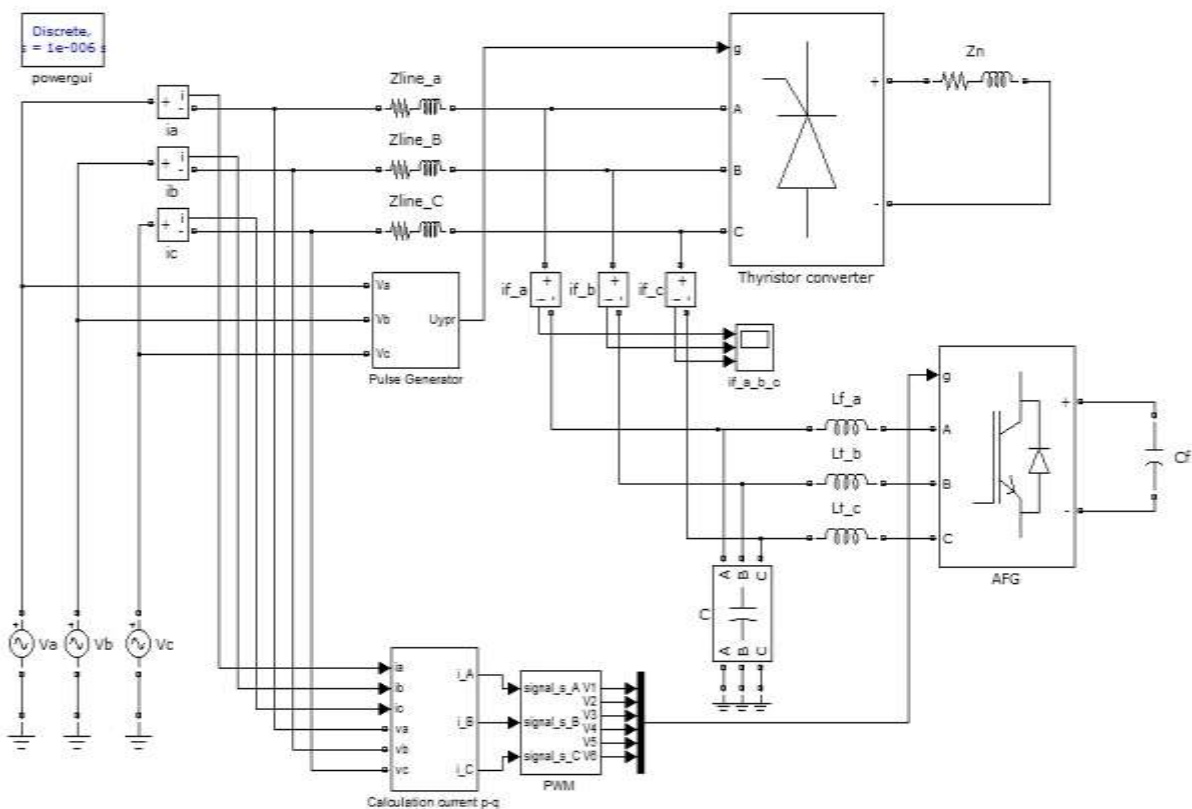
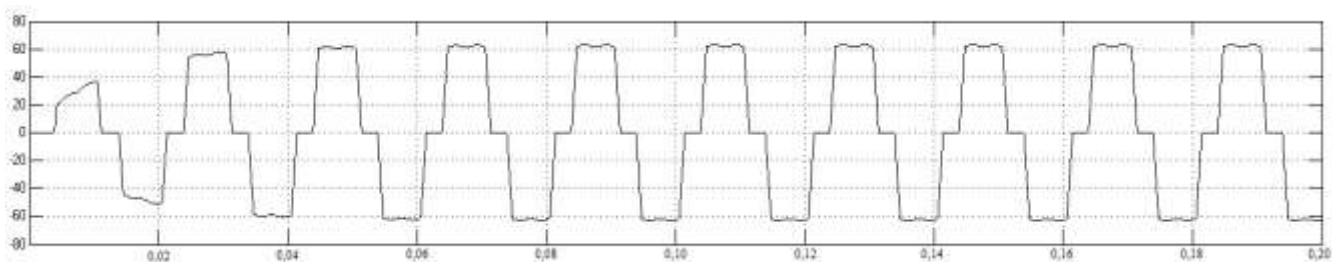


Рис. 3. Модель «активный фильтр гармоник – сеть» с блоком расчета тока компенсации, основанного на теории мгновенной мощности

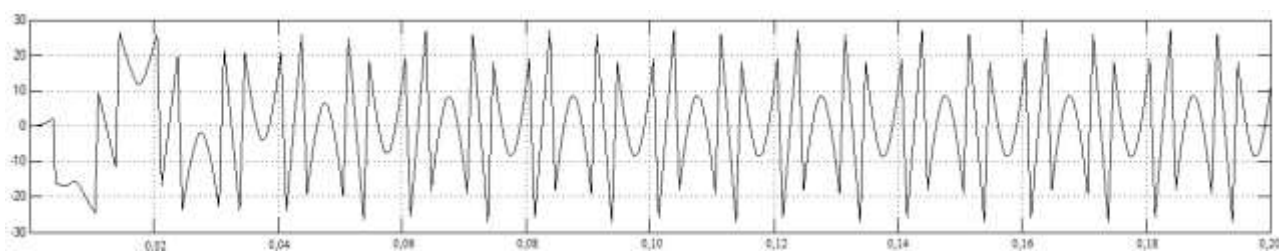
На рис. 4 приведены осциллограммы токов в фазе А без компенсации искажений.



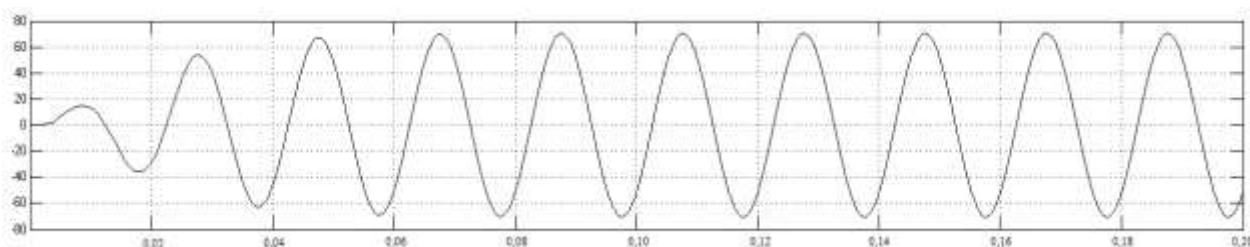
**Рис. 4. Ток фазы А без компенсации**

Рассмотрим результаты моделирования режимов работы схемы при формировании токов компенсации посредством алгоритма, основанного на  $p-q$  теории, приведенные на рис. 5 – рис. 10.

1. Режим компенсации ВГ.

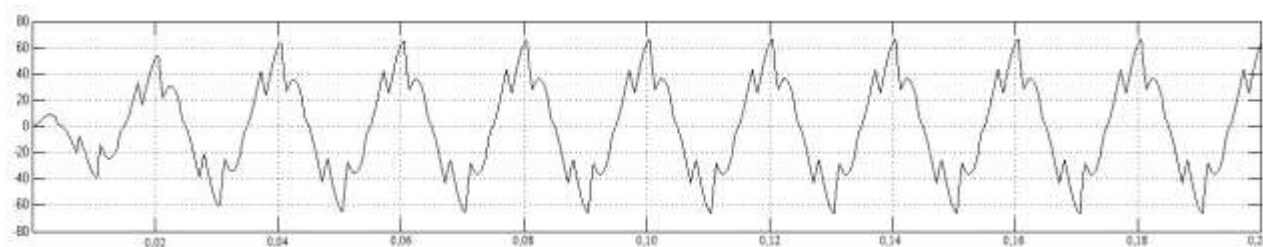


**Рис. 5. Рассчитанный по  $p-q$  теории ток компенсации для фазы А**

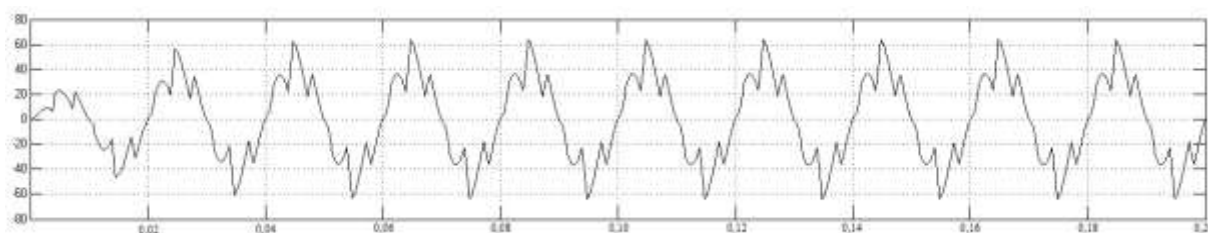


**Рис. 6. Ток в фазе А после компенсации высших гармонических**

2. Режим компенсации реактивной мощности.



**Рис. 7. Рассчитанный по  $p-q$  теории ток компенсации для фазы А**



**Рис. 8. Ток в фазе А в режиме компенсации реактивной мощности**

## 3. Комплексный режим компенсации реактивной мощности и ВГ.

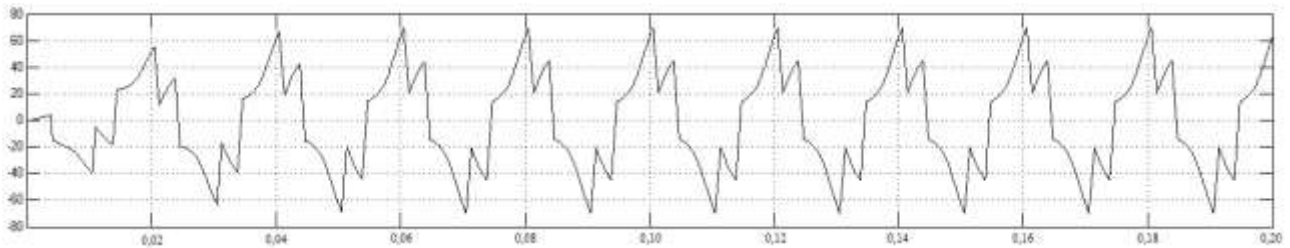
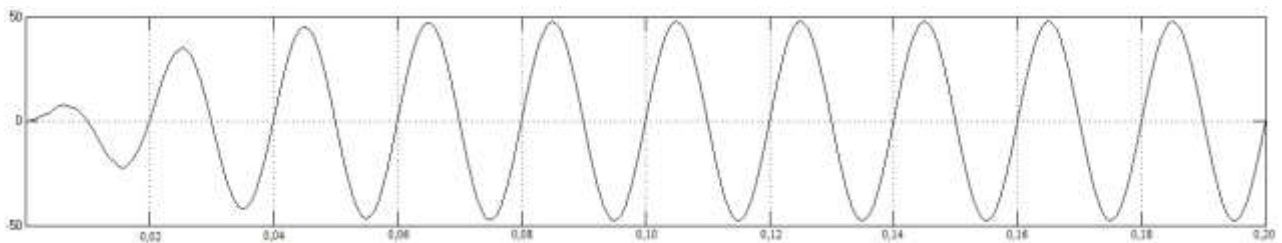
Рис. 9. Рассчитанный по  $p-q$  теории ток компенсации для фазы А

Рис. 10. Ток в фазе А после компенсации в комплексном режиме

Из приведенных диаграмм видно, что в результате компенсации ВГ  $THD_i$  в фазе А снизился с 23,5 до 1%, коэффициент мощности в результате компенсации реактивной мощности возрос с 0,68 до 0,99.

Ко второй группе относят алгоритмы, использующие преобразование Фурье (ПФ). Алгоритм расчета компенсационного тока, основанный на ПФ, приведен на рис. 11.

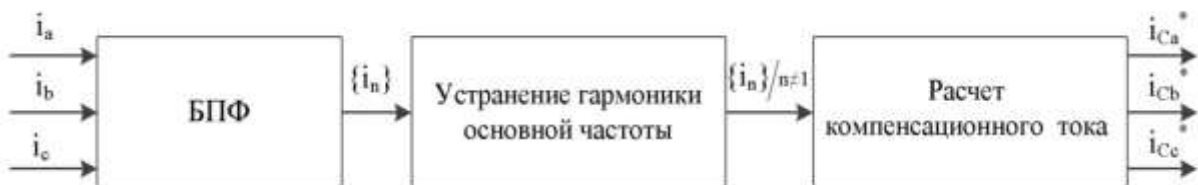


Рис. 11. Алгоритм расчета компенсационного тока, основанный на преобразовании Фурье

Описание блоков структурной схемы:

1. БПФ – блок преобразования Фурье – сигнал, поступающий на вход блока, по формуле (7) представляется на выходе в виде амплитуды и начальной фазы  $n$ -й гармоники:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)), \quad (7)$$

где  $n$  – номер гармоники.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^T f(t) \cos(n\omega t) dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t-T}^T f(t) \sin(n\omega t) dt,$$

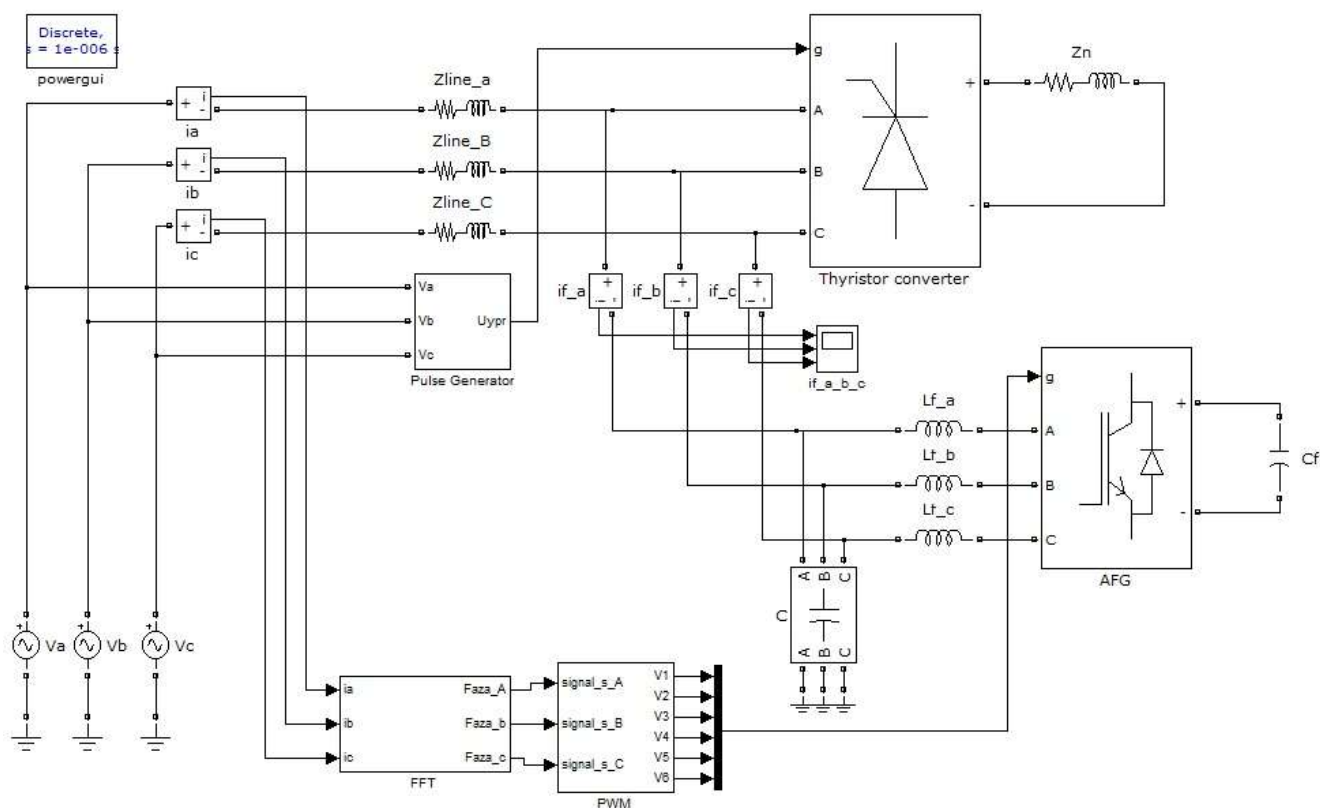
$$T = \frac{1}{f_1}, \quad f_1 \text{ – частота основной гармоники.}$$

Амплитуда и фаза определяются следующим образом:

$$|H_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2},$$

$$\angle H_n = \text{atan2}\left(\frac{a_n}{b_n}\right).$$

На рис. 12 приведена модель системы «активный фильтр гармоник – сеть» с блоком расчета тока компенсации, основанного на преобразовании Фурье.



**Рис. 12. Модель «активный фильтр гармоник – сеть» с блоком расчета тока компенсации, основанного на преобразовании Фурье**

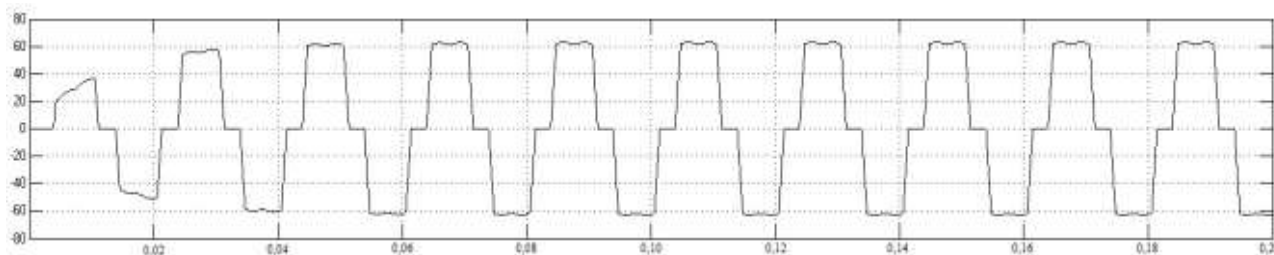
2. Из спектра полученных гармоник выбираем необходимые для компенсации, т.е. нужно исключить гармонику основной частоты.

3. Из полученных амплитуд и начальных фаз гармоник восстанавливаем синусоидальный сигнал для каждой гармоники по формуле (8), а затем суммируем эти синусоидальные сигналы, формируя задание на ток компенсации (9).

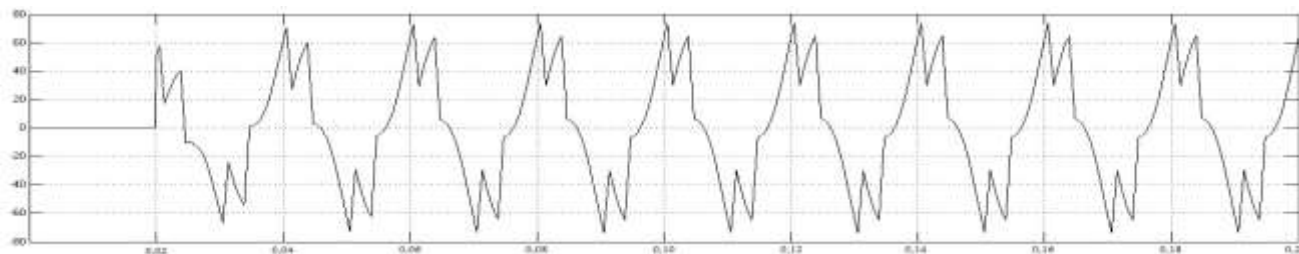
$$f_n = H_n \cos(n\omega t + \angle H_n), \quad (8)$$

$$i^* = \sum f_n. \quad (9)$$

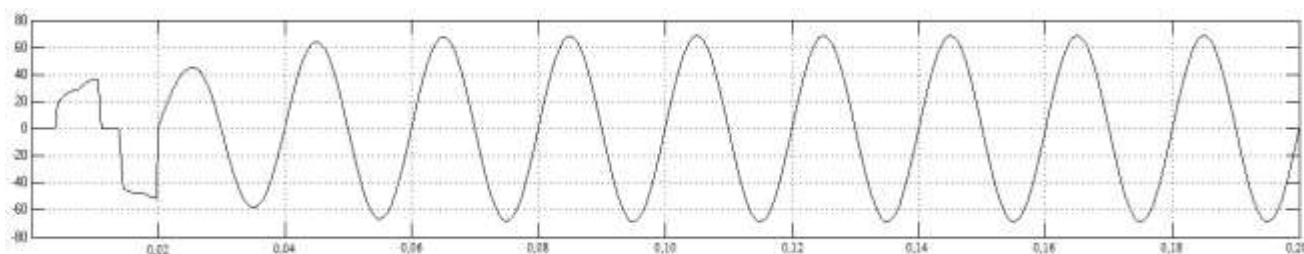
Результаты моделирования иллюстрируются на рис. 13 – рис. 15.



**Рис. 13. Ток фазы A без компенсации**



**Рис. 14. Рассчитанный ток компенсации для фазы А**



**Рис. 15. Ток в фазе А после компенсации**

В результате компенсации под управлением алгоритма, основанного на преобразовании Фурье,  $THD_i$  в фазе А так же, как в случае использования алгоритма, основанного на  $p-q$  теории, снизился с 23,5 до 1%, а коэффициент мощности возрос с 0,68 до 0,99.

Результаты проведенного исследования предназначены для использования в системе управления АФГ, реализованных не только на основе автономных инверторов напряжения (АИН), но и на основе автономных инверторов тока (АИТ). Авторами реализован АФГ с релейными регуляторами компенсационного тока в фазах сети [1], позволяющий компенсировать гармоники в полосе частот до 2 000 Гц.

Ранее были рассмотрены АФГ для компенсации нелинейных искажений напряжения в узле нагрузки питающей сети. Однако в составе рассматриваемых электроприводов применяются двухзвенные преобразователи частоты с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока. Наиболее массовые из электроприводов не предъявляют повышенных требований к быстродействию в процессе регулирования скорости вращения и могут иметь структуру «компенсационный выпрямитель с отдельным управлением группами вентиля – автономный инвертор тока» [1]. Применение АФГ для компенсации гармоник на выходе автономного инвертора тока позволит избежать использования широтно-импульсной модуляции при управлении ключевыми приборами инвертора тока для улучшения гармонического состава тока приводимого двигателя. Установленная мощность такого АФГ не превысит 5% от мощности инвертора тока, а последний будет характеризоваться низкими коммутационными потерями и полным использованием по напряжению ключевых приборов.

### Выводы

1. Динамическое управление реактивной мощностью, генерируемой в питающую сеть, обеспечивает значения показателей качества электрической энергии в допустимых пределах, но требует сопутствующей компенсации искажений формы сетевого напряжения.

2. Сетевой активный фильтр гармоник, благодаря наличию в его составе предложенной системы управления инвертором тока или напряжения, реализующих процессы генерации компенсационных токов в трехфазных сетях, позволяет повысить точность компенсации высших гармоник и реактивной мощности.

**Библиографический список**

1. **Титов, В.Г.** Комплексные технические решения для энергосберегающих электроприводов / А.С. Плехов, М.Н. Охотников, В.Г. Титов // Актуальные проблемы электроэнергетики. Нижний Новгород, 2010. С. 44–53.
2. **Плехов, А.С.** Учет мощности искажений при энергосберегающем управлении электроприводами / А.С. Плехов, В.Г. Титов, К.А. Бинда // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2011. № 4(91). С. 203–210.
3. **Чаплыгин, Е.Е.** Теория мощности в силовой электронике: учеб. пособие для вузов / Е.Е. Чаплыгин, Н.Г. Калугин. – М., 2006. – 56 с.
4. **Жежеленко, И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 4-е изд. перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
5. Iravani, M. R. and Karimi-Ghartemani, M., 'Online Estimation of Steady State and Instantaneous Symmetrical Components'. Proceedings of the IEE on Generation, Transmission and Distribution, 150(5). September 2003. Pp. 616–622.

*Дата поступления  
в редакцию 27.04.2012*

**S.M. Dmitriev, A.S. Plehov, V.G. Titov, D.U. Titov, S.N. Yaschin**

**ALGORITHMS OF MANAGEMENT ACTIVE FILTER HARMONICAS  
OF THE SYSTEM ELECTRICAL DRIVE ALTERNATING CURRENT**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev,  
Company "Energy saving"

They Are Offered power-saving systems electrical equipment for enterprise of industry and housing-public facilities. The complex technical decisions are Discussed with use the compensation rectifier in section of the direct current frequency operated электропривода. The questions of the syntheses algorithm work control active filter of the harmonicas are Discussed. The technical decisions are Offered for their realization.

*Key words:* compensation converter of the frequency; the compensation of the harmonic distortion, shaping signal control active filter harmonicas.

УДК 62-83:621.31

А.Ю. Смирнов

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ РАДИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ ЧЕРЕЗ МАШИННУЮ ПОСТОЯННУЮ

ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»

Рассматривается метод проектирования радиальных электромагнитных подшипников через машинную постоянную (постоянную Арнольда), связывающую диаметр и длину ротора с электромагнитными нагрузками: индукцией в зазоре и линейной токовой нагрузкой. Приведён пример расчёта с проверкой результатов на сеточной модели, иллюстрирующий возможность изложенного подхода.

*Ключевые слова:* электромагнитный подшипник, электромагнитные нагрузки, индукция в зазоре, линейная токовая нагрузка, грузоподъёмность.

Электромагнитные подшипники (ЭМП) – это устройства, предназначенные для позиционирования вращающегося вала в заданном положении. Различают осевые ЭМП для позиционирования вала вдоль оси его вращения  $Z$ , и радиальные ЭМП для позиционирования вдоль двух ортогональных осей  $X$ ,  $Y$ , перпендикулярных оси вращения.

Радиальные ЭМП можно формально классифицировать как бесконтактные машины постоянного тока, снабжённые системой позиционирования ротора.

Как другие вращающиеся электрические машины, радиальные электромагнитные подшипники могут быть охарактеризованы такими физическими величинами, выбираемыми в качестве исходных данных при проектировании, как индукция в зазоре между статором и ротором и линейная токовая нагрузка. Это позволяет предложить простой и эффективный способ определения основных размеров радиального ЭМП через машинную постоянную.

Диаметр расточки  $D$  и длину пакета  $l_\delta$  радиального ЭМП можно выразить через машинную постоянную – постоянную Арнольда [1], преобразовав функцию частоты вращения и мощности в функцию момента  $M$ , а затем силы  $F$ :

$$\frac{D^2 l_\delta n}{P} = \frac{D^2 l_\delta 30}{\pi M} = \frac{D^2 \lambda 30}{\pi F} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta K_{об} A B_\delta}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – отношение осевой длины пакета статора  $l_\delta$  к диаметру его расточки  $D$ . В соответствии с рекомендациями фирм-разработчиков целесообразно, чтобы оно находилось в пределах

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D} = 0,33 \div 0,67; \quad (2)$$

$K_{об}$  – аналог обмоточного коэффициента других вращающихся электрических машин. В ЭМП он учитывает уменьшение геометрической суммы векторов сил электромагнитов сектора по сравнению с арифметической суммой сил электромагнитов сектора. Сектор – это группа электромагнитов, расположенных на  $\frac{1}{4}$  дуги окружности магнитопровода статора ЭМП, позиционирующих ротор по одному из направлений одной из осей (например, в направлении  $Y$ ).

Проектируя на ось сектора радиальные векторы силы, совпадающие с осями зубцов, получаем значения обмоточного коэффициента, представленные в табл. 1.

**Таблица 1**  
Расчётные значения обмоточного коэффициента  $K_{об}$  в зависимости от числа широких зубцов сектора  $N_{ш}$

$N_{ш}$	0	1	2	3	4
$K_{об}$	0,924	0,933	0,932	0,928	0,925



Можно выразить диаметр расточки следующим образом:

$$D = \sqrt{\frac{F}{15\alpha_\delta \lambda K_{ог} AB_\delta}}. \quad (3)$$

Относительная длина полюсных дуг  $\alpha_\delta$  в радиальном ЭМП представляет отношение суммарной длины полюсных дуг всех электромагнитов сектора к длине одной четверти окружности. Если учесть, что длина дуг средних электромагнитов сектора в два раза больше, чем у крайних, после определения диаметра расточки её можно выразить через ширину зубца  $b_z$  одного крайнего (узкого) электромагнита сектора:

$$\alpha_\delta = \frac{8b_z(N_{ш} + 1)}{\pi D}, \quad (4)$$

где  $N_{ш}$  – число широких зубцов одного сектора (рис.1). Предварительно можно принять

$$\alpha_\delta = 0,65 \div 0,8. \quad (5)$$

При выборе уровней электромагнитных нагрузок, линейной токовой  $A$  и индукции в зазоре  $B_\delta$ , можно руководствоваться теми же рекомендациями, что и для других вращающихся электрических машин [2].

В соответствии с рекомендациями, индукцию в зазоре можно выбрать в пределах от 0,7 до 0,95 Тл, а линейную токовую нагрузку в машинах с нормальными условиями эксплуатации – в пределах от  $2 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^4$  А/м, в зависимости от класса изоляции, частоты вращения и размеров ЭМП.

Используя выбранные значения нагрузок, можно определить площадь меди обмоточных проводов одного сектора радиального ЭМП:

$$s_m = \frac{\pi D A k_n}{4j}, \quad (6)$$

где  $j$  – плотность тока;  $k_n$  – коэффициент насыщения и составить спецификацию паза и вычислить площадь пазов, необходимую для размещения проводов обмотки вместе с пазовой и катушечной изоляцией:

$$s_{паза} = \frac{4d_{из}^2 s_m}{\pi d_{пр}^2 (N_{ш} + 2) k_3} + s_{пи} + s_{сб}, \quad (7)$$

полагаем, что площади всех пазов магнитопровода статора  $s_{паза}$  одинаковы. В (7) первое слагаемое представляет собой площадь занятую проводами обмотки в пазу  $s_{пр}$ ;  $d_{пр}$ ,  $d_{из}$  – диаметр проволоки обмоточного провода и его диаметр в изоляции, соответственно;  $k_3$  – коэффициент заполнения паза проводами круглого сечения. По аналогии со вспной обмоткой вращающихся электрических машин можно принять  $k_3 = 0,68 \div 0,72$  /2,3/;  $s_{пи}$  – площадь, занимаемая пазовой и катушечной изоляцией, в соответствии с составленной спецификацией паза, можно рекомендовать спецификацию паза, представленную в табл. 2;  $s_{сб}$  – уменьшение площади паза в “свету”, обусловленное допуском на сборку магнитопровода. В зависимости от диаметра расточки размер допуска  $h_{сб}$  может составлять от 0,1 до 0,4 мм.

Коэффициент насыщения в ЭМП меньше, чем в обычных вращающихся машинах с двухсторонней зубчатостью зазора. Можно принять, что он находится в пределах ( $1,05 \leq k_n \leq 1,25$ ).

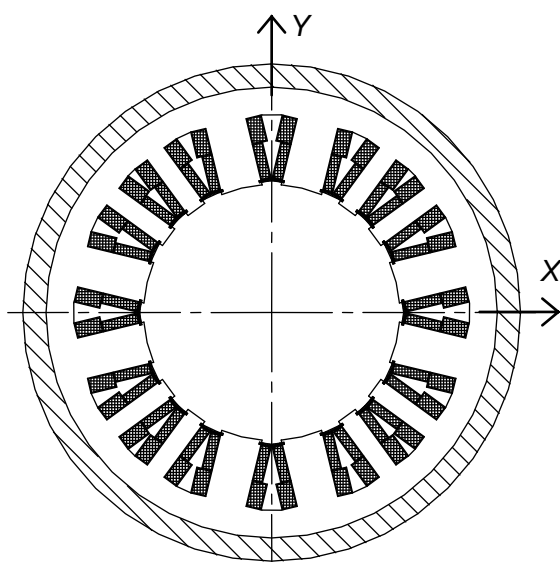


Рис. 1. Электромагниты радиального ЭМП

Таблица 2

## Изоляция обмотки электромагнитных подшипников

Материал	Толщина изоляции, мм
1. Пазовая коробочка	
Стеклолакоткань ЛСК 155/180-0,12,1 слой	0,12
Миканит ГФК-ТТ-0,25, 1 слой	0,25
Стеклолакоткань ЛСК 155/180-0,12,1 слой	0,12
Итого, общая толщина пазовой изоляции	0,49
2. Изоляция катушки	
снаружи: Стеклолакоткань ЛСК 155/180-0,12, с перекрытием 1/2 ширины	0,24
к проводу: Микалента ЛМК-ТТ-0,15Х20-0,15, с перекрытием 1/2 ширины	0,30
Общая толщина изоляции, $h_{\text{ши}}$	1,03

Путём совместного решения системы из (7) и уравнения для площади криволинейной трапеции, форму которой имеет паз, получаем

$$s_{\text{п}} = \frac{\pi[(D + 2h_{\text{кл}})h_z + h_z^2]}{4(N_{\text{ш}} + 2)} - \frac{2b_z h_z (1 + N_{\text{ш}})}{(N_{\text{ш}} + 2)}, \quad (8)$$

где  $h_{\text{кл}}$  – радиальный размер пазового клина, можно вычислить высоту обмотанной части зубца  $h_z$  и площадь  $s_{\text{п}}$ , а затем определить недостающие геометрические размеры всего магнитопровода статора:

- радиальный размер спинки

$$h_{\text{сп}} = (1,02 \div 1,05)b_z; \quad (9)$$

- наружный диаметр статора

$$D_{\text{ст}} = D + 2h_z + 2h_{\text{сп}}. \quad (10)$$

Площадь, занимаемая изоляцией, и площадь обусловленная допуском на сборку магнитопровода в (7), являются функцией периметра паза и высоты зубца:

$$s_{\text{ши}} + s_{\text{сб}} = (h_{\text{ши}} + h_{\text{сб}})(2h_z + a_1 + a_2) + 2h_{\text{ши}}h_z, \quad (11)$$

где  $a_1, a_2$  – меньшее и большее основания криволинейной трапеции соответственно.

$$a_1 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{кл}}) - 8b_z(1 + N_{\text{ш}})}{4(N_{\text{ш}} + 2)}, \quad (12)$$

$$a_2 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{кл}} + 2h_z) - 8b_z(1 + N_{\text{ш}})}{4(N_{\text{ш}} + 2)}. \quad (13)$$

Магнитная проводимость для магнитного потока сектора с учётом того, что он дважды пересекает зазор (в прямом и обратном направлении), составит

$$\Lambda = \frac{\mu_0 \pi D^2 \lambda}{8(2\delta)}. \quad (14)$$

МДС, приложенную к зазору на дуге сектора, можно связать с линейной нагрузкой

$$F_{\delta} = \frac{\pi D}{8} \alpha_{\delta} (2A). \quad (15)$$

Перемножением (14) и (15) определяется магнитный поток, который пересекает зазор в одном направлении. Его отношение к площади  $S$  сектора, пересекаемой потоком в одном направлении

$$S = \frac{\pi D^2 \lambda}{8} \quad (16)$$

даст принятое ранее значение индукции  $B_\delta$ , с учётом которого можно определить расчётный зазор  $\delta_{\text{расч}}$ :

$$\delta_{\text{расч}} = \delta k_\delta = \frac{\mu_0 \pi D \alpha_\delta A}{16 B_\delta}, \quad (17)$$

где  $k_\delta$  – коэффициент воздушного зазора.

Для одного сектора ЭМП  $t_z = \frac{\pi D}{4}$  и  $b = t_z - b_z(1 + N_{\text{ш}})$ , поэтому реальный (фактический) зазор в ЭМП можно вычислить из квадратного уравнения

$$10\delta^2 + \left( \frac{\pi D}{4} - 10\delta_{\text{расч}} \right) \delta - b(1 + N_{\text{ш}}) \delta_{\text{расч}} = 0,$$

откуда

$$\delta = \frac{10\delta_{\text{расч}} - \frac{\pi D}{4} + \sqrt{\left( \frac{\pi D}{4} - 10\delta_{\text{расч}} \right)^2 + 40b_z(1 + N_{\text{ш}}) \delta_{\text{расч}}}}{20}. \quad (18)$$

Полученное значение следует округлить до десятых долей миллиметра, а затем сопоставить округлённое значение с размером зазора в резервных подшипниках  $\delta_{\text{рез}}$ , в пределах которого может изменяться эксцентриситет  $\varepsilon$ . Для исключения существенной нелинейности статических характеристик и связанной с этим сложности управления необходимо, чтобы он соответствовал диаметру расточки

$$\delta > 0,25 + D \quad (19)$$

и не менее, чем на 30-50% превышал зазор в резервном подшипнике  $\delta_{\text{рез}}$ :

$$\delta > (1,3 \div 1,5) \delta_{\text{рез}}. \quad (20)$$

В случае невыполнения этого условия значения электромагнитных нагрузок  $A$  и  $B_\delta$  следует изменить, увеличив первую и снизив вторую.

Пример проектирования радиального ЭМП по изложенной методике приведён в табл. 3. и табл. 4.

Переход к большему числу зубцов в секторе  $N_{\text{ш}}$  проектируемого ЭМП позволяет снизить его габариты и массу за счёт меньшего внешнего диаметра, но ведёт к усложнению изготовления и сборки из-за большего числа катушек, а также к росту магнитных потерь в роторе, вследствие увеличения частоты перемагничивания его магнитопровода.

Для проверки правильности заложенных решений и выбранных геометрических размеров строим сеточную модель ЭМП. Для этого сначала на дуге с диаметром расточки  $D$ , равной  $1/8$  окружности откладываем ключевые точки, соответствующие координатам углов зубцов половины одного сектора магнитопровода статора.

Затем, используя локальные системы координат и данные табл.3, строим для этой части окружности линии сторон зубцов дуги большего основания пазов, внешней окружности статора. Проведённые линии служат для создания областей, им присваиваются свойства материалов, после чего в пакетах с интерактивной, с участием пользователя, генерацией сетки на созданных областях строится сетка половины одного сектора сеточной модели ЭМП. Сетка достраивается отображением относительно оси симметрии до модели всего сектора, а модель всего сектора четырежды (с учётом оригинала) копируется в полярной системе координат до сеточной модели всего статора ЭМП. Узлы элементов модели и ключевые точки стыкуемых линий секторов сливаются.

Построение сеточной модели ротора и окружающего его воздушного зазора не вызывает затруднений и также производится по секторам с последующим копированием в полярной системе координат и слиянием общих узлов, ключевых точек и линий.

На внешней границе воздушного зазора и окружности расточки формируются уравнения связи.

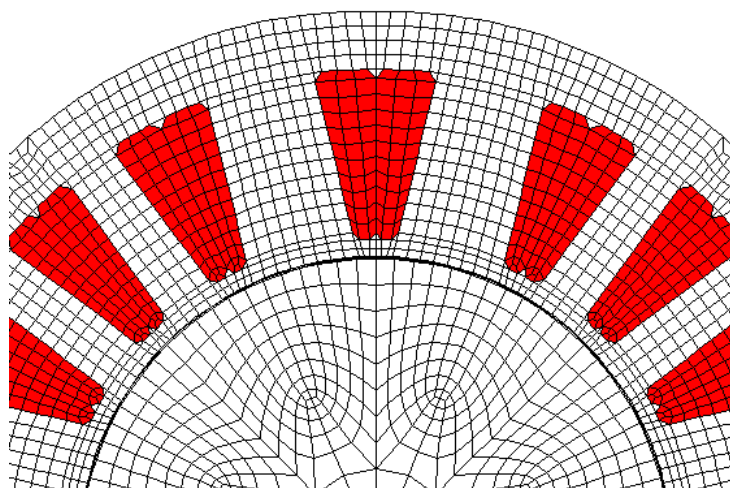
Таблица 3

## Пример проектирования радиального ЭМП

Наименование параметра, единицы измерения	Источник	Обозначение	Величина
<i>Исходные данные</i>			
Номинальная грузоподъёмность, Н		$F$	12000
Отношение осевой длины пакета статора $l_\delta$ к диаметру его расточки $D$	(2)	$\lambda$	0,5
Число широких зубцов в секторе		$N_{ш}$	2
Относительная длина полюсных дуг	(5)	$\alpha_\delta$	0,70
Линейная токовая нагрузка, А/м	[1,2]	$A$	40000
Индукция в зазоре, Тл	[1,2]	$B_\delta$	0,80
Плотность тока в длительном режиме работы, А/мм <sup>2</sup>		$j$	3,00
Коэффициент насыщения	[3]	$k_H$	1,20
Коэффициент заполнения паза	[3]	$k_3$	0,70
Припуск на сборку магнитопровода	[3]	$h_{сб}$	0,30
Диаметр провода в изоляции		$d_{из}$	1,20
Диаметр неизолированного провода		$d_{пр}$	1,00
Толщина пазового клина, мм		$h_{кл}$	8,0
Зазор в резервных подшипниках, мм		$\delta_{рез}$	0,6
<i>Результаты расчёта</i>			
Обмоточный коэффициент	Табл. 1.	$K_{об}$	0,931
Диаметр расточки, м	(3)	$D$	0,28
Осевая длина магнитопровода, м	$D\lambda$	$D\lambda$	0,14
Площадь меди обмоточных проводов, мм <sup>2</sup>	(6)	$s_m$	3518
Площадь занятая проводами обмотки в одном пазу, мм <sup>2</sup>	из (7)	$s_{пр}$	2304
Число витков одной катушки обмотки	$\frac{s_m k_3}{2d_{из}^2}$	$w$	560
Ширина узкого (крайнего) зубца, мм	$\frac{1000\pi D}{1 + N_{ш}}$	$b_z$	26
Ширина широкого зубца, мм	$2b_z$	$2b_z$	52
Размер дуги меньшего основания паза, мм	(4)	$a_1$	16,0
Общая толщина изоляции в пазу, мм	табл.2.	$h_{ши}$	1,03
Высота зубца (вместе с клином), мм	(7) и (8)	$h_3 + h_{кл}$	80,2
Размер дуги большего основания паза, мм	(12)	$a_2$	53,8
Радиальный размер спинки, мм	(9)	$h_{сп}$	26,5
Наружный диаметр статора, м	(10)	$D_{ст}$	0,510
Расчётный зазор, мм	(17)	$\delta_{расч}$	2,42
(Фактический) воздушный зазор, предварительное значение, мм	(18)	$\delta$	0,50
Диаметр ротора, мм	$1000D + 2\delta$	$D_p$	279,0
<i>Результаты расчёта сеточной модели</i>			
Грузоподъёмность расчётная, Н		$F_{расч}$	12652

Полученное значение зазора не соответствует диаметру расточки  $D$  (слишком мало), кроме того, оказывается меньшим, чем заданный зазор в резервных подшипниках  $\delta_{рез}$ . Поэтому увеличиваем фактический зазор  $\delta$  до  $\delta = 1,0$  мм с тем, чтобы выполнялись условия (19) и (20).

К сеточной модели (рис. 2) прикладываются нагрузки в виде граничных условий и плотности тока, протекающего через области обмотки одного сектора (перпендикулярно плоскости рисунка).



**Рис. 2. Сеточная модель спроектированного ЭМП в области электромагнитов одного сектора**

наибольшую величину, достигается кратковременной форсировкой тока до величины, превышающей номинальное значение.

Таким образом, исходное значение грузоподъемности радиального ЭМП, содержащееся в задании на проектирование, и фактическое значение, полученное в результате поверочного расчёта методом конечных элементов, практически совпадают. Этот результат подтверждает правомерность предложенной модели проектирования и подчёркивает общность математического описания ЭМП и других вращающихся электрических машин.

#### Библиографический список

1. **Иванов-Смоленский? А.В.** Электрические машины: учебник для вузов /А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
2. **Копылов, И.П.** Электрические машины: учебник для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2006. – 607с.
3. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов [и др.]; под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

Дата поступления  
в редакцию 21.02.12.

**A.Yu. Smirnov**

#### **THE RADIAL ELECTROMAGNETIC BEARINGS DIMENSIONS DETERMINATION BY MEANS OF MACHINE'S CONSTANT**

Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering I.I. Afrikantova

The method of electromagnetic bearings (EMB) dimensions by means of Arnolds machine's constant is discussed. It connects the electromagnetic loads: induction in air gap and linear current load with the main dimensions – rotor's diameter and length. Example of radial EMB design by means of machines constant is shown. Correctness was tested by analysis of load capacity on EMB FEM model.

*Key words:* electromagnetic bearing, electromagnetic loads, induction in air gap, linear current load, load capacity.

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.14.018.258

В.М. Колокольцев, И.В. Иванова, А.М. Долгополов

### ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ДЛЯ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Представлены результаты исследований патентных данных об инструментальных сталях для штампов горячего деформирования. Рассмотрено влияние легирования на структуру и свойства литейных штамповых сталей для горячего деформирования. Предложены наиболее рациональные пределы изменений легирующих элементов.

*Ключевые слова:* химический состав, легирование, литая штамповая сталь, микроструктура, свойства, скорость охлаждения.

Развитие современной машиностроительной отрасли неразрывно связано с усовершенствованием используемой инструментальной базы. Последние 15 лет для российского машиностроения явились периодом упадка и перехода отечественной металлургии на производство рядового металла. В то время как мировой опыт и достижения показывают, что использование давно известных марок инструментальных сталей не способно обеспечивать высокого качества инструмента.

Так, при производстве штампового инструмента большого экономического эффекта, возможно, добиться:

- во-первых, использованием новых высокопрочных и теплостойких марок штамповой стали, свойства которых удовлетворяли бы высоким требованиям;
- во-вторых, расширением выпуска продукции, в виде, не требуемой последующей механической обработки, то есть получения литого штампа (с практически готовым рельефом), удовлетворяющего современным требованиям к качеству инструмента и не уступающего по свойствам инструменту, полученному путем деформации (ковки, штамповки).

Экспериментальные работы, проведенные на кафедре «Электрометаллургия и литейное производство» ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова» были направлены на изучение влияния легирования литейной штамповой стали для горячего деформирования с целью получения таких ее структуры и состава, которые обеспечивали бы требуемый высокий уровень свойств литого инструмента (твердость, теплостойкость, износостойкость, вязкость, разгаростойкость, окалиностойкость и др.), характерный для деформированного состояния стали.

Экспериментальные сплавы получали в индукционной печи ИСТ-006 с основной футеровкой, заливали в литейные формы с различной теплоаккумулирующей способностью: в песчано-глинистые формы (ПГФ) (сухую и сырую) и чугунный кокиль. На дилатометрические исследования заливались образцы цилиндрической формы 5 x 10 мм в кварцевые трубки.

Микроструктурный анализ экспериментальных образцов проводили при увеличении от 100 до 500 крат на специально подготовленных образцах.

Испытания на износостойкость ( $K_{и}$ ) исследуемых образцов проводили по методике, регламентированной ГОСТ 23.208-79 «Метод испытания материалов на износостойкость при трении о жестко закрепленные абразивные частицы». Испытания проводились на образцах с размерами 35x35x10 мм. В качестве абразива использовался электрокорунд зернистостью № 16П по ГОСТ 3647-80. Мерой износа служило отношение потери веса образца к потере веса эталона, в качестве которого использовали сталь 45.

Ударно-абразивную износостойкость ( $K_{и,уд}$ ) опытных образцов оценивали в соответствии с ГОСТ 23.207-79 «Метод испытаний машиностроительных материалов на ударно-абразивное изнашивание». Эталонный образец был выполнен из стали 45 по ГОСТ 1050-74 с твердостью HV 598-622. В качестве абразивного материала использовали карбид кремния черный по ГОСТ 3647-71, зернистостью 0,63 мм.

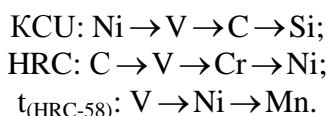
На начальном этапе с целью выбора базового состава литейной стали для штампов горячего деформирования был проведен литературно-патентный анализ и отобраны основные типы инструментальных сталей, отвечающих требуемым механическим свойствам (полутеплостойкие стали). Рассматривались основные свойства: твердость, теплостойкость и ударная вязкость.

Было установлено, что для успешной работы литого инструмента, не уступающей работе инструмента, полученного при деформации сплава, комплекс свойств и структура должны быть следующими:

- высокая твердость (HRC 36-60 ед.);
- средняя или высокая теплостойкость ( $t_{(HRC-58)} - 500 - 600$  °C);
- умеренные или высокие показатели ударной вязкости (полутеплостойкие  $KCU_{ДЖ/мм^2} - 12 - 72$ );
- микроструктура (M+K, M+A<sub>ост</sub>+K, мелкозернистость структуры с баллом зерна не более 6).

Интервалы содержаний химических элементов в исследуемых полутеплостойких сталях следующие: C=0,02-1,60 %; Si=0,07-0,70 %; Mn=0,28-23,9 %; Cr=0,45-13,25 %; V=0,07-4,05 %; Mo= 0,11-7,2 %; Ni=0,28-3,25 %; W=0,28-1,35 %.

В ходе проведенного статистического анализа были получены адекватные зависимости, описывающие взаимосвязь исследуемых свойств от химического состава штамповых сталей. Данные зависимости позволили определить ряды влияния химических элементов на исследуемые свойства (от элемента с большей степенью влияния к элементу с меньшей) литой штамповой стали для горячего деформирования:



Результаты анализа показали, что углерод в интервале 0,50 – 1,25 % понижает ударную вязкость. Высокие значения наблюдаются при содержании углерода в интервалах 0,25-0,50% и 1,25 – 1,50 %. При содержании углерода 1,0–1,25 % наблюдаются высокие значения твердости. Но для обеспечения высоких значений теплостойкости углерод в основном находится в пределах 0,08 – 0,25 %. При увеличении его содержания в стали ускоряются процессы коагуляции карбидных фаз и перераспределение легирующих элементов между твердым раствором и карбидами. Однако для обеспечения высокой твердости содержание углерода должно быть выше 0,25 %. Наиболее рациональные пределы изменения углерода 0,25-0,5% и 1,0-1,25%.

При содержании никеля в интервале от 1,0-2,5% твердость минимальна. При легировании стали никелем более 3% твердость ее заметно возрастает. Но с целью обеспечения высокой теплостойкости рекомендуется содержание никеля не превышать более 1,0 %. Что же касается ударной вязкости, то с увеличением содержания никеля она возрастает на всем рассматриваемом интервале.

Для обеспечения высокой теплостойкости рекомендуемое содержание марганца в стали 0,45 – 1,0%.

С точки зрения обеспечения высокой теплостойкости рекомендуется, чтобы содержание кремния было минимальным. При содержании его до 0,7% обеспечиваются умеренные показатели ударной вязкостью 0,7%. Прежде всего кремний используется в качестве раскислителя. Опыт применения литейных штамповых сталей показывает, что рекомендуемое ограничение содержание кремния 0,15-0,45% является оправданным.

Ударная вязкость падает с увеличением содержания ванадия, но при содержании ванадия в интервале от 0,75 – 1,90 % теплостойкость имеет максимальное значение. При легировании стали ванадием в интервале 1,0 – 1,75 % наблюдается повышение твердости стали.

По результатам проведенного статистического анализа были определены рациональные пределы изменения элементов, спланирован и проведен дробный факторный эксперимент (ДФЭ) типа  $2^3$  (табл. 1).

Таблица 1

Матрица планирования и результаты проведения ДФЭ  $2^3$ 

№ п/п опыт- ных спла- вов	Факторы								Свойства опытных сплавов					
	C		Si	Mn	Cr		Ni		Тип литейной формы					
									ПГФ сухая		ПГФ сы- рая		кокиль	
	HRC, ед.	K <sub>и</sub> , Ед	HRC, ед.	K <sub>и</sub> , ед.	HRC, ед.	K <sub>и</sub> , ед.								
1	+	1,00	0,5	0,5	-	3,00	+	1,50	34,4	1,1	33,1	1,1	38,0	1,4
2	-	0,40			-	3,00	+	1,50	34,0	1,1	33,7	1,1	42,0	1,7
3	+	1,00			+	6,00	+	1,50	36,0	1,2	34,7	1,2	39,0	1,4
4	-	0,40			+	6,00	+	1,50	48,5	1,8	47,3	1,8	50,0	1,9
5	+	1,00			-	3,00	-	0,50	38,5	1,5	36,9	1,5	42,0	1,5
6	-	0,40			-	3,00	-	0,50	34,4	1,1	34,0	1,2	37,0	1,3
7	+	1,00			+	6,00	-	0,50	38,3	1,4	37,2	1,4	42,0	1,5
8	-	0,40			+	6,00	-	0,50	47,4	1,6	46,9	1,6	49,7	1,7

Данные исследования показали, что ни один из опытных сплавов не способен обеспечить уровень свойств, характерных для деформированного состояния стали.

В результате анализа экспериментальных данных за основу была выбрана литейная штамповая сталь, содержащая в среднем, % (по массе): 0,4% C, 0,5% Si, 0,5% Mn, 0,5% Ni, 6,0% Cr. Для улучшения механических и литейных свойств литейной штамповой стали было предложено ввести следующие элементы: вольфрам, молибден и ванадий.

С целью изучения дополнительного легирования литейной штамповой стали был спланирован дробный факторный эксперимент типа  $2^3$  при следующем изменении факторов, % (по массе):  $X_1$  (вольфрам, 3,0; 4,3);  $X_2$  (молибден, 0,7; 1,0);  $X_3$  (ванадий, 0,5; 1,0). Результаты проведения эксперимента представлены в табл. 2.

Данные исследования показали, что стали, дополнительно легированные % (по массе): вольфрамом (4,3), молибденом (1,0) и ванадием (1,0), имели наиболее высокую стойкость в условиях абразивного износа.

В условиях ударно-абразивного износа наилучшую износостойкость имеют сплавы, у которых высокая прочность сочетается с достаточно высокой пластичностью. Этим условиям вполне удовлетворяют стали, дополнительно легированные, % (по массе): вольфрамом и молибденом (суммарное содержание 4,0-5,0) и ванадием (0,5).



Таблица 2

Результаты проведения ДФЭ типа 2<sup>3</sup>

№ п/п опытных сплавов	Свойства опытных сплавов в зависимости от типа литейной формы								
	ПГФ сухая			ПГФ сырая			Кокиль		
	HRC, ед.	K <sub>и</sub> , ед.	K <sub>и.уд.</sub> , ед.	HRC, ед.	K <sub>и</sub> , ед.	K <sub>и.уд.</sub> , ед.	HRC, ед.	K <sub>и</sub> , ед.	K <sub>и.уд.</sub> , ед.
1	46,7	3,1	4,6	47,8	3,4	3,5	58,5	3,6	4,8
2	48,2	3,0	5,6	50,7	3,5	8,9	60,3	4,4	9,2
3	48,3	2,9	3,6	49,2	3,7	3,6	60,0	4,0	5,9
4	60,5	5,3	6,4	62,3	5,8	6,8	63,3	7,7	9,6
5	56,0	2,8	3,7	59,8	3,5	3,9	61,6	3,7	4,4
6	58,8	3,6	3,8	61,3	3,7	5,2	64,0	3,8	5,4
7	61,8	3,6	5,7	63,7	3,7	5,9	64,2	3,9	6,9
8	51,5	3,5	4,89	53,0	3,3	6,4	58,0	4,2	9,9

В условиях ударно-абразивного износа наилучшую износостойкость имеют сплавы, у которых высокая прочность сочетается с достаточно высокой пластичностью. Этим условиям вполне удовлетворяют стали, дополнительно легированные, % (по массе): вольфрамом и молибденом (суммарное содержание 4,0-5,0) и ванадием (0,5).

Легирование молибденом обеспечивает более однородное выделение карбидов цементитного типа и их повышенную дисперсность. Учитывая требования, предъявляемые к штамповым сталям для горячего деформирования, необходимым условием их выполнения является суммарное легирование вольфрамом и молибденом [1]. Как показывает опыт создания и эксплуатации сталей, более предпочтительно комплексное легирование. Но выбор конкретных соотношений зависит от условий эксплуатаций инструмента.

Экспериментами, выполненными на опытных сплавах, содержащих, % (по массе): углерод (0,4), марганец и кремний (0,5), хром (6), никель(0,5), ванадий (1,0) – установлено, что при повышении суммарного содержания вольфрама и молибдена более 4,0-5,0% снижается пластичность и увеличивается износ литейной штамповой стали. Из-за отчетливой тенденции к снижению пластичности и при увеличении количества карбидообразующего элемента в литейных инструментальных сталях суммарное содержание в них вольфрама и молибдена целесообразно ограничивать 4,0-5,0%.

Ванадий, в противоположность большинству других легирующих элементов, смещает эвтектоидную концентрацию в сторону повышения, вызывает существенное увеличение дисперсности карбидов, за счет чего повышается пластичность и прочность штамповой стали. Образуя один из самых твердых карбидов, типа MC, ванадий улучшает распределение частиц избыточной фазы, снижает карбидную неоднородность, способствует измельчению первичного зерна, повышает твердость и износостойкость стали, растворяясь в феррите, повышает предел текучести и улучшает пластичность и ударную вязкость [1].

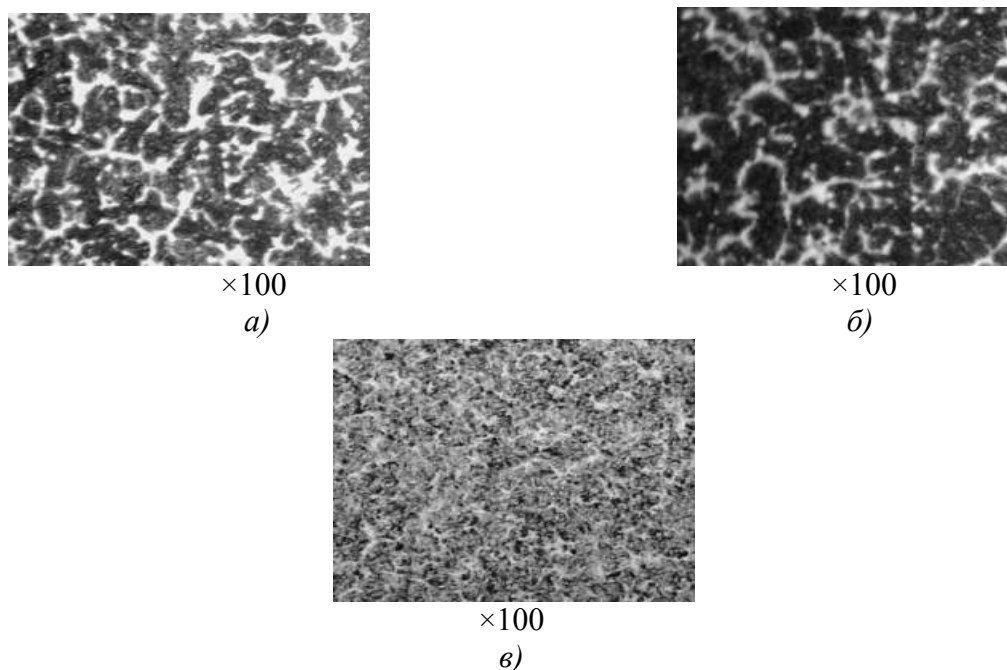
Механические свойства находятся в прямой взаимосвязи со структурой опытных образцов.

Структура опытной стали, легированной, % (по массе): вольфрамом (4,3), молибденом (1,0) и ванадием (1,0) – максимально приближена к структуре деформируемого металла, отличается мелкозернистостью (балл зерна 7), высокой дисперсностью и однородным распределением упрочняющей карбидной фазы (рис. 1).

Анализ микроструктуры опытных сплавов (следующего химического состава, % масс. С=0,40; Mn=0,50; Si=0,5; Ni=0,50; Cr=6,0; W = 4,3; Mo = 1,0; V =1,0): показал, что балл зерна выше у образцов, залитых в металлическую форму, меньший балл у образцов, получаемых в сухой песчано-глинистой смеси.

Сравнивая показатели свойств, полученных при заливке в песчано-глинистые формы

и кокиль, можно сделать вывод, что на исследуемые свойства сильно влияет и тип формы, а точнее, скорость охлаждения. При заливке в кокиль полученные результаты твердости и износостойкости оказались выше, чем при заливке в песчано-глинистые формы.



**Рис. 1 – Микроструктура экспериментальной стали, залитой:**  
*а* – в сырую ПГФ; *б* – в сухую ПГФ; *в* – в кокиль

Это связано с тем, что при заливке в металлическую форму образуется мелкодисперсная структура, что объясняется большей теплоаккумулирующей способностью кокиля по сравнению с песчано-глинистыми формами. При заливке в кокиль, благодаря более сильному переохлаждению расплава, увеличивается область мелких разориентированных кристаллов, измельчаются карбиды, что положительно влияет на твердость и износостойкость.

При заливке в песчано-глинистые формы образуются более крупные карбиды. Увеличение размеров карбидов меняет механизм износа. Наименьшей износостойкостью обладают сплавы, залитые в сухие песчано-глинистые формы, в них карбиды успевают вырасти до крупных размеров, которые при изнашивании растрескиваются и выкрашиваются из мягкой матрицы, что приводит к снижению износостойкости.

### Выводы

Литье позволяет получать разнообразные свойства как технологические, так и механические в зависимости от требований, предъявляемых при эксплуатации инструмента. В работе показано, что легирующие добавки повышают механические свойства литой штамповой стали для горячего деформирования до показателей свойств сталей, полученных путем деформации. Структура литейной инструментальной стали максимально приближена к структуре деформируемого сплава. Предложены наиболее рациональные пределы легирующих элементов для литейной инструментальной стали.

Подтверждена зависимость износостойкости экспериментальных сплавов от прочностных и пластических характеристик в различных условиях изнашивания.

Показано, что сопротивление литейной инструментальной стали абразивному и ударно-абразивному износу находится в зависимости от следующих факторов: твердости, с повышением которой сопротивление износу увеличивается, дисперсности структуры, с повышением которой износ уменьшается.

Рассмотрена зависимость получения различных свойств и структуры опытных образцов от скорости охлаждения расплава, что позволяет рекомендовать для получения тонкостенных заготовок штампа использование песчано-глинистых литейных форм.

*Работа выполнена в рамках государственного контракта №ГК 14.740.11.1242 реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

- 
1. **Гурьев, А.М.** Теория и практика получения литого инструмента / А.М. Гурьев, Ю.П. Хараев. – Барнаул: Издательство АлтГТУ, 2005. – 220 с.

*Дата поступления  
в редакцию 13.04.2012*

**V.M. Bells, I.V. Ivanov, A.M. Dolgoplov**

**EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES  
OF FOUNDRY TOOL STEEL DIE \* HOT DEFORMATION**

Magnitogorsk State Technical University n.a. G. Nosov

The patent data researches results are presented about instrumental stamp steels in hot deformation process. The problem of alloying influence to structure and properties of casting stamp steels in hot deformation process is considered. The most rational limits alloying elements changes are offered.

*Key words:* chemical composition, alloying, casting stamp steel, microstructure, properties, speed of cooling.

УДК 669. 13.62

Л.В. Палаткина

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В СЕРОМ ЧУГУНЕ**

Волгоградский государственный технический университет

Выполнен анализ первичной структуры чугуна и рассмотрен возможный вариант её трансформации, влияющий на рост прочности в чугунных отливках.

*Ключевые слова:* серый чугун, композиционное упрочнение, дендрит, эвтектика, активность углерода ( $a_c$ ), прочность.

**Введение**

Большое количество исследований за длительный период производства различной продукции показывает, что серый чугун с пластинчатым графитом, оставаясь одним из самых дешевых и доступных материалов, обеспечивает надёжность и долговечность различных машин и механизмов. Однако чугун во многом не использует своих потенциальных возможностей и резервов, которые так необходимы для улучшения качественных характеристик изделий из него и расширения сферы его использования.

Недостаточные успехи производства в изготовлении высококачественных деталей машин и механизмов во многом являются следствием несовершенства подхода к процессам структурообразования серого чугуна. В тоже время применение принципиально нового *композиционного подхода* к строению одного из старейших литейных сплавов, является наиболее перспективным из существующих направлений. Композиционный подход основан на том, что в первом приближении первичная структура серого чугуна подобна структуре волокнистых композиционных материалов (ВКМ), армированных дискретными волокнами. Морфологические особенности структуры кристаллизации серого чугуна таковы, что при её формировании в течение первого этапа кристаллизации, образуя пространственный каркас, выделяются весьма совершенные образования: разветвлённые, цельнометаллические дендритные монокристаллы первичного аустенита, сохраняющие свою индивидуальную форму при последующих твердофазных превращениях. После достижения междендритной жидкостью эвтектического состава в виде ячеек кристаллизуется эвтектика, образуя тем самым непрерывную матрицу. Каждая ячейка имеет внешнюю металлическую границу, состоящую из легкоплавких ликватов, а внутренние объёмы находящегося в ней эвтектического аустенита разупрочнены, в зависимости от степени разветвлённости графитного монокристалла.

Предпосылки композиционного подхода были заложены в работах зарубежных и отечественных ученых Н. Г. Гиршовича, Г. А. Косникова, И. А. Иоффе, В. Паттерсона и Г. Н. Троицкого [1 - 3]; развиты в исследованиях В. А. Ильинского, Л. В. Костылевой, А. А. Жукова [4 - 7] и нашли признание в трудах Б. Н. Арзамасова и Р. Эллиота [8, 9]. В связи с этим, изучение структуры серого чугуна и поиск на этой основе новых технических решений по повышению качества чугунных отливок является актуальной задачей, которая имеет как научное, так и прикладное значение.

Цель данной работы заключалась в изучении особенностей образования первичной структуры чугуна и анализе возможности её изменения для повышения прочности чугунных отливок.

**Методика проведения исследований**

Предметом исследования были серые машиностроительные чугуны с пластинчатым графитом марок СЧ 15 - СЧ 30, согласно ГОСТ 1412-85 (СТ СЭВ 4560-84). Степень эвтектичности исследуемых композиций чугунов изменялась в пределах от 0,82 до 1,0. Металло-

графический анализ первичной структуры серых чугунов проводили на шлифах, изготовленных из материала стандартных разрывных образцов ( $\varnothing$  30 мм).

Дендриты первичного аустенита в сером чугуне при исследовании их методами оптической металлографии выявляли многократным травлением в смеси борной и серной кислот: борная кислота в количестве 10 – 30 г.; серная кислота – в объёме 100 мл. Травление кратковременное 6 – 10 с, после чего шлиф промывался проточной водой и слегка переполировывался.

Структура эвтектической кристаллизации для определения дисперсности эвтектических ячеек выявлялась травлением образцов реактивом, состоящим из 3 г  $\text{CuSO}_4$ , 4 г пикриновой кислоты, 20 см<sup>3</sup> концентрированной соляной кислоты и 100 см<sup>3</sup> - этилового спирта. Наиболее четко эвтектические ячейки выявлялись после двух- и трехкратного травления и переполировки.

Количественные металлографические исследования с целью определения объемной доли дендритных кристаллов первичного аустенита (*фдк*) выполняли методом секущих на микроскопе *Neophot - 21* при увеличениях от 10 до 100. Длину дендритов оценивали по наибольшему в данном сечении. Далее из выражения

$$d = \frac{2}{3} \cdot \lambda,$$

где  $\lambda$  - дендритный параметр - расстояние между центрами осей второго порядка, находили диаметр дендритных кристаллов.

Исследование морфологии дендритов выполняли на шлифах при увеличении от 3 до 100 раз с помощью оптической бинокулярной лупы МБС – 7 и оптических микроскопов *Neophot – 21* и *Olimpus BX61*. Учитывая армирующую роль дендритов первичного аустенита, особое внимание уделялось их расположению относительно разрушающих нагрузок и упрочняемых ими ячеек эвтектики.

Для оценки дисперсности эвтектических ячеек, ограниченных сеткой фосфидной эвтектики, измеряли средний диаметр линейным методом, подсчитывая количество зерен на 1 см произвольной секущей не менее, чем в пяти местах шлифа при увеличении три-пять раз.

При идентификации природы аномальных дендритных кристаллов проводили качественный анализ микроликвации кремния по цвету плёнки  $\text{SiO}_2$ , образующейся на поверхности шлифов при травлении их в кипящем водном растворе пикрата натрия. По мере убывания содержания Si в структурных составляющих чугуна цвет плёнки изменялся в следующем порядке: желто-зеленый, голубой, пурпурный, соломенно-желтый. По изменению интенсивности окрашивания отдельных микроликвационных зон строили варианты примерных профилей сегрегационных кривых, которые отражали усреднённые графические представления о распределении Si по сечению дендритных ветвей и в междуветвиях. Оценивали характер микроликвации кремния, однородность окраски в пределах каждой микроструктурной зоны, протяженность переходных зон изменения окраски, наличие скачкообразного изменения цвета и др.

Микрорентгеноспектральным анализом исследовали неоднородность армирующего дендритного каркаса чугуна по содержанию Si, Mn и S при непрерывном перемещении зонда и путём продолжительного (60 с) набора импульсов в отдельных характерных точках траектории, пересекающей дендритные ветви. Исследования микрохимической неоднородности распределения элементов по сечению армирующих дендритных ветвей серого чугуна выполняли на микрорентгеноспектральном анализаторе *Super Prob-733*.

Дюраметрические исследования изменения свойств дендритных ветвей проводили до и после термического воздействия.

Электронный растровый микроскоп РЭМ - 250 использовали для анализа разрушения серого чугуна с позиций рассмотрения его аналогии волокнистому композиту.

Термокинетические условия кристаллизации, в качестве возможной причины формирования аномальных дендритов, оценивали металлографически, сравнивая дисперсность первичной структуры в образцах чугуна обычного и аномального строения. При этом определяли:

- объёмную долю дендритов ( $f_{\text{ДК}}$ );
- расстояния между ветвями второго порядка ( $\lambda$ ), мкм.;
- толщину дендритных ветвей, включая кайму ( $d$ ), мкм.;
- дисперсность ячеек эвтектики ( $\emptyset$ ), мкм.;
- морфологию графитной фазы.

Все перечисленные измерения выполняли с применением известных методов количественной металлографии, достоверность которых обеспечивали достаточной базой измерений ( $> 30$ ) и статистической обработкой результатов исследований.

Для измерения толщины дендритов использовали только поперечные сечения дендритных ветвей, находящихся в поле зрения в виде кругов или эллипсов. Толщины дендритов являются наименее удобными для измерения параметрами и для получения приемлемой точности требуют существенно большей базы, которая в этих исследованиях была увеличена до 100 - 150 измерений. Полагали, что разница в толщинах дендритов у аномальных и штатных чугунов могла стать информативным параметром для анализа особенностей кристаллизации наружных и внутренних микроструктурных зон в аномальных ветвях.

С позиций переохлаждения предусматривали также провести идентификацию графита в чугунах с аномальными структурами на предмет исключения или подтверждения возможности образования его вследствие распада карбидов. Для этих исследований намечали применение просвечивающей рентгеновской микроскопии тонких фольг чугуна на рентгеновском микроскопе МИР - 2 с острофокусной трубкой (анод вольфрамовый) для просвечивания фольг применяли излучение со сплошным спектром, имеющим максимум интенсивности на длине волны 0,2 нм (2 Å). Подготовка образцов предусматривала вырезку чугунных пластинок толщиной 1 - 0,5 мм и последующее их утонение до фольги толщиной  $\geq 0,08$  мм шлифованием на мелкозернистой бумаге вручную. Толщину фольги выбирали в соответствии с параметрами исследуемых элементов структуры.

Информативность объёмных изображений графитовых включений определялась их формой. Так, мелкие изолированные включения, хотя бы отдаленно напоминающие графит отжига, могли свидетельствовать в пользу распада карбидов, тогда как тонколепестковые розетки, растущие из одного центра, были бы характерными для выделения их из жидкой фазы.

Таким образом, сопоставительный анализ параметров первичной структуры в чугунах с аномальным и штатным строением дендритов позволял получить достоверную информацию о роли термокинетики кристаллизации в образовании аномалии.

Многообразие форм термодинамических воздействий на структуру чугуна требовало проведения предварительного анализа в рамках конкретной рабочей гипотезы, ограничивающей объём возможных вариантов исследований. В связи с этим, в качестве проверки рабочей гипотезы, объясняющей воздействие термодинамики кристаллизации на возникновение в дендритах высокоугловой границы, анализировали только возможность блокировки дендритного роста, например поверхностно - активными примесями.

Для определения содержания примесей предусматривали использовать фотоэлектрический квантометр ARL 3400. В сравнительных исследованиях штатных и аномальных образцов чугуна надеялись обнаружить различия в содержании примесей, обладающих положительной адсорбцией по Гиббсу. Наличие таких примесей могло кардинально изменять штатную дендритную кристаллизацию.

### Результаты исследований

Проведённый анализ соответствия первичной структуры серого чугуна основным принципам упрочнения композитов с неориентированными дискретными волокнами показал, что первый принцип композиционного упрочнения ВКМ, заключающийся в том, что объёмная доля армирующих волокон в композите должна быть в пределах от 20 до 80 %, в чугуне выполняется.

Показано, что объёмная доля армирующих дендритных кристаллов ( $f_{\text{дк}}$ ) в промышленных чугунах изменяется значительно: от 15 до 65 % (рис. 1).

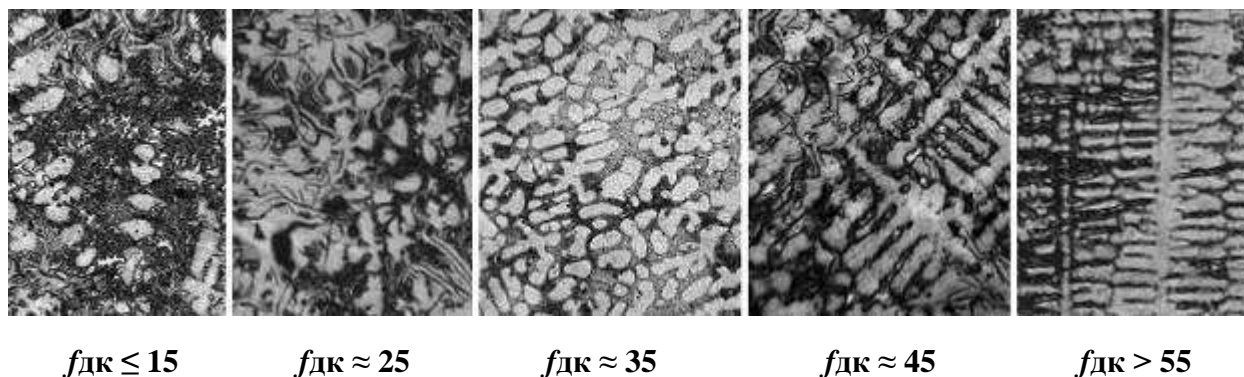


Рис. 1. Дендритная структура чугуна со степенью эвтектичности  $0,82 < Sc < 1,0$ , приведенная толщина стенки отливки 15 мм,  $\times 70$

Следует также отметить, что объёмную долю дендритов ( $f_{\text{дк}}$ ), выполняющих в чугуне роль армирующих волокон, современные литейные технологии позволяют в промышленных чугунах регулировать во всем интервале.

В результате исследований было установлено, что при прочих равных условиях с ростом количества дендритов в объёме металла прочность композиций чугуна увеличивается, но только до некоторого предела ( $\approx 45\%$ ), в котором происходит качественная смена зависимости, и прирост количества армирующих дендритов не находит отражения в увеличении прочности чугуна (рис. 2).

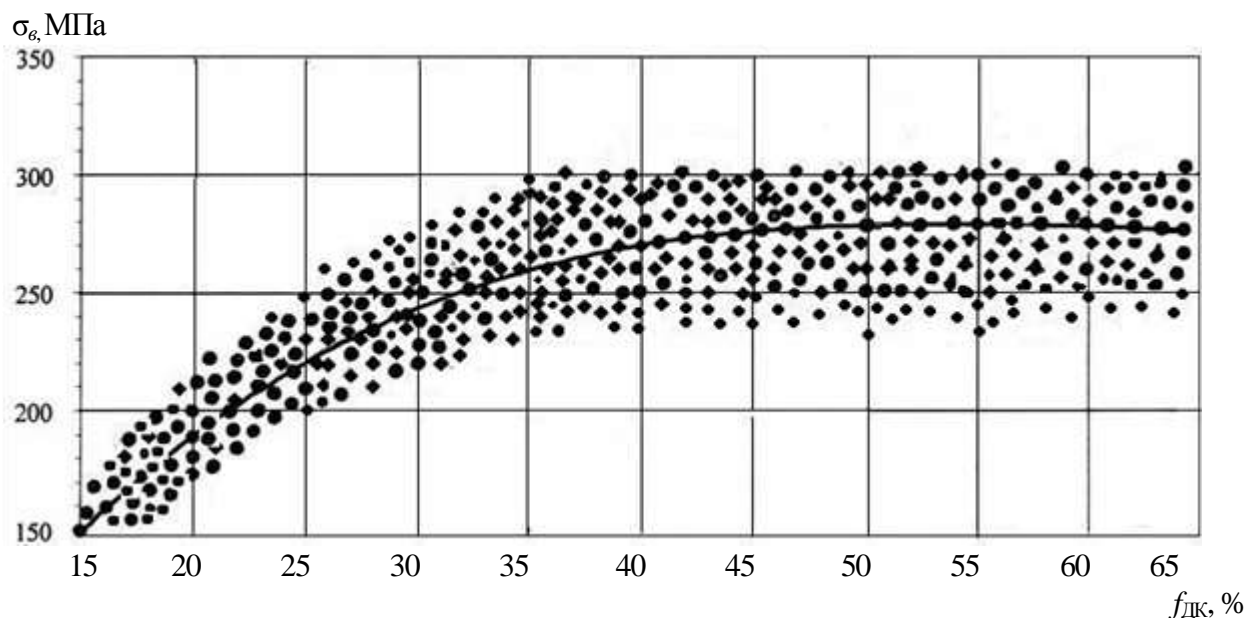


Рис. 2. Зависимость прочности ( $\sigma_s$ ) серого чугуна при растяжении от объёмной доли дендритов ( $f_{\text{дк}}$ )

Для выяснения причин, приводящих к этому, исследовали распределение дендритов относительно приложенной нагрузки в поперечных и продольных сечениях чугунных разрывных образцов, имеющих при одинаковой объёмной доле существенно разные значения прочности.

При анализе было обнаружено, что чугун на стадии дендритного роста затвердевает в соответствии с классической теорией структурообразования. Оставив в стороне вопрос об

образовании зоны замороженных кристаллов, можно утверждать, что происходит образование двух зон. Первой зоны столбчатой кристаллизации, наблюдаемой с внешней поверхности образца и состоящей из дендритов с параллельными осями I порядка, и второй зоны равноосных кристаллов с беспорядочно ориентированными дендритами в его центральных участках, протяженность, которой варьировалась от 0,1 - 0,5 до 1,5 мм.

Таким образом, распределение дендритов относительно приложенной нагрузки различно и может быть стохастическим, транскристаллитным и смешанным (рис. 3).

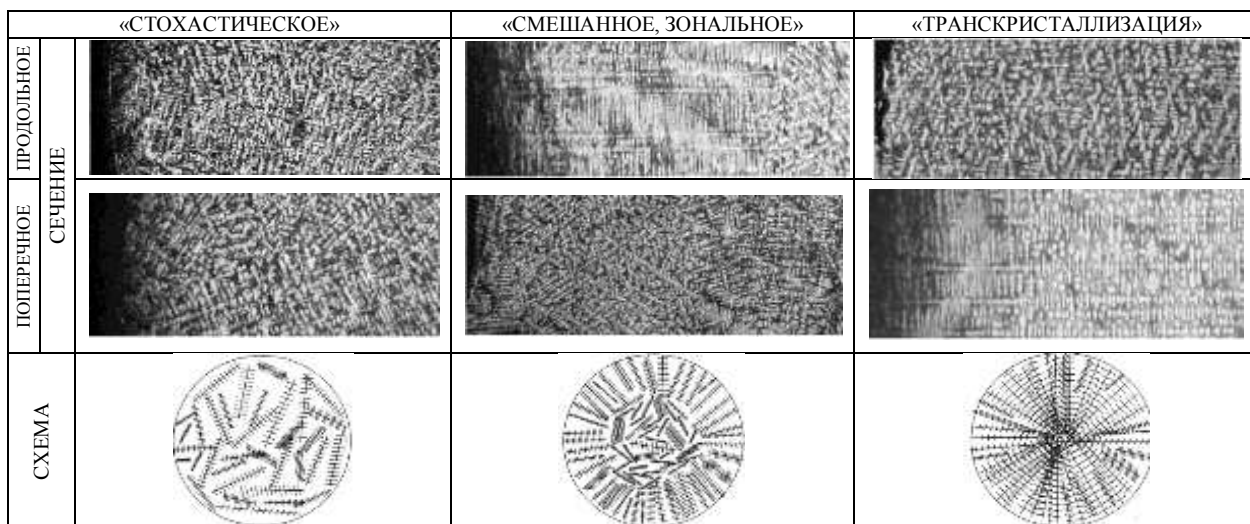


Рис. 3. Распределение дендритных кристаллов в объёме стандартных разрывных образцов,  $\times 15$

Транскристаллитное строение дендритных кристаллов, имеющих развитую ось I порядка и малую длину осей II порядка, наблюдается только при их высокой объёмной доле, и, как правило, направление осей I порядка перпендикулярно приложенному напряжению, что и вызывает уменьшение сопротивления чугуна распространению магистральной трещины, траектория которой легко огибает ветви дендритного каркаса, не пересекая их. Это приводит к тому, что увеличение объёмной доли дендритных ветвей не повышает прочности композиции в целом.

При отсутствии зоны столбчатой кристаллизации примерно в 45% случаях наблюдалось полностью стохастическое распределение армирующих дендритов, соответственно 35% приходилось на смешанное строение. В остальном объёме исследованных образцов было обнаружено (хотя и не имеющее сплошного фронта, а занимавшего только часть объёма в образце) явление транскристаллизации.

Исследования показали, что в промышленных чугунах длина дендритных кристаллов во много раз больше их диаметра  $l_{\text{дк}} = (3 \div 16) \pm 0,94$  мм,  $d_{\text{дк}} = (20 \div 28) \pm 0,85$  мкм, следовательно, отношение длины дендритов к их диаметру ( $l_{\text{дк}} / d_{\text{дк}}$ ) превышает минимально необходимую для волокнистых композиционных материалов величину, которая должна быть более 10.

В то же время при высокой объёмной доле дендритов наблюдается их пакетное строение (рис. 4). Дендритные кристаллы занимают при этом довольно большой объём, так как во время затвердевания разрастаются во всех направлениях.

Относительно приложенной нагрузки дендритные кристаллы имеют пакетное строение и стохастическую ориентацию, а магистральная трещина при распространении либо вызывает их разрушение, либо изменяет своё направление, огибая их, что, несомненно, повышает сопротивление материала разрушению. Чугуны с такими структурами расположены, как правило, на верхнем участке зависимости (рис. 2), обеспечивая прочность  $\approx 300$  МПа.





Рис. 4. Пакетное строение дендритных кристаллов в чугунах,  $\times 7$

Показано, что в серых чугунах с разным количеством дендритов степень влияния размера ячеек эвтектики на прочность неодинакова. Повышение прочности под действием увеличения дисперсности ячеек матрицы наблюдается в чугунах с объемной долей дендритов не более 25 %, а также в чугунах с высоким содержанием дендритов ( $> 45$  %), т. е. когда упрочняющее действие дендритов ослаблено либо недостаточно (рис. 5).

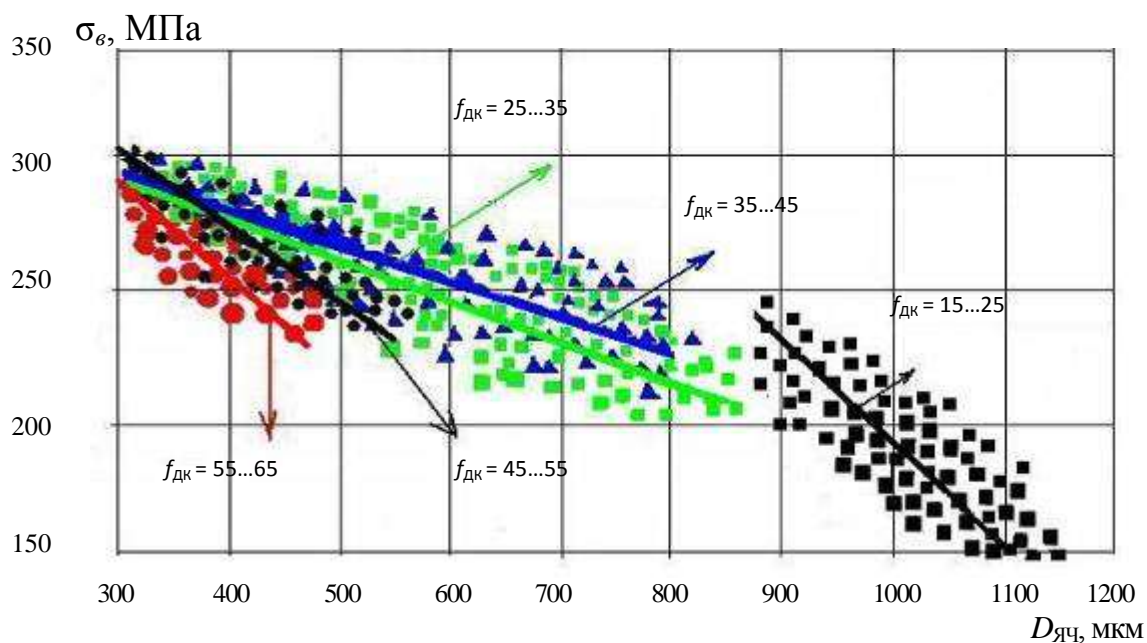


Рис. 5. Зависимость прочности ( $\sigma_b$ ) чугуна от диаметра ячеек эвтектической матрицы ( $D_{яч}$ )

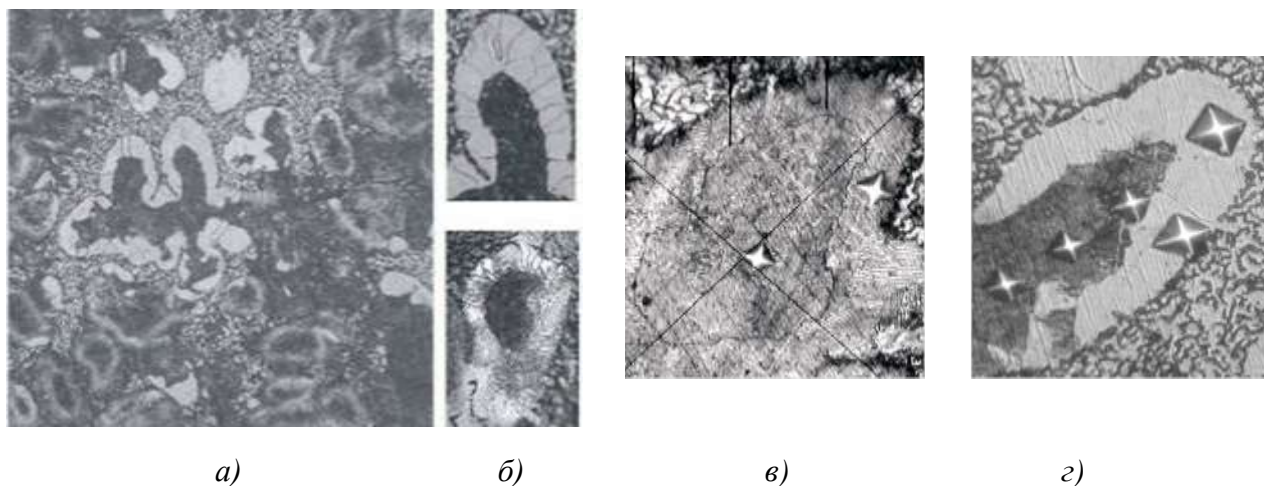
Следующий принцип композиционного упрочнения ВКМ требует, чтобы в композите прочность волокон была больше прочности матрицы ( $\sigma_{в \text{ ВОЛОКНО}} \gg \sigma_{в \text{ МАТРИЦА}}$ ).

В сером чугуне при кристаллизации происходит обогащение дендритов первичного аустенита графитизирующими элементами, которые повышают активность углерода ( $a_c$ ), при этом карбидостабилизирующие элементы (которые снижают  $a_c$ ) обогащают эвтектическую составляющую. Такие особенности микроликвации компонентов вызывают перепад активности углерода  $\Delta a_c$  между микроликвационными зонами «дендрит - эвтектика». Чугун стремится к выравниванию активности углерода, но из-за низкой диффузионной подвижно-

сти компонентов выравнивание  $a_c$  осуществляется только за счёт массопереноса самого углерода из дендритов в эвтектику. Образовавшаяся *ликвационная поляризация* элементов обладает повышенной стойкостью и сохраняется при охлаждении как до интервала эвтектоидного превращения, так и до комнатной температуры, а также сохраняется и усугубляется при последующих повторных технологических или эксплуатационных докритических нагревах чугунных отливок [7].

Данная особенность микроликвационного распределения элементов снижает не только армирующую способность дендритного каркаса, но и прочность чугуна в целом. Так как эвтектоидное превращение формирует в дендритах вместо сорбитообразного перлита с прочностью 800 МПа, менее дисперсный, а следовательно, менее прочный перлит, или свободный феррит с прочностью менее 400 МПа [5]. В работе [8] было установлено, что разупрочняющее действие феррита, расположенного в первичных дендритах, в 15 - 20 раз сильнее, чем феррита, находящегося в эвтектической матрице.

Осуществление условия ( $\sigma_{\text{волокно}} \gg \sigma_{\text{матрица}}$ ) возможно, например, за счёт применения низкомарганцевого чугуна со сбалансированно сниженным содержанием Si, что уменьшает склонность к ферритизации и разупрочнению дендритных ветвей [4]. Однако при металлографических исследованиях промышленных серых чугунов были обнаружены дендритные ветви с сорбитом в сердцевине (HV 269 – 316), который окружен ферритной (HV 128 – 98), или перлитной (HV 239) оболочкой (рис. 6 а, б).



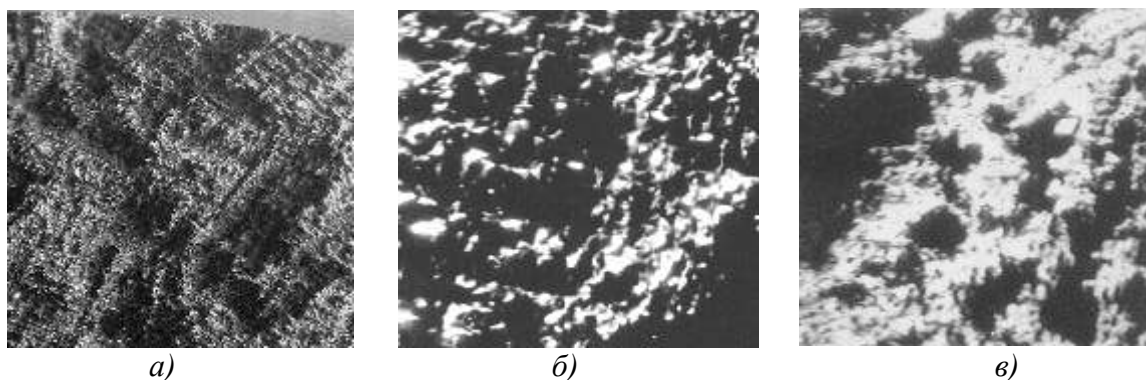
**Рис. 6. Структура дендритных кристаллов с сорбитообразным перлитом (а),  $\times 100$ , и фрагменты ветвей (б) в ферритной (верх) и перлитной (низ) оболочках,  $\times 500$ . Перераспределение углерода в сечении аномальных дендритов при термическом воздействии,  $\times 500$ : в – литая структура; г – обезуглероживание каймы. (Травление 4 %  $\text{HNO}_3$ )**

Термическая стойкость сорбита в центральных зонах дендритов аномального строения оказалась намного выше, чем перлита в штатных дендритах. И даже при полной ферритизации оболочек грубопластинчатого перлита (рис. 6, в, г), сопровождающейся резким падением в этих зонах значений микротвёрдости, а следовательно, и их прочности, прочность внутренних зон за счёт стабильной сорбитообразной структуры сохранялась практически неизменной.

Аномальные дендритные структуры были обнаружены и в чугуне ваграночной плавки (1 плавка на 148 исследованных) и в электропечном чугуне (3 плавки на 106 исследованных) или 0,67 % и 2,83 % соответственно.

В чугуне также необходимо выполнение ещё одного принципа композиционного упрочнения: условия реализации прочной связи между упрочняющими волокнами и матрицей.

Исследования, проведенные с использованием растровой электронной микроскопии, показали, что армирующие дендриты, являясь наиболее прочными структурными элементами, не в полной мере воспринимают разрушающие напряжения и как бы «отслаиваются» от малопрочной эвтектической матрицы (рис. 7). На поверхности разрушения обнажается, по существу, неразрушенный дендритный каркас, наблюдаются выступающие дендритные ветви и регулярно расположенные полости, из которых дендритные ветви «выдернулись», т. е. в чугунах проявляются особенности разрушения, характерные для волокнистых композитов.



**Рис. 7. Поверхность разрушения чугуна:**

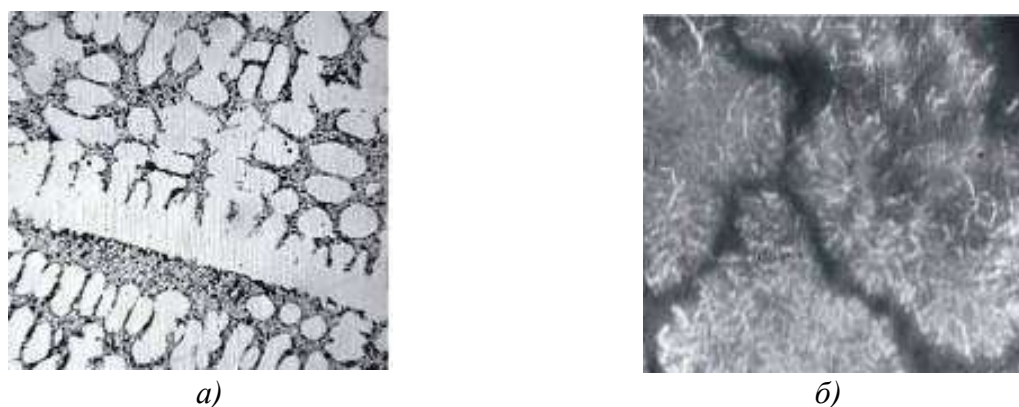
- а* – армирующая дендритная структура на поверхности излома, световая микроскопия,  $\times 10$ ;  
*б* – выступающие армирующие дендриты,  $\times 50$ ;  
*в* – полости от "выдернувшихся" дендритов, растровая электронная микроскопия – РЭМ 250,  $\times 100$

Выполнение требования – усиления связи дендритов и эвтектической матрицы – также возможно реализовать за счет формирования в чугунах аномальной дендритной структуры в виде сорбитообразных дендритных ветвей окруженных сплошной «буферной» ферритной или перлитной оболочкой.

Принципиально важным представляется тот факт, что у всех заготовок чугуна с аномальной структурой дендритов была обнаружена совершенно одинаковая ферритно-графитовая эвтектика с вырожденной формой междендритного графита (рис. 6).

Крайне нежелательная, с точки зрения влияния на прочность чугуна, морфология графита в ферритной матрице, тем не менее, не проявила себя отрицательно в анализируемых композициях. Более того, сравнительно высокие значения прочности в пределах 245–290 МПа при относительно низкой твердости НВ 184–217 МПа обеспечивали этим чугунам хорошие показатели качества  $K = \sigma_v / \text{НВ}$ .

Изучение истинной формы графита методом просвечивающей микрорентгенографии тонких фольг чугуна показало его монокристалльное строение в объеме каждой эвтектической ячейки и "непрорастание" через границу в соседние ячейки (рис. 8).



**Рис. 8. Характер графита в чугунах с аномальной вторичной структурой дендритов,  $\times 100$ :**

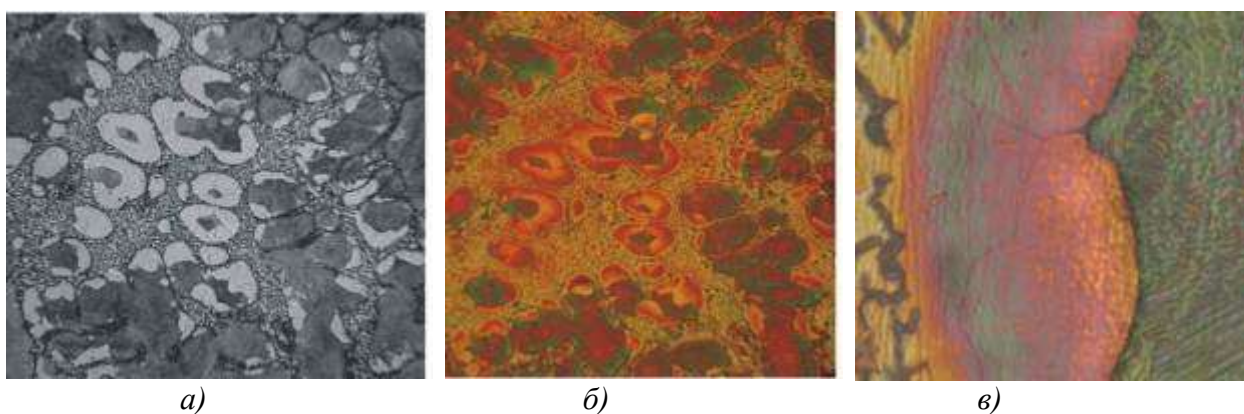
*a* – оптическая микроскопия; *b* – просвечивающая микроскопия

Хотя этого нельзя обнаружить при изучении оптической микроскопией, определяющей только их размер, который в аномальных чугунах был достаточно большой.

Обнаружено, что дисперсность аномальных дендритных структур достаточно низкая, так как расстояние между ветвями второго порядка  $\lambda$  аномальных дендритов составляет 34 мкм, а чугуна штатной кристаллизации 25. Толщины дендритных ветвей с оболочками превышают размеры ветвей в штатных образцах чугуна примерно в 1,4 - 1,8 раза [10].

Проведенные исследования позволили установить, что термокинетические условия кристаллизации в качестве возможной причины формирования аномальных дендритов не являются определяющим фактором.

Однородные ферритные оболочки (рис. 9, *a*) аномальных дендритов при цветном травлении (рис. 9, *в*) приобретают неоднородную окраску, которая характеризует, что внутренняя часть оболочки аномального дендрита содержит кремния меньше, чем центр дендрита, а наружная его превышает.



**Рис. 9. Микроликвационная неоднородность аномальных дендритных ветвей чугуна, ферритная оболочка:**

*a* – травлено ниталем,  $\times 100$ ; *b* – травление в кипящем пикрате натрия  $\times 100$ ;  
*в* – внутренняя граница аномального дендрита  $\times 2500$

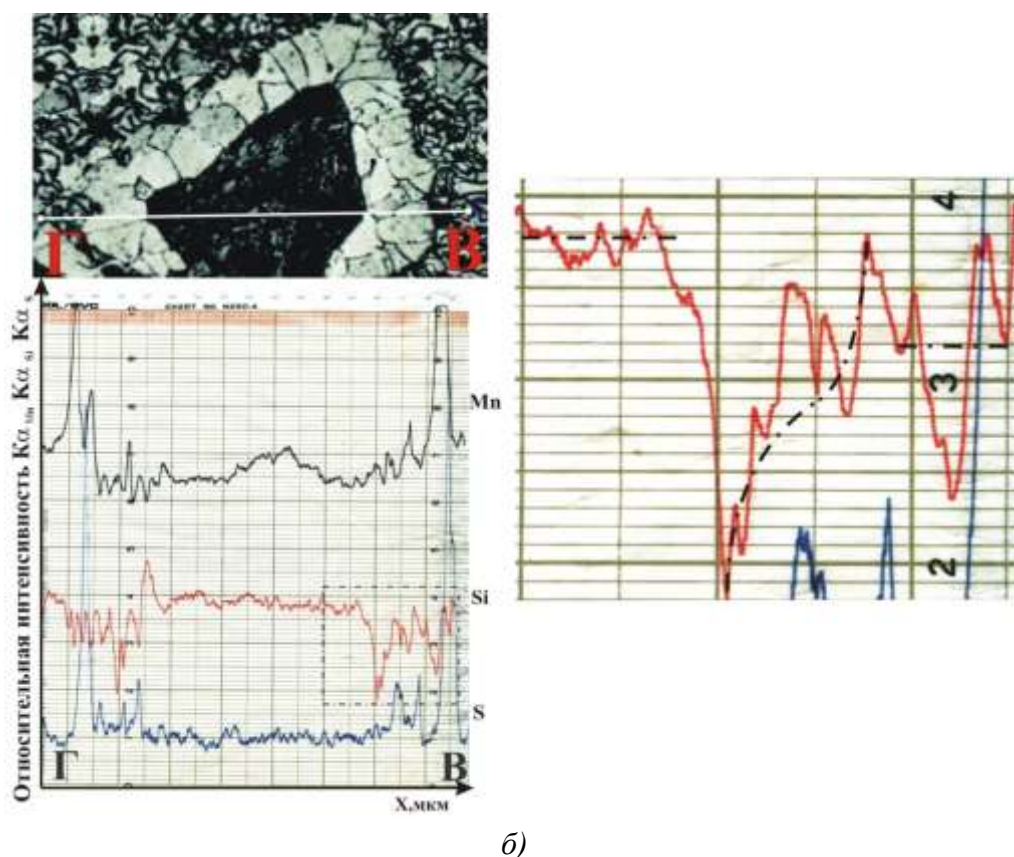
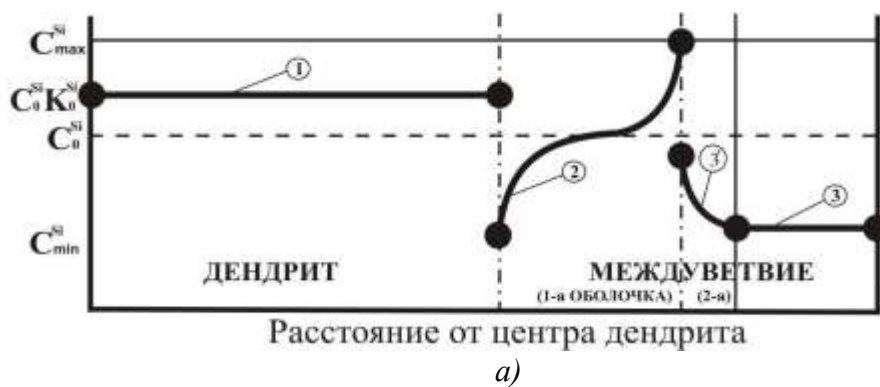
Внутренняя высокоугловая граница (рис. 9, *в*), отделяющие внешние оболочки от центра в дендритном кристалле, имеет достаточную толщину, хотя и появляется только в некоторых ветвях как с ферритными, так и с перлитными оболочками. Также при анализе были идентифицированы ветви без внутренних высокоугловых границ. Установлено, что при этом всегда визуальной отличимой остаётся тонкая внешняя ферритная оторочка, которая окрашена так же, как эвтектический аустенит, но не образует внутри дендрита видимой границы. Она сливается с фоном при обычном травлении и отсутствует у дендритов штатной кристаллизации.

Построенные на основании визуальных оценок изменения цвета и интенсивности окрашивания варианты примерных профилей сегрегационных кривых показали качественный характер сегрегации Si по сечению ветвей в аномальных дендритах (рис. 10). Скачкообразное изменение концентрации Si свидетельствует о многослойном строении аномальных ветвей, включающем в себя последовательно затвердевшие элементы трёх микроликвационных зон: дендритов первичного аустенита, избыточного аустенита внутренней оболочки и осажденного аустенита внешней оболочки.

К концу дендритного роста оставшаяся междендритная жидкость чугуна всё ещё не достигает эвтектической концентрации, и из неё выделяется избыточный аустенит, осаждающийся на первичных дендритах. И хотя к началу эвтектического превращения наложение избыточного аустенита из междендритной жидкости завершает формирование обо-

лочек, далее на дендритных ветвях кристаллизуется эвтектический аустенит путём осаждения на избыточном.

Полученные результаты были в дальнейшем подтверждены данными микрорентгено-спектального анализа [11]. Сканограммы распределения кремния, марганца и серы представлены на рис. 10.



**Рис. 10. Качественный характер сегрегации элементов по сечению ветвей в аномальных дендритах:**

*a* – качественная схема изменения сегрегации Si по радиусу аномального дендритного кристалла при последовательной смене механизмов роста твёрдой фазы: 1 – первичный аустенит (непрерывный рост); 2 – избыточный аустенит (послойный рост); 3' – осажденный аустенит; 3 – эвтектическая смесь; *б* – изменение интенсивности характеристического излучения элементов (Mn, Si и S) дендритах аномального строения. Справа увеличенный фрагмент сканограммы участка трассы с усреднением сегрегационной кривой кремния

Содержание Si в эвтектике оказалось меньше, чем в центральных зонах дендритных ветвей ( $C_{\text{эвт}}^{\text{Si}} = 2,52 \%$ ;  $C_{\text{ден}}^{\text{Si}} = 2,72 \%$ ), однако ферритная оболочка содержала еще большее количество кремния (2,92 %).

Таким образом, по профилю сегрегационных кривых удалось идентифицировать разные механизмы роста твердой фазы, сменяющие друг друга в условиях реального за- твердевания технических чугунов.

Дальнейшие исследования выполнялись в рамках допущений гипотезы о термодинамической природе обнаруженных аномалий дендритной структуры. Предположили, что наиболее вероятно возникновение в чугуне аномального строения дендритных кристаллов связано с блокировкой дендритного роста поверхностно - активными примесями.

Анализ химического состава каждого из чугунов, имеющих такую структуру (рис.6), выявил наличие примесей обладающих положительной адсорбцией по Гиббсу, суммарное количество которых вполне могло стать причиной преждевременного блокирования дендритного роста (табл. 1).

Таблица 1

#### Содержание примесей в чугунах с аномальной структурой дендритных кристаллов

Содержание примесей, % масс							
As	Sn	Sb	Pb	Zn	Bi	Se	B
0,006 ÷ 0,008	0,006 ÷ 0,009	0,001	0,001 ÷ 0,004	0,005 ÷ 0,008	0,001	0,001 ÷ 0,005	0,001

Полученные данные (табл. 1) позволили подобрать состав комплексной добавки, введенной в расплав чугуна, и получить дендриты аномального строения (рис. 6). При этом прочность полученный чугунов находились в пределах марок СЧ 30 – СЧ 35, а штатных чугунов марок СЧ 20 – СЧ 25.

#### Выводы

На основе проведенных исследований установлена значимость параметров первичной структуры серого чугуна, ответственных за повышение прочности в чугунных отливках. Показано, что объёмная доля дендритов в промышленных чугунах изменяется от 15 до 65 %. При этом при прочих равных условиях с ростом количества дендритных кристаллов в объёме материала прочность чугуна увеличивается, но только до некоторого предела ( $\approx 45 \%$ ), что определяется распределением дендритов в объёме материала относительно приложенной нагрузки и их строением. Дальнейшее увеличение количества дендритов в материале не влияет на изменение величины прочности в сторону понижения или повышения его значения.

Показано, что в промышленных композициях чугуна с разным количеством дендритов степень влияния размера ячеек эвтектической матрицы на прочность неодинакова. Повышение прочности под действием увеличения дисперсности ячеек эвтектики наблюдается в чугунах с объёмной долей дендритов не более 25 %, а также в чугунах с высоким содержанием дендритов ( $> 45 \%$ ), т. е. когда упрочняющее действие дендритов ослаблено либо недостаточно.

Проведенные исследования выявили ранее неизвестные пути трансформации дендритной структуры чугуна, основанные на взаимосвязи между его составом и закономерностями структурообразования, что позволило разработать на этой основе новый метод регулирования прочностных свойств чугунных отливок.

#### Библиографический список

1. **Гиршович, Н. Г.** Первичная структура как критерий оценки механических свойств серого чугуна / Н. Г. Гиршович, А. Я. Иоффе, Г. А. Косников // Прогрессивное формообразование, металлургия и термическая обработка. Ленингр. дом науч.- техн. пропаганды. 1968. – 30 с.

2. Паттерсон, В. Микроструктура чугуна и его свойства // 29-й Международный конгресс литейщиков. – М.: Машиностроение, 1967. С. 55–63.
3. Троицкий, Г. Н. Свойства чугуна / Г. Н. Троицкий; под ред. М. Г. Окнова. – Ленинград – Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии 1941. – 290 с.
4. Ильинский, В. А. О композитном характере структуры кристаллизации чугунов с различной степенью эвтектичности / В. А. Ильинский, Л. В. Костылева // Изв. АН СССР. Металлы. 1986. № 5. С. 116–118.
5. Литвиненко, М. Н. Перспективы формирования в чугунных отливках структуры и свойств композиционного материала / М.Н. Литвиненко [и др.] // Литейное производство. 1994. № 12. С. 7–9.
6. Ильинский, В. А. Зависимость прочности серого чугуна от его первичной структуры / В.А. Ильинский, Л. В. Костылева // Литейное производство. 1997. № 5. С. 25–26.
7. Ильинский, В. А. Закономерности микроликвации в железоуглеродистых сплавах и новые возможности литейной технологии / В. А. Ильинский, А. А. Жуков, Л. В. Костылева // 55-й Международный конгресс литейщиков. – М., 1988. С. 1–11.
8. Конструкционные материалы: справочник / Б. Н. Арзамасов [и др.]; под ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
9. Эллиотт, Р. Управление эвтектическим затвердеванием / Р. Эллиотт // Москва: Металлургия. 1987. – 352 с.
10. Палаткина, Л. В. Исследование аномалий дендритной структуры чугуна / Л. В. Палаткина, Л. В. Костылева, В. А. Ильинский // Металлы. 2010. № 03. С. 35–41.
11. Ильинский, В. А. Исследование микроликвационной неоднородности дендритных ветвей серого чугуна / В. А. Ильинский, Л. В. Костылева, Л. В. Палаткина // Металлургия машиностроения. 2009. № 06. С. 9–15.

*Дата поступления  
в редакцию 13.04.2012*

**L.V. Palatkina**

## **FEATURES OF STRUCTURIZATION IN GREY PIG-IRON**

Volgograd State Technical University

The analysis of primary structure of pig-iron is made and the possible variant of its transformation influencing durability growth in pig-iron castings is considered.

*Key words:* gray pig-iron, composite hardening, dendrite, eutectic, activity of carbon (*ac*), durability.

УДК 658.562.012.7:621.7.004

Е.И. Яровая<sup>1</sup>, В.А. Ульянов<sup>1</sup>, М.М. Спасская<sup>1</sup>, А.Ю. Гусев<sup>2</sup>

### МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
Федеральное государственное унитарное предприятие ФНИЦ «Научно-исследовательский институт им. Ю.Е. Седакова»<sup>2</sup>

Представлена аналитическая оценка технического уровня заготовительного производства на базе литья, обработки давлением и обработки резанием. Многокритериальная оптимизация представлена через математическую модель комплексного показателя качества, выраженную в виде целевой функции  $F(m, \lambda)$  от конструктивных ( $\lambda_k$ ), технологических ( $\lambda_T$ ), эксплуатационных ( $\lambda_s$ ) и экономических ( $\lambda_{эk}$ ) параметров деталей, что позволяет наиболее точно организовать выбор процесса изготовления.

*Ключевые слова:* многокритериальная оптимизация, заготовительное производство, показатели качества, квалиметрия.

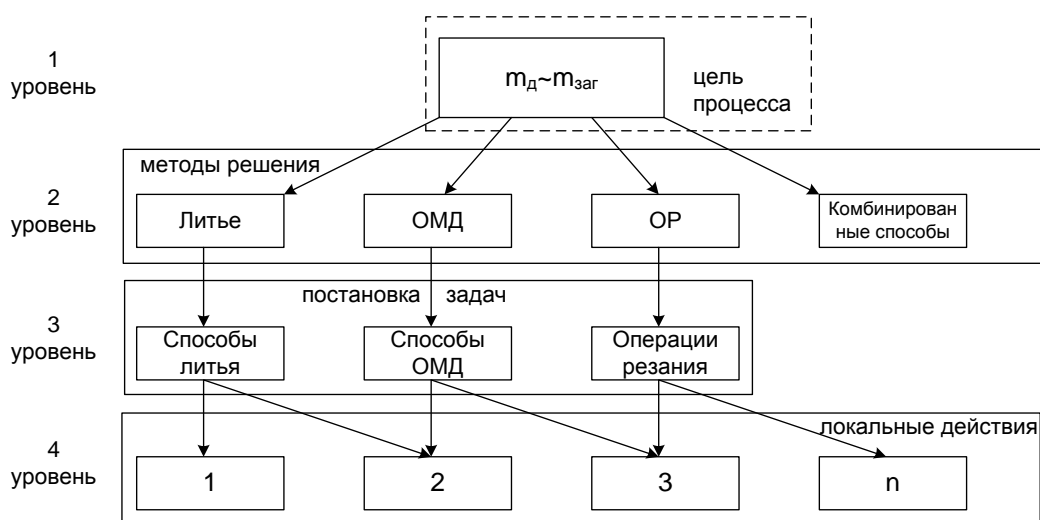
Методы оценки предпочтительности технологического процесса в заготовительном производстве чисто субъективны, так как часто невозможно определить раздельное влияние множества факторов на качество, а ограниченность баз данных по их влиянию не заменяет высококлассного специалиста.

Объективная оценка предпочтительности процесса требует статистических данных и количественных методов оценки существующих технологий, основанных на абсолютных и относительных критериях, в связи с чем, многокритериальная оптимизация актуальна.

Высокое качество изделий во многом зависит от принципа, заложенного в технологическом процессе, при оптимальных режимах процесса и конструкции детали.

Цель работы - построение оптимальной модели, отражающей технически реализуемые возможности заготовительного производства, обеспечивающие наиболее точный выбор процесса изготовления.

Морфологическая схема операций заготовительного производства, построенная с использованием аналога [1], представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Структура морфологической матрицы формирования заготовок литьем, ОМД и другими способами:**

$m_d, m_{zag}$  - масса деталей и заготовки; 1...n - возможные комбинации процессов, в зависимости от последовательности обработки



Все четыре уровня могут иметь одинаковые способы решения внутри уровня. Ниже третьего уровня проявляются оригинальные комбинации указанных процессов, например, замена конструкции на сборную, сварную и т.д. Выбрав основные показатели для оптимизации в количестве пяти:  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$  – и разбив их на четыре группы, структурная связь примет вид, показанный на рис. 2.



**Рис. 2. Показатели, включенные в оценку предпочтительности процесса:**

$R_1 \dots R_5$  - показатели, влияющие на качество продукции на уровнях 1–4

Обобщенный критерий оптимальности (рис. 2) запишется в виде

$$F(m; R(\lambda)) = \frac{1}{S} \prod_{i=1}^S R_i^{m_i}, \quad (1)$$

где  $S$  - количество групп показателей, участвующих в оценке;  $R_i$  - обобщенный показатель свойств группы;  $m_i$  - коэффициент весомости  $i$ -го показателя данной группы;  $\lambda$  - самостоятельная величина, описывающая конструктивные  $\lambda_k$ , технологические  $\lambda_r$ , эксплуатационные  $\lambda_s$  и экономические  $\lambda_{\text{ЭК}}$  параметры:  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_r, \lambda_s, \lambda_{\text{ЭК}})$ .

Задача сводится к нахождению оптимального  $\lambda_{\text{опт}}$ , которая достигается при  $\max(F_k)$ , где  $k=1 \dots S$  - номер процесса на уровне  $n$ .

$$\lambda_k = \Phi_k(\lambda_{ki}) \quad (i = 1, 2 \dots K),$$

$$\lambda_r = \Phi_r(\lambda_{ri}) \quad (i = 1, 2 \dots L),$$

$$\lambda_s = \Phi_s(\lambda_{si}) \quad (i = 1, 2 \dots T),$$

$$\lambda_{\text{ЭК}} = \Phi_{\text{ЭК}}(\lambda_{\text{ЭК}i}) \quad (i = 1, 2 \dots C),$$

где  $K, L, T, C$  - частные критерии оптимальностей показателей свойств.

В случае неравноценных критериев  $R_i$  показатель  $m_i > 0$  и при условии  $R_{\text{max}i} \neq R_i$  определится следующим образом:

$$m_i = \frac{\delta_i}{\sum_{k=1}^S \delta_k}, \quad (2)$$

$$\delta_i = \frac{R_{\text{max}} - R_{\text{min}}}{R_{\text{max}}} = 1 - \frac{R_{\text{min}}}{R_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где  $R_i$  - показатель качества в данной группе  $\lambda$ ;  $R_{\text{max}}, R_{\text{min}}$  - размах показателей для данной группы;  $R_{\text{max}i}, R_i$  - максимальное и текущее значения показателя качества в данной группе  $R_i$ ;  $\sum_{i=1}^S m_i = 1$ ;  $i=1, 2 \dots S$ .  $\sum_{k=1}^S \delta_k$  - сумма показателей весомости одной группы;  $S$  - количество показателей, участвующих в оценке данного уровня ( $K, L, T, C$ ).

Частные критерии оптимальности приводятся к безразмерному виду с помощью линейного преобразования:

$$R_i(\lambda) = \frac{R_i(\lambda) - R_{i\text{min}}}{R_{i\text{max}} - R_{i\text{min}}} (\beta - \alpha) + \alpha;$$

где  $\beta, \alpha$  - одинаковые шкалы измерений [2].

Если критерии весомости в оценке качества равноценны в данной группе, то  $m_i=1/S$   $i=1...2S$ ,

Конструктивный критерий  $\lambda_k$  имеет вид

$$\lambda_k = \Phi(\lambda_{ki}) = \prod_{i=1}^k R_i^{m_i}, \quad (4)$$

если оценивать  $\lambda_k$  по точности массы, сложности конструкции, габаритности (т. е. по трем параметрам), то

$$\lambda_k = \prod_{i=1}^3 R_i^{m_i}, \quad (5)$$

где  $R_i$  – соответствующий критерий сложности, массы, габаритности. Величина  $m_i$  определится при равнозначности критериев следующим образом:  $m_i = 1/3=0,33$  ( $i=1, 2, 3$ ),  $k$  – количество критериев, участвующих в оценке ( $k=3$ ).

Весовые коэффициенты относительной важности частных критериев выражаются в следующем виде:  $m=\{m_1...m_m\}$ , причем  $\sum_{i=1}^n m_i = 1$  на любом уровне оценки, где  $n$  – количество частных критериев;  $m$  - весовые коэффициенты частных критериев.

При малом количестве  $m$ -критериев оптимальности весовые коэффициенты могут быть определены в виде средневзвешенного геометрического:

$$m_i = \frac{\frac{1}{\lg\left(\frac{R_{in}}{P_{in}}\right)}}{\sum_{i=1}^n \lg(R_{in} - P_{in})}, \quad (6)$$

где  $P_{in}, P_{ипр}$  - номинальные и предельные значения частных критериев рассматриваемого уровня.

С увеличением числа критериев оптимальности значимость весовых коэффициентов  $m$  уменьшается, тогда вводится параметр их масштабирования  $K$  в виде [3]

$$\sum_{i=1}^m m_i = K \quad (7)$$

С использованием шкал масштабирования [3] можно получить нормированные значения показателей функций  $\Phi_k^H(\lambda_k), \Phi_{\vartheta}^H(\lambda_{\vartheta}), \Phi_T^H(\lambda_T), \Phi_{\varepsilon k}^H(\lambda_{\varepsilon k})$  в виде

$$\Phi_k^H(\lambda_{kj}) = \frac{[b_q(\lambda_{kj}) - b_q^-(\lambda_{kj}^-)]\Lambda_k}{[b_q^+(\lambda_{kj}^+) - b_q^-(\lambda_{kj}^-)]\Lambda_{k-1}} (\beta - \alpha) + \alpha, \quad (8)$$

$$\Phi_{\vartheta}^H(\lambda_{\vartheta j}) = \frac{[b_q(\lambda_{\vartheta j}) - b_q^-(\lambda_{\vartheta j}^-)]\Lambda_{\vartheta}}{[b_q^+(\lambda_{\vartheta j}^+) - b_q^-(\lambda_{\vartheta j}^-)]\Lambda_{\vartheta-1}} (\beta - \alpha) + \alpha, \quad (9)$$

$$\Phi_T^H(\lambda_{Tj}) = \frac{[b_q(\lambda_{Tj}) - b_q^-(\lambda_{Tj}^-)]\Lambda_T}{[b_q^+(\lambda_{Tj}^+) - b_q^-(\lambda_{Tj}^-)]\Lambda_{T-1}} (\beta - \alpha) + \alpha, \quad (10)$$

$$\Phi_{\varepsilon k}^H(\lambda_{\varepsilon kj}) = \frac{[b_q(\lambda_{\varepsilon kj}) - b_q^-(\lambda_{\varepsilon kj}^-)]\Lambda_{\varepsilon k}}{[b_q^+(\lambda_{\varepsilon kj}^+) - b_q^-(\lambda_{\varepsilon kj}^-)]\Lambda_{\varepsilon k-1}} (\beta - \alpha) + \alpha, \quad (11)$$

где  $\lambda_i$ -текущее значение вектора  $\lambda$ ;  $\Lambda$ -множество значение вектора  $\lambda$  ( $K, L, T, C$ );  $\lambda^+, \lambda^-$  значения  $\lambda$ , при которых  $b_q(\lambda)=\max$  и  $b_q(\lambda)=\min$ ;  $\beta, \alpha$  - постоянные шкал масштабирования.

Тогда критерий оптимизации может быть выражен в виде [4]

$$F^{\text{опт}}(m, R(\lambda)) = \max_{\lambda_j \in \Lambda} F(m, \lambda) =$$

$$= \max\left\{ \prod_{q=1}^K m_{qk} \Phi^H(\lambda_{kj}) \prod_{q=1}^L m_{qз} \Phi^H(\lambda_{з}) \prod_{q=1}^T m_{qT} \Phi^H(\lambda_T) \prod_{q=1}^C m_{qэз} \Phi^H(\lambda_{эз}) \right\} \quad (12)$$

Оптимизация может проводиться по любому компоненту вектора  $\lambda$ , например:  $\lambda_k = \text{var}$ ,  $\lambda_з = \text{const}$ ,  $\lambda_T = \text{const}$ ,  $\lambda_{эз} = \text{const}$ ; либо по всем компонентам одновременно:  $\lambda_k = \text{var}$ ,  $\lambda_з = \text{var}$ ,  $\lambda_T = \text{var}$ ,  $\lambda_{эз} = \text{var}$ . Как частный случай, по кривым припуска на механическую обработку [5] можно оценить  $\lambda$  и предпочтительность способа изготовления в зависимости от размеров детали (рис. 3).

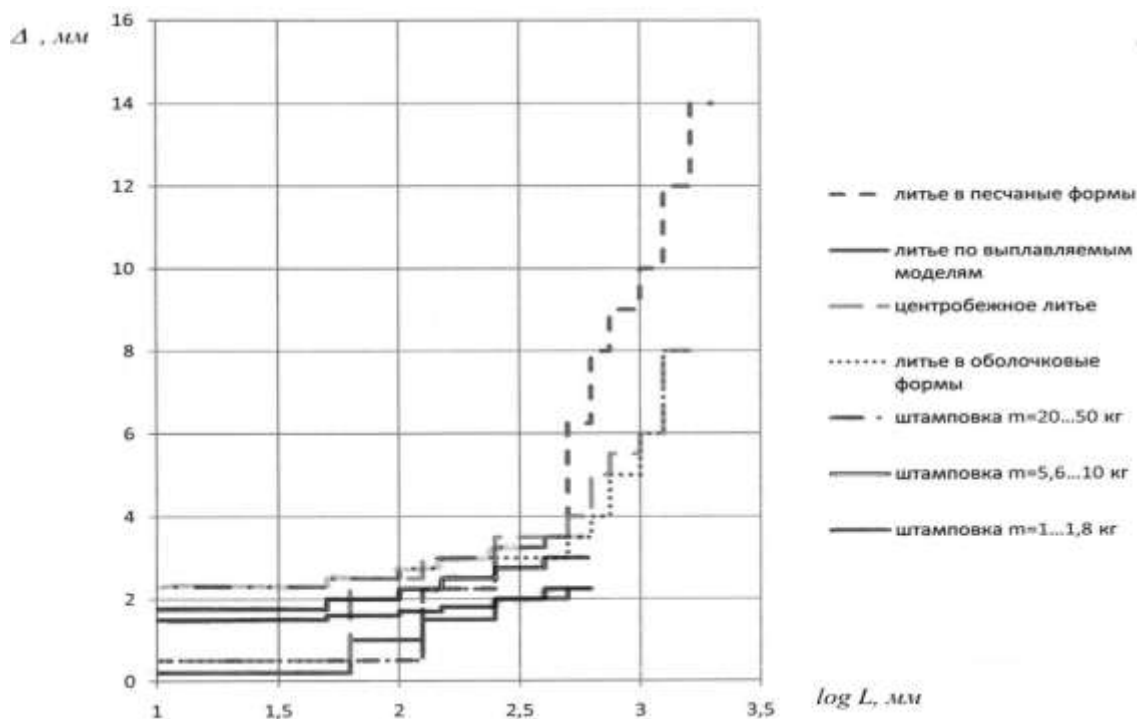


Рис. 3. График изменения припусков  $\Delta$  от габаритных размеров и массы детали

$\lambda_{\text{кл}} > \lambda_{\text{кшт}} > \lambda_{\text{кор}}$ , где  $\lambda_{\text{кл}}$ ,  $\lambda_{\text{кшт}}$ ,  $\lambda_{\text{кор}}$  – конструктивный показатель относительного критерия массы при получении заготовок литьем, штамповкой и обработкой резанием.

При увеличении припусков и допусков на деталях стоимость единицы продукции изменяется непропорционально: уменьшение допуска в два раза увеличивает затраты на изготовление в три раза (рис. 4).

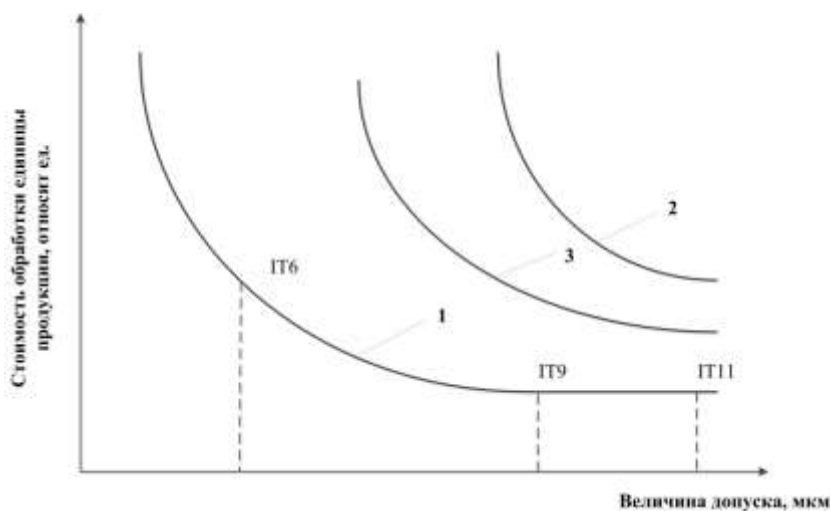
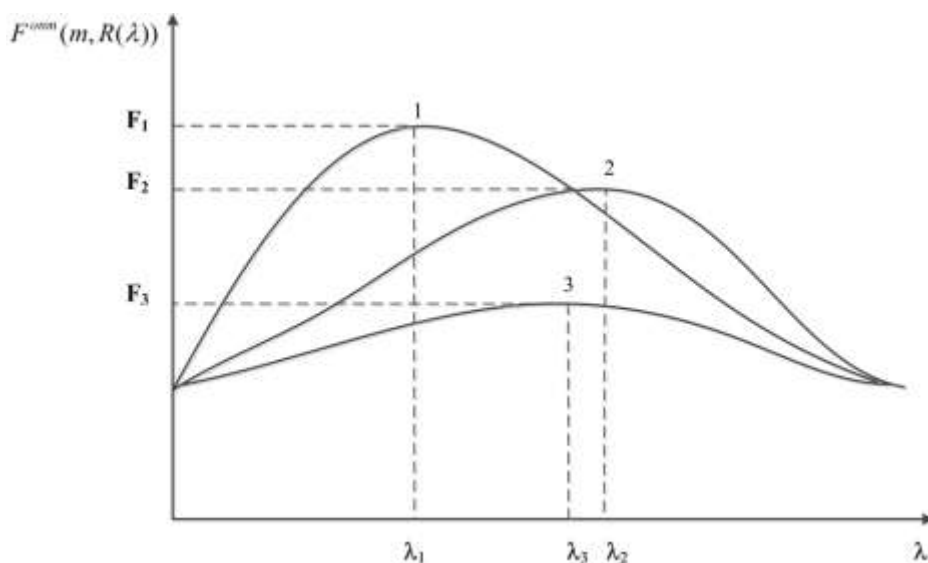


Рис. 4. Изменение стоимости изготовления от значения допуска:  
1 – механическая обработка; 2 – литье; 3 – обработка давлением

Для оценки предпочтительности процесса одного фактора  $\lambda_k$  в данном случае недостаточно.

Условная концептуальная характеристика трех технологических процессов, выполненная на основе многокритериальной оценки  $F^{\text{опт}}(m, R(\lambda))$  графически имеет вид, представленный на рис. 5.

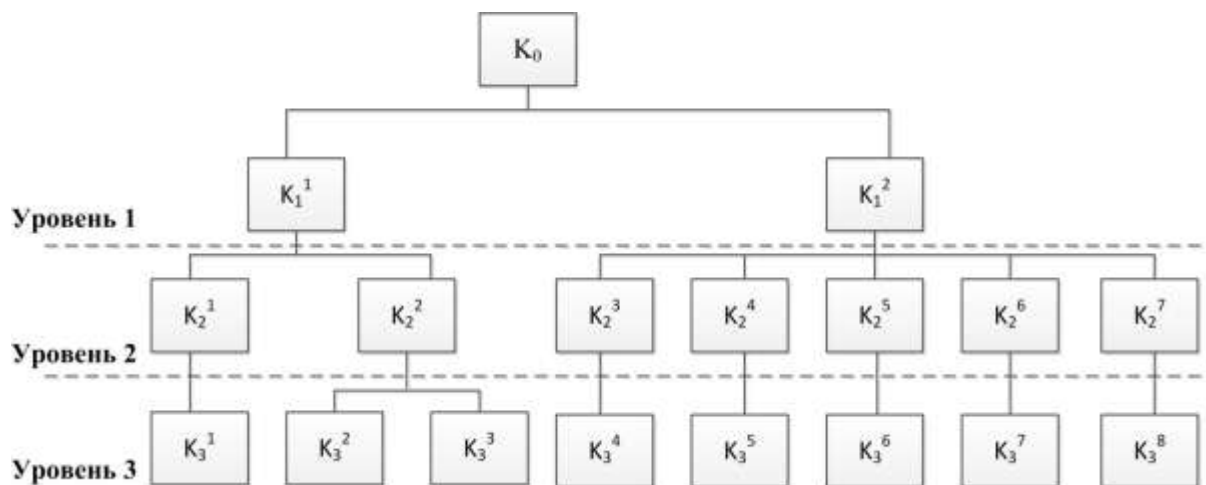


**Рис. 5. Характеристики заготовительных процессов при различных критериях оптимизации  $F^{\text{опт}}(m, R(\lambda))$ :**

1, 2, 3 – концептуальные кривые многокритериальной оптимизации,  
 $F_1$  – наиболее предпочтительна, чем  $F_2$  и  $F_3$ ;  $F_3$  – наименее предпочтительна

Большое количество критериев, влияющих на предпочтительность ( $F^{\text{опт}}(m, R(\lambda))$ ) технологических процессов изготовления (12), требует машинной обработки.

Рассмотрим наиболее простой случай оценки предпочтительности процесса, выраженную через обобщенный показатель качества, используя иерархическую схему уровней его формирования [6, 7] при получении заготовок литьем и обработкой давлением (рис. 6).



**Рис. 6. Обобщенная иерархическая структура формирования качества заготовок литьем и обработкой давлением:**

$K_0$  – обобщенный показатель качества;  $K_1^1, K_1^2$  – качество форм и материалов (дефектность форм);  $K_2^1, K_2^2$  – деформация металла и формы;  $K_2^3 \dots K_2^7$  – групповые показатели, характеризующие сложность форм, профилей, конструктивную прочность, обрабатываемость, химическую неоднородность и т.д.;  $K_3^1 \dots K_3^7$  – геометрические, интроскопические, механические свойства подмножеств, пластичность материала, информативность, точность, оперативность, чувствительность и т.д.

В указанной схеме иерархии качества при получении заготовок литьем и обработкой давлением для оценки предпочтительности используются интегральный ( $K_{\text{и}}$ ), обобщенный ( $K_{\text{о}}$ ), групповой ( $K_{\text{г}}$ ), единичный ( $K_{\text{и}}$ ) и комплексный показатели ( $K_{\text{к}}$ ), которые сложно выразить количественно, т.е. показатели на уровнях 0, 1, 2, 3 математически не согласуются. Так, согласование между точностью и экономической целесообразностью при ковке отсутствует (минимальная точность и низкая материалоемкость), что усложняет выбор критерия оптимизации.

Точность оценки через обобщенный показатель качества зависит от правильности расчета коэффициентов весомости на уровнях 0, 1, 2, 3, а согласование с практическими данными зависит от состояния оборудования:

- новое оборудование при  $\Delta \ll T$  запас точности  $0,3 \leq \Delta_m \leq 0,5$  ( $\Delta$  - припуск;  $T$  – допуск;  $\Delta_m$  – отклонение по массе);
- удовлетворительное состояние оборудования  $0,5 \leq \Delta_m \leq 0,75$ ;
- изношенное оборудование  $\Delta_m = 0,95 - 1,0$ .

Упрощенный вариант выбора предпочтения можно представить, приняв, что вся схема (рис. 6) представлена в виде пяти основных показателей технологических процессов изготовления на начальной стадии проектирования, тогда критерий оптимизации можно выразить: следующим образом

$$F^{\text{опт}} = \prod_{i=1}^5 K_i^{m_i}, \quad (13)$$

где  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  – относительные показатели коэффициента использования материала, выхода годного, весовой точности, трудо- и энергоемкости, которые можно рассчитать через среднегеометрические показатели машиностроительного производства [9];  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  – коэффициенты весомостей взятых показателей, рассчитываемых по (6), занесены в табл. 1.

Таблица 1

**Коэффициенты весомости и критерии показателей для детали «рычаг» из стали 35 массой 3 кг с толщиной стенки 10 мм, изготавливаемой литьем в кокиль или штамповкой в открытом штампе**

Технология изготовления	Коэффициент весомости	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$\sum_{i=1}^5 m_i$
Литье (кокиль)		0,7 $K_j=0,75$	0,01 $K_j=0,8$	0,12 $K_j=0,9$	0,09 $K_j=0,9$	0,08 $K_j=1,16$	1
Штамповка (облойная)		0,65 $K_j=0,67$	0,12 $K_j=0,69$	0,11 $K_j=1$	0,06 $K_j=0,09$	0,06 $K_j=0,16$	1
Обработка резанием		0,33 $K_j=0,3$	0,31 $K_j=0,3$	0,2 $K_j=0,3$	0,08 $K_j=0,01$	0,08 $K_j=0,01$	1

$$F^{\text{опт}}_{\text{литье}} = 0,75^{0,7} \cdot 0,01^{0,8} \cdot 0,9^{0,12} \cdot 0,9^{0,09} \cdot 1,16^{0,08} = 0,807.$$

$$F^{\text{опт}}_{\text{ОМД}} = 0,67^{0,65} \cdot 0,69^{0,12} \cdot 1^{0,11} \cdot 0,09^{0,06} \cdot 0,16^{0,06} = 0,572.$$

$$F^{\text{опт}}_{\text{ОР}} = 0,3^{0,33} \cdot 0,3^{0,31} \cdot 0,3^{0,2} \cdot 0,01^{0,08} \cdot 0,01^{0,08} = 0,174.$$

Из приведенных расчетов следует, что предпочтительнее технология изготовления детали литьем. В расчете не учтены технологические и эксплуатационные свойства материала, при введении которых возникает необходимость замены технологии изготовления или материала.

### Выводы

Рассмотрен иерархический уровень связи между технологическими процессами и качеством. Разработана математическая модель критериев оптимизации, на основании которой оценивается технико-экономическая эффективность технологии изготовления.

Применение разработанной методики оценки предпочтительности технологии позволяет избежать неоправданных рисков и дополнительных затрат на обеспечение качества при проектировании.

### Библиографический список

1. Чернега, Д.Ф. Цветное литье: справочник / Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук. – М.: Машиностроение, 1989. – 519 с.
2. Беляков, В.В. Многокритериальная оптимизация в задачах оценки подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2001. – 272 с.
3. Доугерти, К. Введение в эконометрику / К. Доугерти. – М.: ИНФРА-М, 2009. – 465 с.
4. Балдин, К.В. Эконометрика / К.В. Балдин, О.Ф. Быстров, М.М. Соколов. – М.: "ЮНИТИ" – 2004. – 254 с.
5. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски. – введ. 1990 – 01 – 07. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1989.
6. Мигачев, Б.А. О квалиметрии объектов металлообработки в кузнечном производстве / Б.А. Мигачев, В.Б. Волков // Кузнечно-штамповочное производство, 1997. №12. С. 18–20.
7. Федюкин, В.К. Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции / В.К. Федюкин. – М.: КноРус, 2009. – 320 с.
8. Кане, М.М. Управление качеством продукции машиностроения / М.М. Кане, А.Г. Суслов, О.А. Горленко. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.
9. Дальский, А.М. Технология конструкционных материалов: учебник / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.

*Дата поступления  
в редакцию 13.04.2012*

**E.I. Yarovaia<sup>1</sup>, V.A. Ulyanov<sup>1</sup>, M.M. Spasskaya<sup>1</sup>, A.Yu. Gusev<sup>2</sup>**

### MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF BLANK PRODUCTION

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>,  
Federal State Research Institute Y.E. Sedakova<sup>2</sup>

**Purpose:** The work purpose was construction of the optimum model reflecting technically realized possibilities of blank production, providing the most exact choice of process of details production.

**Design/methodology/approach:** Multiobjective optimization is presented through mathematical model of a complex indicator of the quality, expressed in the form of criterion function from constructive, technological, operational and economic parameters of details that allows to organize a choice of process of manufacturing most precisely.

**Findings:** The hierarchical model of communication between technological processes and quality is considered. The mathematical model of an estimation of technical and economic efficiency of manufacturing techniques of details is developed.

**Research implications:** Application of the developed technique of an estimation of preference of technology allows to avoid unjustified risks and additional expenses for quality at designing.

*Key words:* Multiobjective optimization, blank production, technical level, qualimetry.

## ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 544.643.076.2

А.А. Храмов, Ю.Л. Гунько, О.Л. Козина, М.Г. Михаленко

### ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ПО ВЫСОТЕ ЭЛЕКТРОДОВ НИКЕЛЬ-ЖЕЛЕЗНОГО АККУМУЛЯТОРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены экспериментальные данные по распределению разрядных плотностей тока по высоте оксидно-никелевого и железного электродов как в системе аккумулятора, так и в системе с инертным электродом. Объяснено различие в распределении тока между оксидно-никелевым и железным электродами. Определен электрод, обладающий наиболее равномерным распределением разрядной плотности тока по высоте электрода.

*Ключевые слова:* разряд, распределение тока, железный электрод, оксидно-никелевый электрод, пресованная конструкция, вальцованная конструкция, металлокерамическая конструкция, ламельная конструкция.

Исследование распределения тока по высоте электродов различных конструкций проводилось во многих работах. Из результатов этих исследований, сделанных на никель-железном аккумуляторе с ламельными электродами [1], никель-кадмиевом аккумуляторе с металлокерамическими электродами [2] и свинцовом аккумуляторе с намазными электродами [3], можно выявить следующую закономерность распределения тока по высоте электрода: наибольший ток сосредотачивается в верхних зонах электрода, а наименьший – в нижних зонах. Такая неравномерность распределения тока по высоте электродов является причиной, ограничивающей высотные параметры электродов, а также понижает возможные удельные электрические характеристики аккумуляторов.

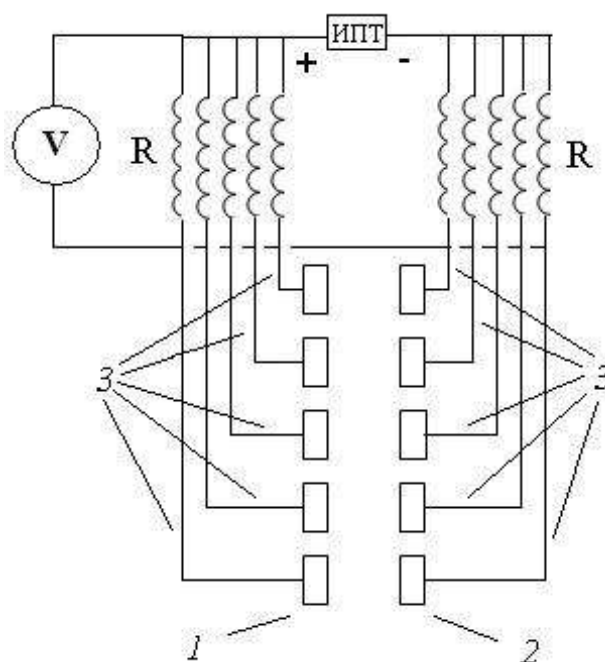
В указанных работах рассматривается распределение тока только в режиме разряда. При заряде так же, как и при разряде, распределение тока по высоте электродов неравномерное. Неравномерность распределения тока при заряде оказывает влияние на распределение тока при последующем разряде, и поэтому исследования по распределению тока необходимо проводить в рамках полного цикла – заряда-разряда.

Исследование распределения тока по высоте электродов в никель-железном аккумуляторе проводилось на ячейке с составными электродами. Для измерения токов каждый электрод (положительный – оксидно-никелевый и отрицательный – железный) аккумулятора разбивался по высоте на отдельные секции, к каждому из которых подводился токоотвод (рис. 1). Токоотводы от каждой секции соединялись вместе через общий провод. По падению напряжения на калиброванных сопротивлениях модели рассчитывались токи для каждой секции.

Исследования проводились на макетах НЖ-аккумуляторов с положительным и отрицательным электродами следующих конструкций:

- 1) металлокерамический оксидно-никелевый электрод и пресованный железный электрод из магнетита;
- 2) металлокерамический оксидно-никелевый электрод и вальцованный железный электрод из железной губки;
- 3) ламельный оксидно-никелевый электрод и ламельный железный электрод; и в ячейках с противоположным инертным электродом из просечённой никелевой фольги.

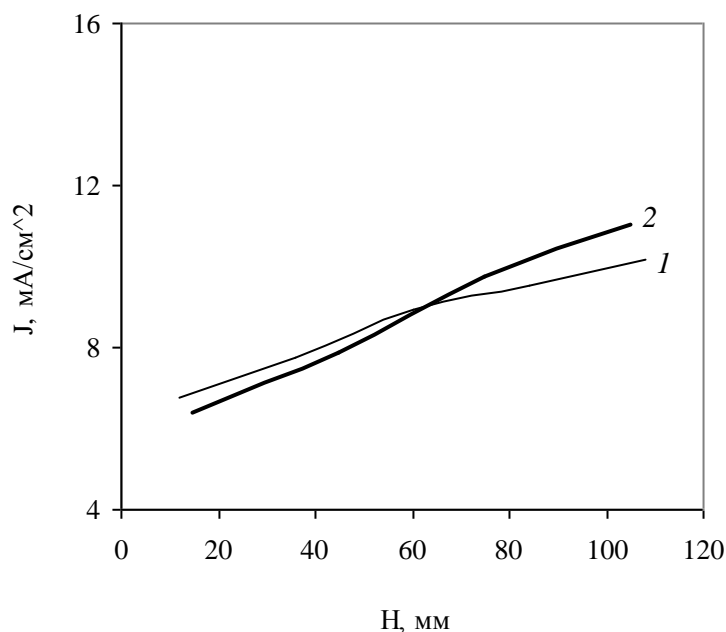
Высота каждого электрода, состоящего из пяти секций, составляла 120 мм.



**Рис. 1. Электрическая схема для измерения распределения тока по высоте положительного и отрицательного электродов НЖ-аккумулятора:**

*1* – составной положительный электрод; *2* – составной отрицательный электрод; *3* – токоотводы

Результаты исследований по распределению разрядных плотностей тока по высоте оксидно-никелевых и железных электродов различных конструкций при использовании инертного противоиэлектрода представлены на рис. 2 и рис. 3.

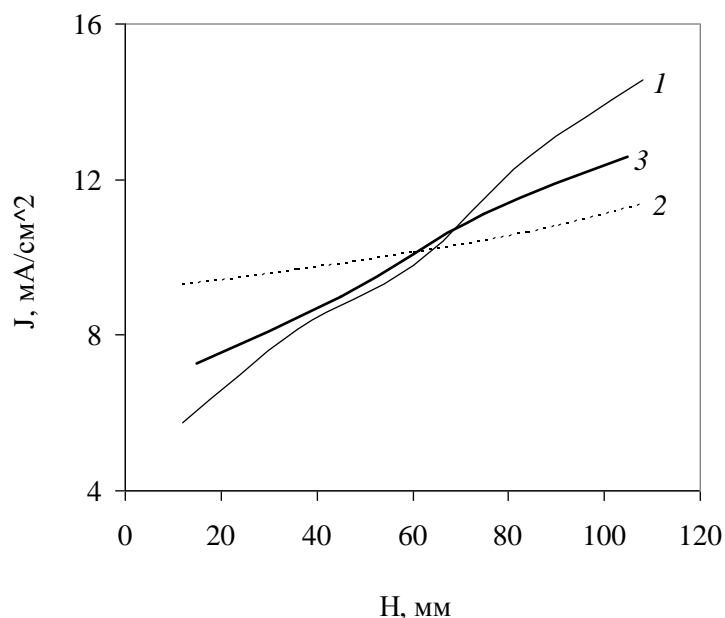


**Рис. 2. Распределение разрядных плотностей тока по высоте металлокерамического (1) и ламельного (2) оксидно-никелевых электродов:**

противоэлектрод – просечённая никелевая фольга;

*J* – разрядная плотность тока; плотность тока разряда –  $8,6 \text{ mA/cm}^2$ ;  
время от начала разряда – 0,5 ч





**Рис. 3. Распределение разрядных плотностей тока по высоте прессованного из магнетита (1), вальцованного из железной губки (2) и ламельного (3) железных электродов: противозлектрод – просечённая никелевая фольга;  $J$  – разрядная плотность тока; плотность тока разряда –  $10 \text{ мА/см}^2$ ; время от начала разряда –  $0,5 \text{ ч}$**

У оксидно-никелевых электродов ламельной и металлокерамической конструкций плотности тока различаются незначительно (рис. 2). Лучшее распределение тока у оксидно-никелевого электрода металлокерамической конструкции, по сравнению с ламельной, может быть связано с более высокой электропроводностью токоотводящей основы.

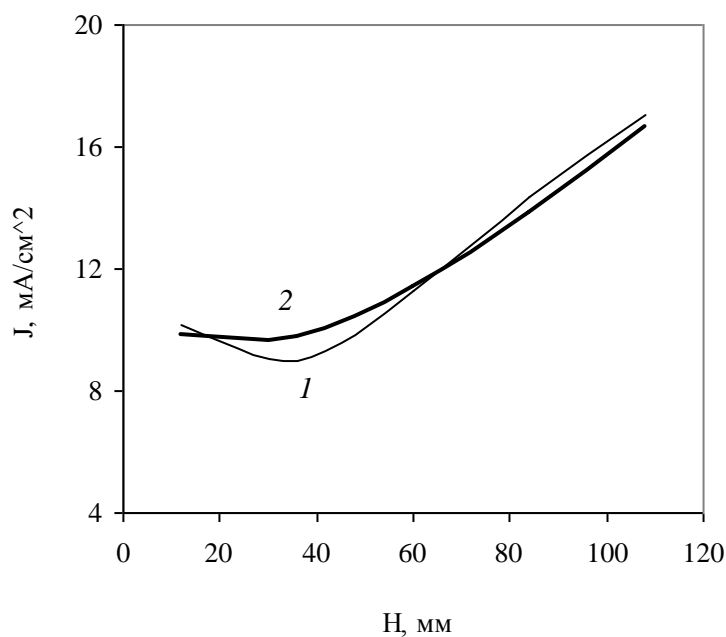
Большая неравномерность в распределении разрядной плотности тока наблюдается у железных электродов различных конструкций. Наиболее равномерное распределение тока наблюдается для железного электрода, изготовленного вальцеванием железной губки, а наименее равномерное распределение – у железного электрода, изготовленного прессованием активной массы из магнетита (рис. 3), что связано с конструктивными отличиями этих электродов.

Необходимо отметить, что на равномерность распределения тока по высоте одновременно влияют следующие факторы: электропроводность токоотводящей основы (ламели, металлического каркаса) и сопротивление активной массы вещества (сюда можно включить сопротивление электрохимическому процессу, сопротивление активного вещества, сопротивление электролита в порах электрода). Чем больше электропроводность токоотводящей основы и чем больше сопротивление активной массы вещества (в случае постоянства сопротивления электролита), тем более равномерным будет распределение тока по высоте.

У железных электродов вальцованной и прессованной конструкций активное вещество в заряженном состоянии представляет собой металлический железный каркас, на поверхности которого в процессе разряда формируются продукты окисления железа. В процессе разряда у вальцованного электрода из железной губки сопротивление электролита в порах, в отличие от прессованного электрода из магнетита, резко возрастает, и распределение тока по высоте становится более равномерным.

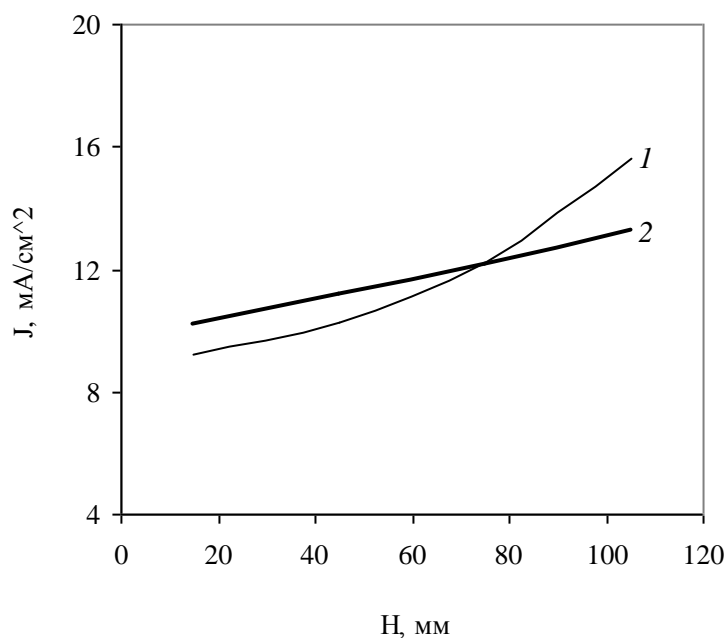
У электродов ламельной конструкции из-за большой толщины и низкой степени перфорации ламельной ленты в процессе разряда происходит быстрое снижение концентрации электролита. Это сказывается как на омических потерях в порах, так и на величине поляри-

зации при анодном окислении железа, и соответственно, приводит к наиболее равномерному распределению тока по высоте электрода такого типа.



**Рис. 4.** Распределение разрядных плотностей тока по высоте металллокерамического оксидно-никелевого (1) и вальцованного железного (2) электродов в НЖ-аккумуляторе:

$J$  – разрядная плотность тока; плотность тока разряда –  $12 \text{ мА/см}^2$ ;  
время от начала разряда –  $0,5 \text{ ч}$

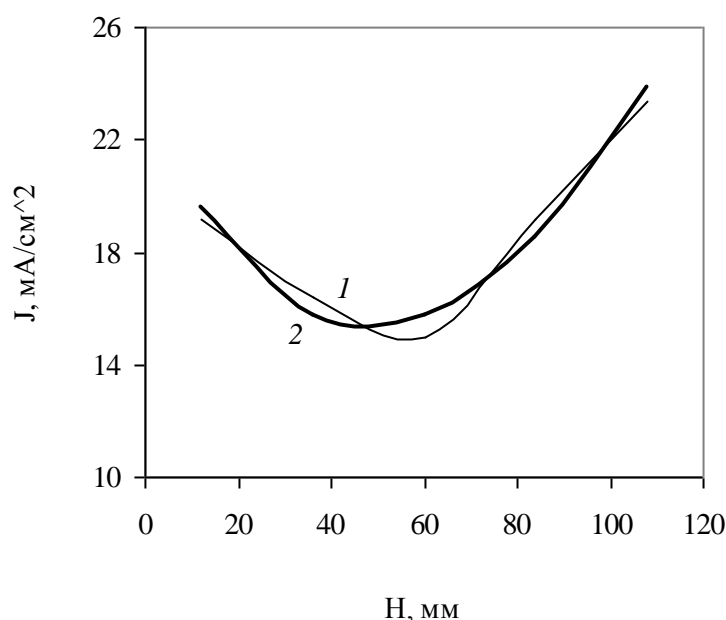


**Рис. 5.** Распределение разрядных плотностей тока по высоте ламельного оксидно-никелевого (1) и ламельного железного (2) электродов в НЖ-аккумуляторе:

$J$  – разрядная плотность тока; плотность тока разряда –  $12 \text{ мА/см}^2$ ;  
время от начала разряда –  $0,5 \text{ ч}$

Исследование распределения тока по высоте электродов непосредственно в никель-железном аккумуляторе показало значительное отличие от характера распределения тока в

системе с инертным противоэлектродом. Наиболее равномерное распределение тока по высоте электрода наблюдается у железного электрода, а наименее равномерное – у оксидно-никелевого, как в аккумуляторах ламельного, так и безламельного типа. Более равномерное распределение тока у вальцованного (рис. 4), ламельного (рис. 5) и прессованного (рис. 6) железных электродов, по сравнению с оксидно-никелевыми электродами, может быть связано с более высокой электропроводностью токоотводящей основы электрода. Более высокая электропроводность основы ламельного железного электрода, чем у ламельного оксидно-никелевого электрода, связана с тем, что во время формирования ламельного железного электрода внутри его ламели, где находится активная масса, образуется металлический железный каркас, что и повышает электропроводность токоотводящей основы.



**Рис. 6. Распределение разрядных плотностей тока по высоте металлокерамического оксидно-никелевого (1) и прессованного железного (2) электродов в НЖ-аккумуляторе:**

$J$  – разрядная плотность тока; плотность тока разряда –  $18,6 \text{ мА/см}^2$ ;  
время от начала разряда –  $0,5 \text{ ч}$

Таким образом, в случае использования инертного электрода среди различных типов железных электродов наиболее равномерным распределением тока по высоте обладает вальцованная конструкция из железной губки. У оксидно-никелевого электрода в этом случае наиболее равномерным распределением тока по высоте обладает металлокерамическая конструкция. В никель-железном аккумуляторе наиболее равномерным распределением тока по высоте обладает железный электрод.

#### Библиографический список

1. **Новаковский, А.М.** Влияние высоты электродов на напряжение никель-железного аккумулятора / А.М. Новаковский, В.В. Болотовская, Н.Ю. Шибяева // Исследования в области электрических аккумуляторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. С. 54–59.
2. **Мороз, В.П.** Разработка моделей и исследование стационарного распределения электрохимического процесса по высоте электродов никель-кадмиевого аккумулятора / В.П. Мороз, [и др.] // Сборник работ по химическим источникам тока. Л.: Энергия, 1978. Вып. 12. С. 32–35.

3. Ягнятинский, В.М. Распределение падения напряжения и плотности тока по поверхности электрода свинцового аккумулятора / В.М. Ягнятинский, В.К. Лужин, В.И. Львова // Исследования в области электрических аккумуляторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. С. 15–23.

*Дата поступления  
в редакцию 23.04.2012*

**A.A. Khramov, Yu.L. Gunko, O.L. Kozina, M.G. Mikhalenko**

### **INFLUENCE OF ELECTRODES' CONSTRUCTION ON A VERTICAL DISTRIBUTION OF CURRENT IN A NICKEL-IRON ACCUMULATOR**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

**Purpose:** Determinate a vertical distribution of current on positive and negative electrodes of a nickel-iron accumulator.

**Design/methodology/approach:** The experimental data was gotten with physical modeling on sectional electrodes.

**Findings** A uniformity of current on the iron electrode is better than a uniformity of current on the oxide-nickel electrode. The metal-ceramic oxide-nickel electrode has a feature for example a maximal current concentrates on the top and at the bottom of electrode.

**Research limitations/implications** An iron electrode's electroconductivity of current collector is high. A uniformity of current on the bar electrode is better than a uniformity of current on the rolled and press electrodes.

*Key words:* discharge, distribution of current, iron electrode, oxide-nickel electrode, press construction, rolled construction, metal-ceramic construction, bar construction.

УДК 543. 386

Е.П. Комова, Е.В. Скоробогатова, А.П. Арбатский, В.Р. Карташов

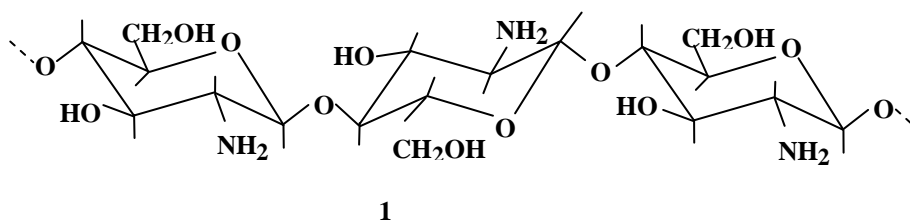
**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ХИТОЗАНА С ИОНАМИ НЕКОТОРЫХ d-МЕТАЛЛОВ  
В ВОДНОМ РАСТВОРЕ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Установлено комплексообразование хитозана (молекулярная масса 120 кДа) в водном растворе уксусной кислоты с ионами  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ . Участие в образовании координационной связи атомов азота и кислорода подтверждено методом ИК-спектроскопии и спектрофотометрическим методом. Определены степени превращения ионов металлов в комплекс и количество молей хитозана, вступивших во взаимодействие с одним молем иона металла.

*Ключевые слова:* хитозан, тяжелые металлы, микроэлементы, комплексообразование.

Комплекс физико-химических свойств хитозана (**1**) обуславливает его широкое практическое применение, в том числе, в пищевых технологиях и производстве биологически активных добавок [1-6].

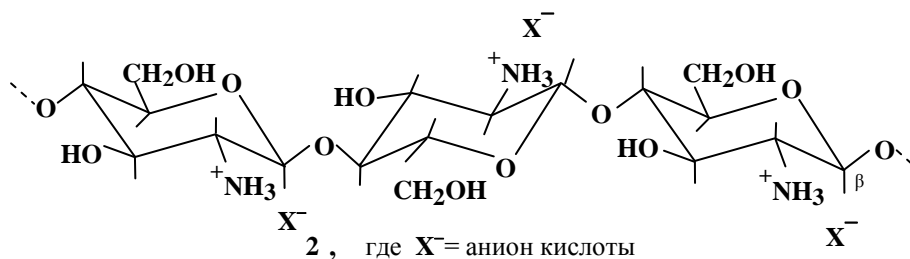


Среди множества показаний к использованию хитозана в лечебно-профилактических целях отмечается его способность выводить из живых организмов тяжелые металлы, такие как ртуть, свинец, кадмий. Результаты многочисленных химических исследований показывают, что хитозан обладает высокими сорбционными свойствами в отношении широкого круга ионов металлов, имеющих d- или f-электронную конфигурацию.

Общепринято считать, что процессы сорбции обусловлены образованием комплексов ионов металлов с функциональными и в первую очередь с аминными группами хитозана. На сорбционную емкость полимера влияют многие факторы. Она зависит от pH водной среды, способа получения хитозана из хитина, его степени деацетилирования, молекулярной массы полимера, размеров гранул и полидисперсности. В динамических условиях результат сорбции зависит как от термодинамических, так и от кинетических факторов.

Анализ имеющихся литературных данных [3] показывает, что сорбционные свойства хитозана в отношении ртути и свинца часто проявляются в большей степени, чем в отношении других металлов. Вместе с тем, имеются данные полного извлечения, например, из морской воды наряду с ртутью ионов цинка, кобальта и меди [7]. Поэтому в целом зависимость сорбции хитозаном тяжелых металлов от их химической природы является неоднозначной.

В производстве пищевых продуктов и биологически активных добавок, наряду с хитозаном (**1**), применяют его растворимые в воде производные и, в частности, в виде аммониевой соли (**2**), где аминные группы протонированы и имеют положительный заряд:



В ряде продуктов питания хитозан находится в кислой среде. В подобных условиях полимер также частично или полностью присутствует в солевой форме. И даже в тех случаях, когда хитозан употребляется с пищей в виде суспензии в нейтральной форме, в растворе соляной кислоты желудочного сока при pH 1–2,5 [9] можно также ожидать его практически полного превращения в состояние (2), где  $X^- = Cl^-$ .

При движении продукта по пищеварительному тракту и увеличении pH в кишечнике до значений 7–8 состояние аминных групп полимера будет изменяться.

В аммониевой соли (2) на атомах азота нет свободных электронных пар, и образование координационной связи между ними и ионами металлов по донорно-акцепторному типу происходить не может. Тем не менее, взаимодействие солей хитозана (2) с ионами металлов в водных растворах возможно за счет других механизмов [8, 10, 11, 12].

Так, согласно данным работы [10], гидрохлорид хитозана (2,  $X^- = Cl^-$ ) практически полностью связывает ионы железа. Ранее в работах [8, 11, 12] было показано, что гидрохлорид хитозана взаимодействует с ионами  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  до образования равновесных количеств реагентов и продуктов реакции. Степени превращения ионов металлов в комплекс увеличиваются с увеличением относительных количеств гидрохлорида хитозана. Этому способствует также повышение pH при сохранении гомогенных условий. Как правило, наибольшее связывание наблюдается для ионов меди.

В данной работе мы приводим результаты исследования взаимодействия хитозана (ХТЗ) (молекулярная масса 120 кДа, степень деацетилирования 80%) с ионами  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  в водном растворе 0,2 М уксусной кислоты.

Соли металлов использовали в виде кристаллогидратов соответствующих нитратов марки ч.д.а. Концентрации солей в 0,2 М водной уксусной кислоте контролировали титрованием растворов этилендиаминотетрауксусной кислотой по известным методикам. Так как гидроксиды указанных металлов имеют низкие значения произведений растворимости, то была проверена возможность определения их содержания в условиях реакции титрованием водным раствором NaOH и с применением метода кондуктометрии [13]. Отклонения результатов такого анализа от данных титрованием этилендиаминотетрауксусной кислотой составляло для разных ионов от 1,5 до 7,5% ( $\alpha = 0,95$ ,  $n = 5$ ). Концентрацию хитозана в растворах также контролировали титрованием NaOH с применением метода кондуктометрии. Погрешность анализа не превышала 4%.

Реакции проводили при начальных концентрациях хитозана ( $[ХТЗ]_0$ ) и ионов металлов ( $[M^{2+}]_0$ ) от 0,02 до 0,08 моль/л ( $t = 25^\circ C$ ). Соотношения  $[ХТЗ]_0/[M^{2+}]_0$  изменяли от 1:4 до 4:1. На кондуктометрических кривых титрования реакционных смесей раствором NaOH имеются участки титрования равновесных количеств групп  $-NH_3^+$  полимера, образования гидроксидов из катионов металла, не вступивших во взаимодействие, и взаимодействия щелочи с продуктами реакции. Опытным путем было показано, что состояния равновесия в реакциях устанавливаются сразу после смешения реагентов.

По данным о равновесных концентрациях участников реакции рассчитывали количество молей хитозана (в расчете на содержание групп  $-NH_3^+$ ), вступивших во взаимодействие с одним молем иона металла ( $n$ ). А также определяли степень превращения ионов металлов в комплекс ( $x$ ) как отношение прореагировавших чисел молей ионов металлов к их начальному количеству. В табл. 1 приведены усредненные данные многочисленных опытов.

Таблица 1

Количество молей лиганда, вступивших во взаимодействие с одним молем иона металла ( $n$ ) и степени превращения ( $x$ ) ионов  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  в реакциях с хитозаном в 0,2 М водном растворе уксусной кислоты

[ХТЗ] <sub>0</sub> /[M <sup>2+</sup> ] <sub>0</sub>	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	
	n	x	n	x	n	x	n	x	n	x
4:1	4,0	0,50	4,0	0,58	4,1	0,50	4,0	0,77	4,0	0,75
3,5:1	3,6	0,51	3,5	0,57	3,5	0,47	3,5	0,75	3,5	0,77
3:1	3,0	0,49	3,0	0,56	3,0	0,46	3,0	0,63	3,0	0,79
2,5:1	2,5	0,47	2,5	0,59	2,5	0,45	2,5	0,64	2,5	0,85
2:1	2,0	0,45	2,0	0,58	2,0	0,46	2,0	0,61	2,0	0,80
1,7:1	1,7	0,47	1,7	0,58	1,7	0,47	1,7	0,61	1,7	0,81
1,4:1	1,4	0,45	1,4	0,54	1,4	0,58	1,5	0,57	1,5	0,80
1,2:1	1,2	0,47	1,2	0,49	1,2	0,55	1,2	0,51	1,2	0,84
1:1	1,0	0,41	1,0	0,46	1,0	0,48	1,0	0,48	1,0	0,76
1:1,2	0,8	0,38	0,8	0,44	0,8	0,45	0,8	0,45	0,8	0,79
1:1,4	0,7	0,30	0,7	0,40	0,7	0,41	0,7	0,43	0,7	0,80
1:2	0,5	0,28	0,5	0,30	0,5	0,37	0,5	0,33	0,5	0,85
1:4	0,4	0,21	0,5	0,25	0,5	0,31	0,4	0,25	0,4	0,87

Обращает на себя внимание высокая степень превращения ионов  $\text{Cu}^{2+}$  в продукты их взаимодействия с хитозаном. При всех исследованных соотношениях реагентов ее значения близки к 0,8 (80%). Для ионов  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$  степени превращения увеличиваются при увеличении относительных количеств хитозана. Однако для ионов кобальта, никеля и цинка увеличение  $x$  наблюдается лишь при изменении соотношений  $[\text{ХТЗ}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$  от 1:4 до 1:1. При дальнейшем увеличении отношений  $[\text{ХТЗ}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$  до 4:1 значения  $x$  практически не изменяются и являются одинаковыми для каждого из указанных ионов. Наибольшее количество связывания этих ионов хитозаном в пределах ошибки эксперимента составляет  $\approx 50\%$ . Для ионов  $\text{Cd}^{2+}$  наблюдается монотонное изменение степени превращения с увеличением отношения  $[\text{ХТЗ}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$ , и при  $[\text{ХТЗ}]_0/[\text{M}^{2+}]_0 = 4:1$  она становится сравнимой со значением  $x$  при взаимодействии хитозана с ионами меди.

Из данных о количестве молей ХТЗ, вступивших во взаимодействие с одним молем иона металла, видно, что в отличие от аналогичных реакций гидрохлорида хитозана (**2**,  $\text{X}^- = \text{Cl}^-$ ) в воде [8,11], где при различных начальных концентрациях реагентов наблюдаются постоянные стехиометрические соотношения, в данной реакции подобная закономерность не выполняется. При изменении  $[\text{ХТЗ}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$  от 1:4 до 4:1 эти соотношения изменяются от 0,5 до 4.

Вероятной причиной несоблюдения в исследуемой реакции постоянных стехиометрических соотношений является взаимодействие ионов металлов с разными формами хитозана. В растворе уксусной кислоты полимер находится в состоянии равновесия



где R – углеводный остаток звена полимера.

В приближении идеального раствора при данных концентрациях хитозана содержание групп  $-\text{NH}_2$  в полимере может составлять 8–10%. О возможности их присутствия в используемых растворах свидетельствуют данные ИК-спектров пленок, полученных испарением растворителя. В области деформационных колебаний связей N–H наблюдается поглощение с перекрывающейся структурой полос. Полоса поглощения с максимумом при  $1530 \text{ см}^{-1}$  и плечом при  $1640 \text{ см}^{-1}$  относится к колебаниям групп  $-\text{NH}_3^+$ . Полоса поглощения с максимумом при  $1570 \text{ см}^{-1}$  и плечом при  $1670 \text{ см}^{-1}$  соответствует колебаниям групп  $-\text{NH}_2$  [14].

В связи с этим, можно полагать, что ионы металлов взаимодействуют как с полиме-

ром в форме соли (**2**,  $X^- = \text{CH}_3\text{COO}^-$ ), так и с хитозаном (**1**): с его аминными группами по донорно-акцепторному механизму.

О координационных взаимодействиях ионов металлов с аминными группами свидетельствуют данные спектральных исследований. В электронных спектрах растворов пленок,

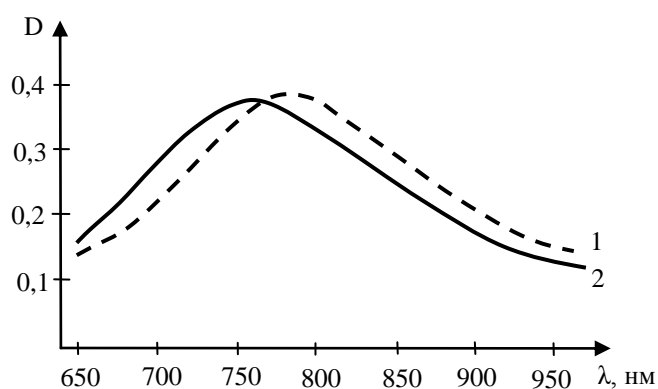


Рис. 1. Электронные спектры раствора  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  (**1**) и пленки из реакции  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  с ХТЗ в 0,2 М водном растворе уксусной кислоты (**2**)

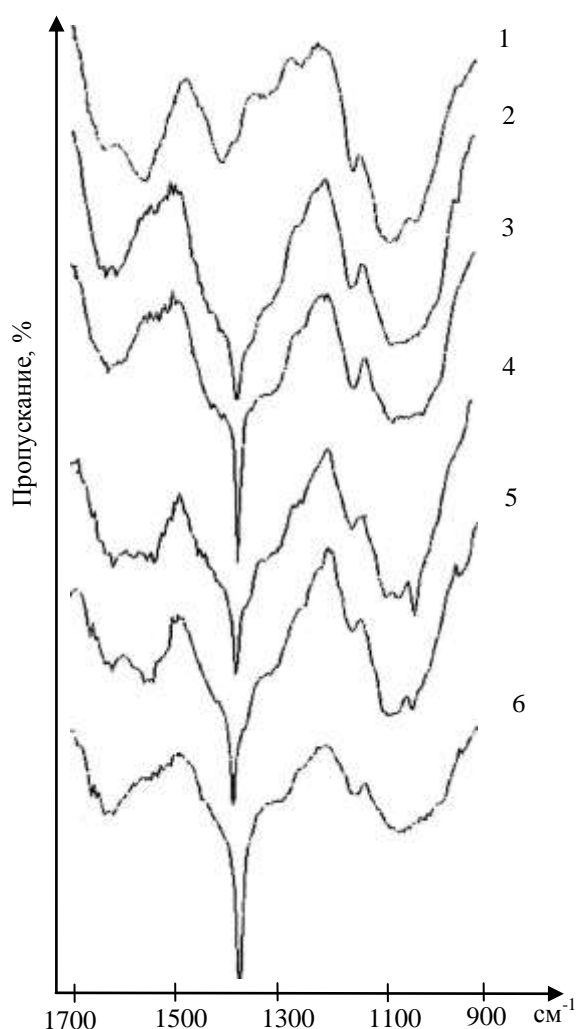


Рис. 2. ИК спектры пленок ХТЗ (**1**) и пленок продуктов его реакций с нитратами  $\text{Co}^{2+}$  (**2**),  $\text{Ni}^{2+}$  (**3**),  $\text{Zn}^{2+}$  (**4**),  $\text{Cd}^{2+}$  (**5**),  $\text{Cu}^{2+}$  (**6**) в 0,2 М водном растворе уксусной кислоты

полученных из реакционных смесей с солями  $\text{Co}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$ , наблюдается смещение максимумов полос поглощения в коротковолновую область относительно полос поглощения этих ионов в воде. При соотношении реагентов 1:1 оно составляет 10 и 35 нм соответственно для ионов  $\text{Co}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$ . Электронные спектры для ионов меди представлены на рис. 1. Смещение полос поглощения в коротковолновую область электронного спектра обычно характерно при замене в аквакомплексах ионов металлов  $[\text{M}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  молекул воды на аминные лиганды [15].

С указанными наблюдениями согласуются и данные ИК-спектроскопии. На рис. 2 представлены ИК-спектры пленок хитозана и пленок продуктов его реакций с нитратами  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  в 0,2 М водном растворе уксусной кислоты. В ИК спектрах пленок из реакционных смесей наиболее существенные изменения в структуре полос поглощения в области деформационных колебаний групп  $-\text{NH}_3^+$  и  $-\text{NH}_2$  ( $1500\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ ), по сравнению с аналогичной областью спектра хитозана, наблюдаются в области поглощения группы  $-\text{NH}_2$  при  $1570\text{ см}^{-1}$ .

Результаты проведенного количественного исследования и данные работ [8, 10–12] показывают, что растворимые формы хитозана в водных растворах эффективно связывают ионы d-металлов, являющихся представителями биомикроэлементов. Имеются примеры, когда при описании свойств БАД на основе хитозана не рекомендуется одновременный с ним прием жирорастворимых витаминов и микроэлементов.

С учетом изложенного, является неоднозначным вопрос о влиянии хитозана, применяемого в продуктах питания регулярного использования, на минерально-витаминный баланс в организме человека.



### Выводы

1. Установлено, что хитозан (молекулярная масса 120 кДа) в водном растворе уксусной кислоты вступает в реакцию комплексообразования с ионами  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ .

2. Спектрофотометрическим методом и методом ИК-спектроскопии показано участие в образовании координационной связи с ионами d-металлов атомов азота и кислорода хитозана.

3. Методом кондуктометрического анализа определены степени превращения ионов металлов в комплекс и количество молей хитозана, вступивших во взаимодействие с одним молем иона металла.

4. Установлено, что при взаимодействии хитозана в водном растворе уксусной кислоты с ионами  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  наблюдаемая степень комплексообразования ионов металлов в целом увеличивается с увеличением относительных количеств полимер/ион металла, ее меньшие значения установлены для ионов кобальта, а более высокие - для ионов кадмия и меди.

### Библиографический список

1. Хитин и хитозан. Получение, свойства и применение / под ред. К. Г. Скрябина, Г. А. Вихоревой, В. П. Варламова. – М.: Наука, 2002. – 365 с.
2. Плиско, Е. А. Хитин и его химические превращения / Е. А. Плиско, Л. А. Нудьга, С. Н. Данилов // Успехи химии. 1977. Т. 46. № 8. С. 1470–1487.
3. Roberts, G. A. F. Chitin chemistry / G. A. F. Roberts. - Basingstoke: Macmillan Press, 1992. – 352 p.
4. Tokura, S. Chitin derivatives in life science / S. Tokura, I. Asuma. - Tokyo: Japan Chitin Society, - 1992. - 140 p.
5. Понамарев, Е.Е. Технология производства и комплексная товароведная оценка качества БАД «Йодхитозан» / Е.Е. Понамарев, А.Н. Мамцев, Л.Ф. Понамарева, В. Н. Козлов // Пищевая промышленность. 2011. № 6. С. 16-17.
6. Петров, В.А. Ограничение использования хитозана в лечебно-профилактических целях / В.А. Петров, Г.А. Тарасенко, Л.В. Бережнова // Новые достижения в исследовании хитина и хитозана: мат. 6-й Междунар. конф. - Москва-Щелково. – М.: ВНИРО. 2001. С. 220.
7. Muzzarelli, R. A. A. Chitin and chitosan as chromatographic supports and adsorbents for collection of metal ions from organic and aqueous solutions and sea-water / R. A. A. Muzzarelli, O. Tubertini // Talanta. 1969. V. 16. P. 1571-1593.
8. Комова, Е.П. Координационные взаимодействия глюкозамина, хитозана и гидрохлоридов с ионами d-металлов в водных растворах / дисс. ... канд. хим. наук. – Нижний Новгород. 2008. – 107 с.
9. Тейлор, Д. Биология / Д. Тейлор, Н. Грин, У. Стаут. – М.: Мир, 2001. Т. 1. – 454 с.
10. Анпилогова, Г.Р. Состав и свойства водорастворимых продуктов взаимодействия хитозана с Fe(III) в водных растворах  $\text{FeCl}_3$  / Г. Р. Анпилогова, Ю. И. Муринов // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77. Вып. 11. С. 1880–1886.
11. Скоробогатова, Е. В. Взаимодействие солей никеля (II) и кобальта (II) с гидрохлоридом и ацетатом хитозана в водных растворах / Е.В. Скоробогатова [и др.] // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81. Вып. 4. С. 672–677.
12. Скоробогатова, Е.В. Исследование взаимодействия гидрохлорида хитозана и гидрохлорида глюкозамина с ионами d-металлов в водных растворах / Е.В. Скоробогатова [и др.] // Современные перспективы в исследовании хитина и хитозана: мат. 9 Междунар. конф. – Ставрополь. 2008. С. 99–102.
13. Арбатский, А.П. Исследование химических свойств хитозана титриметрическим методом / А.П. Арбатский, Е.П. Трактина, Л.А. Смирнова // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79. Вып. 2. С. 272–274.

14. Беллами, Л. Инфракрасные спектры молекул: [пер. с англ. ] / Л. Беллами. – М.: ИЛ, 1957. – 444 с.
15. Ливер, Э. Электронные спектры неорганических соединений: [пер. с англ. ] / Э. Ливер. – М.: Мир, 1967. Ч. 2. – 443 с.

*Дата поступления  
в редакцию 23.04.2012*

**E.P. Komova, E.V. Skorobogatova, A.P. Arbatsky, V.R. Kartashov**

## **CHITOSAN INTERACTION WITH SOME d-METAL IONS IN WATER SOLUTION OF ACETIC ASID**

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev

**Purpose:** To establish the chitosan complex formation fact in a water solution of acetic acid with ions of cobalt, nickel, zinc, cadmium, copper. To define quantitative characteristics of a complex formation and to establish its possible ways.

**Design/methodology/approach:** The analysis of reactionary mixes by the konduktometric method titration of a sodium hydroxide. Reception of electronic spectrum films from reactionary mixes solutions by the spectrophotometrically method. Research of reactions products films by the infrared-spectroscopy method.

**Findings:** The transformation degrees of metals ions in a complex and quantity of mole chitosan, entered interaction with one mole a metal ion are defined. Participation in formation of coordination communication of chitosan nitrogen and oxygen atoms is established.

**Research limitations/implications:** The given work results can be used, for example, in biologically-active additives on chitosan basis productions.

**Originality/value:** The quantitative characteristics of chitosan complexes with d-metals ions in a water solution of acetic acid are defined and probable schemes of a complex formation are offered.

*Key words:* chitosan, heavy metals, microcells, a complex formation.

## ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

---

УДК 681.3.068

С.А. Борисов, А.Ф. Плеханова

### ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Социально-экономическое прогнозирование является важным методом для определения экономического состояния объекта к определенному моменту времени в будущем. Основная цель исследования, отраженного в данной статье, заключается в рассмотрении новых методов социально-экономического прогнозирования при решении прикладных задач. В статье показана актуальность применения этих методов в случаях, когда существует большая размерность данных для обработки, а также при сильной зашумленности данных для анализа. В условиях неопределенности для качественного прогнозирования результатов, необходимо использовать современные математические методы, наиболее эффективными из которых являются методы, основанные на аппарате дискретной математики, такие как: нечеткая логика, нейронные сети и генетические алгоритмы. Основные результаты исследования, приведенные в статье, иллюстрируют эффективность применения инновационных методов социального-экономического прогнозирования для разрешения экономических проблем.

В статье даны рекомендации по использованию различных новых математических методов для решения конкретных классов задач.

*Ключевые слова:* социально-экономическое прогнозирование, математические методы, нейронные сети, генетические алгоритмы, нечеткая логика.

Социально-экономическое прогнозирование является важным методом определения будущего состояния экономической системы [1]. Сущность прогнозирования заключается в нахождении некоторых характеристик системы по характеристикам, присущим ей в настоящий момент (при известных законах развития данных систем).

Наиболее простым является случай, когда система является детерминированной, и прогнозирование, и основанные на нем решения принимаются в условиях полной определенности. В данном случае мы без особых трудностей получаем довольно точный результат и адекватное решение.

Более трудным является прогнозирование и принятие решений в условиях частичного отсутствия информации и, тем более, в условиях полной неопределенности. В данном случае находят применение различные методы, начиная от вероятностных (в случае неполной исходной информации) и заканчивая методами принятия оптимальных решений. Они необходимы для принятия решений в условиях полной неопределенности. К ним относятся: принцип Парето, методы выделения главных показателей и перевод остальных в разряд ограничений, принципы Сэвиджа, Гурвица, Вальда и др. [2].

Также в случае полной неопределенности целесообразно использовать инструменты современной дискретной математики, такие как концепция искусственных нейронных сетей, генетические алгоритмы, нечеткая логика и др. В условиях неопределенности такие методы позволяют наиболее эффективно и с наименьшими затратами времени и финансовыми вложениями решить поставленные перед исследователем задачи.

*Искусственные нейронные сети (ИНС)* – математические модели, их программные ре-

ализации построены по принципу биологических нейронных сетей [3]. После разработки алгоритмов обучения получаемые модели стали использовать в практических целях: в задачах прогнозирования, для распознавания образов и др.

Нейронные сети вошли в практику везде, где необходимо решать задачи прогнозирования, классификации и управления.

ИНС представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой искусственных нейронов. Такие нейроны (процессоры) обычно довольно просты, в сравнении с процессорами, используемыми в персональных компьютерах. Однако, будучи соединёнными в большую сеть с управляемым взаимодействием, такие локально простые процессоры вместе способны выполнять довольно сложные задачи.

### ***Преимущества нейронных сетей***

*Богатые возможности.* Нейронные сети являются исключительно мощным методом моделирования, который позволяет воспроизводить даже достаточно сложные закономерности. На протяжении многих лет считалось, что один из лучших методов моделирования – это линейная оптимизация. Для данного метода были хорошо разработаны инструменты аппроксимации. Вместе с тем, существует ряд задач, в которых трудно осуществить линейную аппроксимацию и в них линейные модели оптимизации работают довольно плохо. Кроме того, нейронные сети умеют справляться с так называемым «проклятием размерности», которое не позволяет строить линейные зависимости в случае большого количества переменных.

*Простота в применении.* Считается, что уровень знаний, необходимый для успешного применения нейронных сетей, гораздо скромнее, чем, например, при использовании традиционных методов статистики.

Нейронные сети имеют *способность обучаться*. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных.

Способности нейронной сети к прогнозированию напрямую следуют из ее способности к обобщению и выделению скрытых зависимостей между входными и выходными данными. После обучения сеть способна предсказать будущее значение некой последовательности на основе нескольких предыдущих значений и/или каких-то существующих в настоящий момент факторов. Следует отметить, что прогнозирование возможно только тогда, когда *предыдущие изменения действительно в какой-то степени предопределяют будущее*. Например, прогнозирование котировок акций на основе котировок за прошлую неделю может оказаться успешным (а может и не оказаться), тогда как прогнозирование результатов завтрашней лотереи на основе данных за последние 50 лет почти наверняка не даст никаких результатов.

Задачи прогнозирования особенно важны для практики, в частности, для финансовых приложений, поэтому поясним способы применения нейронных сетей в этой области более подробно.

Рассмотрим практическую задачу, ответ в которой неочевиден - задачу прогнозирования курса акций на один день вперед.

Пусть у нас имеется база данных, содержащая значения курса за последние 300 дней. Простейший вариант в данном случае - попытаться построить прогноз завтрашней цены на основе курсов за последние несколько дней. Понятно, что прогнозирующая нейронная сеть должна иметь всего один выход и столько входов, сколько предыдущих значений мы хотим использовать для прогноза, например, четыре последние значения. Составить обучающий пример очень просто: входными значениями нейронной сети будут курсы за четыре последовательных дня, а желаемым выходом нейронной сети – известный нам курс в следующий день за этими четырьмя.

Если нейронная сеть совместима с какой-либо системой обработки электронных таблиц (например Excel), то подготовка обучающей выборки состоит из следующих операций:

1. Скопировать столбец данных значений котировок в 4 соседних столбца.
2. Сдвинуть второй столбец на 1 ячейку вверх, третий столбец - на 2 ячейки вверх и т.д. (рис. 1).



Рис. 1. Подготовка исходных данных для нейронной сети

Смысл этой подготовки легко увидеть на рис. 1: теперь каждая строка таблицы представляет собой обучающий пример, где первые четыре числа – входные значения нейронной сети, а пятое число – желаемое значение выхода нейронной сети. Исключение составляют последние четыре строки, где данных недостаточно: эти строки не учитываются при тренировке нейронной сети. Заметим, что в четвертой снизу строке заданы все четыре входных значения, но неизвестно значение выхода нейронной сети. Именно к этой строке мы применим обученную нейронную сеть и получим прогноз на следующий день.

Как видно из этого примера, объем обучающей выборки зависит от выбранного количества входов нейронной сети. Если сделать 299 входов, то такая нейронная сеть потенциально могла бы строить лучший прогноз, чем нейронная сеть с четырьмя входами, однако в этом случае мы имеем всего один обучающий пример, и обучение бессмысленно. При выборе числа входов нейронной сети следует учитывать это, выбирая разумный компромисс между глубиной предсказания (число входов нейронной сети) и качеством обучения нейронной сети (объем тренировочного набора).

*Генетический алгоритм* (англ. *genetic algorithm*) – это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию [4]. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений - кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

Активное применение генетические алгоритмы нашли для обучения (настройки весовых коэффициентов) нейронных сетей.

Пусть дана некоторая сложная функция (*целевая функция*), зависящая от нескольких переменных, и требуется найти такие значения переменных, при которых значение функции максимально. Задачи такого рода называются *задачами оптимизации* и встречаются на практике очень часто.

Один из наиболее наглядных примеров – задача распределения инвестиций. В этой

задаче переменными являются объемы инвестиций в каждый проект (десять переменных), а функцией, которую нужно максимизировать, – суммарный доход инвестора. Также даны значения минимального и максимального объема вложения в каждый из проектов, которые задают область изменения каждой из переменных. Попытаемся решить эту задачу, применяя известные природные способы оптимизации. Будем рассматривать каждый вариант инвестирования (набор значений переменных) как индивидуум, а доходность этого варианта - как приспособленность этого индивидуума. Тогда в процессе эволюции (если мы сумеем его организовать) приспособленность индивидуумов будет возрастать, а значит, будут появляться все более и более доходные варианты инвестирования. Остановив эволюцию в некоторый момент и выбрав самого лучшего индивидуума, мы получим достаточно хорошее решение задачи.

Генетический алгоритм – это простая модель эволюции в природе, реализованная в виде компьютерной программы. В нем используются как аналог механизма генетического наследования, так и аналог естественного отбора. При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде. Вот как моделируется генетическое наследование:

- хромосома (вектор из нулей и единиц, каждая позиция (бит) называется геном);
- индивидуум = генетический код (набор хромосом = вариант решения задачи);
- кроссовер (операция, при которой две хромосомы обмениваются своими частями);
- мутация (случайное изменение одной или нескольких позиций в хромосоме).

Чтобы смоделировать эволюционный процесс, сгенерируем вначале случайную популяцию – несколько индивидуумов со случайным набором хромосом (числовых векторов). Генетический алгоритм имитирует эволюцию этой популяции как циклический процесс скрещивания индивидуумов и смены поколений.

Жизненный цикл популяции – это несколько случайных скрещиваний (посредством кроссовера) и мутаций, в результате которых к популяции добавляется какое-то количество новых индивидуумов. Отбор в генетическом алгоритме – это процесс формирования новой популяции из старой, после чего старая популяция погибает. После отбора к новой популяции опять применяются операции кроссовера и мутации, затем опять происходит отбор, и т.д.

Отбор в генетическом алгоритме тесно связан с принципами естественного отбора в природе следующим образом:

- приспособленность индивидуума (значение целевой функции на этом индивидууме);
- выживание наиболее приспособленных (популяция следующего поколения формируется в соответствии с целевой функцией: чем приспособленнее индивидуум, тем больше вероятность его участия в кроссовере, т.е. размножении).

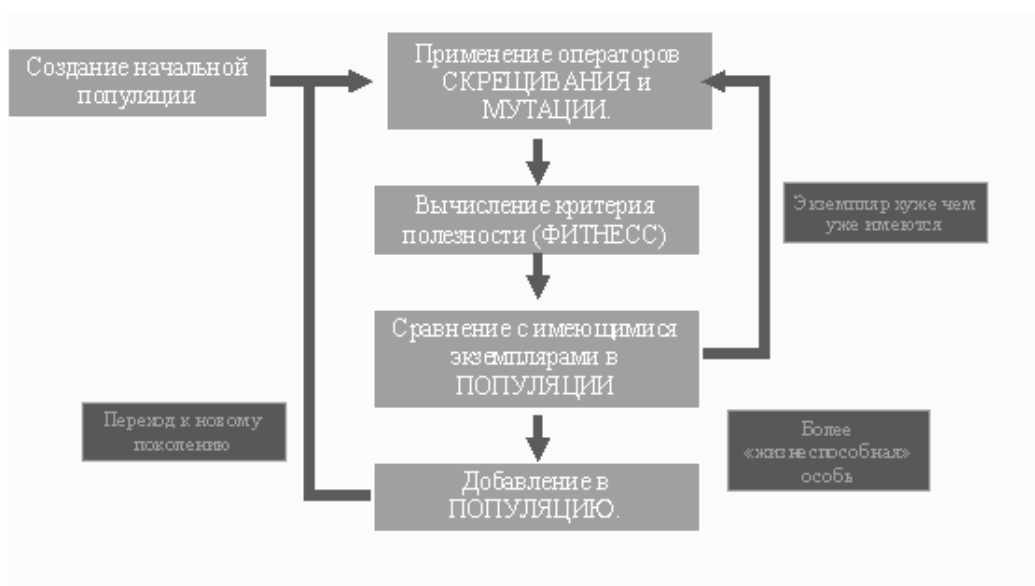


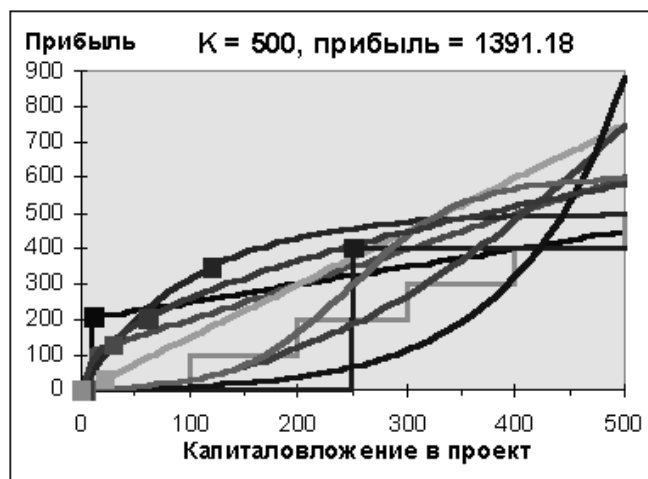
Рис. 2. Схема работы генетического алгоритма

Таким образом, модель отбора определяет, каким образом следует строить популяцию следующего поколения. Как правило, вероятность участия индивидуума в скрещивании берется пропорциональной его приспособленности. Часто используется так называемая *стратегия элитизма*, при которой несколько лучших индивидуумов переходят в следующее поколение без изменений, не участвуя в кроссовере и отборе. В любом случае каждое следующее поколение будет в среднем лучше предыдущего. Когда приспособленность индивидуумов перестает заметно увеличиваться, процесс останавливают и в качестве решения задачи оптимизации берут наилучшего из найденных индивидуумов. Схема реализации генетического алгоритма представлена на рис. 2.

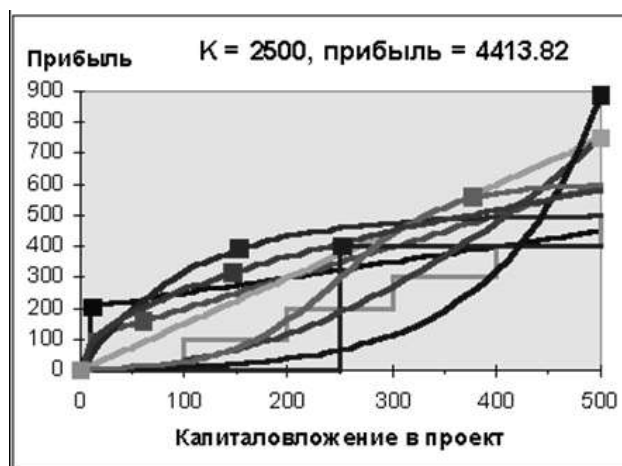
Возвращаясь к задаче оптимального распределения инвестиций, поясним особенности реализации генетического алгоритма в этом случае:

- индивидуум = вариант решения задачи = набор из десяти хромосом  $X_j$ ;
- хромосома  $X_j$  = объем вложения в проект  $j = 16$ -разрядная запись этого числа;
- так как объемы вложений ограничены, не все значения хромосом являются допустимыми. Это учитывается при генерации популяций;
- так как суммарный объем инвестиций фиксирован, то реально варьируются только девять хромосом, а значение десятой определяется по ним однозначно.

Далее приведены результаты работы генетического алгоритма для трех различных значений суммарного объема инвестиций  $K$  (рис. 3, а-в).

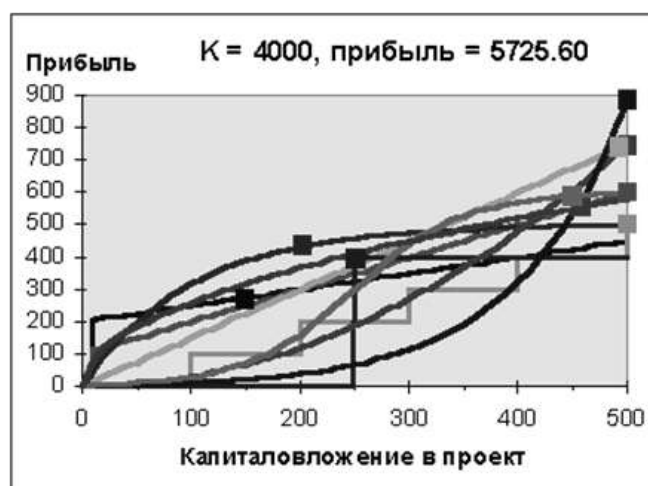


а)



б)

Рис. 3. Зависимость работы генетического алгоритма от начального размера инвестиций



в)

**Рис. 3 (окончание). Зависимость работы генетического алгоритма от начального размера инвестиций**

Квадратами на графиках прибылей отмечено, какой объем вложения в данный проект рекомендован генетическим алгоритмом.

Видно, что при малом значении  $K$  инвестируются только те проекты, которые прибыльны при минимальных вложениях (рис. 3, а).

Если увеличить суммарный объем инвестиций, становится прибыльным вкладывать деньги и в более дорогостоящие проекты (рис. 3, б).

При дальнейшем увеличении  $K$  достигается порог максимального вложения в прибыльные проекты, и инвестирование в малоприбыльные проекты опять приобретает смысл (рис. 3, в).

Нечеткая логика применяется для анализа экономических систем, если данные носят качественный характер (как правило, это происходит при принятии долгосрочных решений) [5]. Для измерения риска, связанного с данным видом неопределенности (ее называют лингвистической), была разработана теория нечеткой логики.

*Нечёткая логика* – раздел математики, являющийся обобщением классической логики и теории множеств. Понятие нечёткой логики было впервые введено профессором Люфти Заде в 1965 году. Понятие множества было расширено допущением, что функция принадлежности элемента к множеству может принимать любые значения в интервале  $[0...1]$ , а не только 0 или 1. Такие множества были названы нечёткими. Также автором были предложены различные логические операции над нечёткими множествами и понятие лингвистической переменной, в качестве значений которой выступают нечёткие множества.

Триумфальное шествие нечеткой логики по миру началось после доказательства в конце 80-х годов прошлого века Бартоломеем Коско знаменитой теоремы FAT (Fuzzy Approximation Theorem). В бизнесе и финансах нечеткая логика получила признание после того, как в 1988 году экспертная система нечетких правил для прогнозирования финансовых индикаторов единственная предсказала биржевой крах. Количество успешных фаззи-применений в настоящее время исчисляется тысячами.

Применение современных методов социально-экономического прогнозирования позволяют увеличить его точность и предсказательную силу, а также значительно сэкономить время на проведение исследования, при наличии соответствующего компьютерного программного обеспечения. Также рассмотренные в статье методы, позволяют осуществлять социально-экономическое прогнозирование даже в тех случаях, когда не работают классические методы: например, нечеткую логику и нейронные сети можно использовать при очень высокой размерности и зашумленности данных.



### Библиографический список

1. **Юрлов, Ф. Ф.** Социально-экономическое прогнозирование / Ф. Ф. Юрлов [и др.]; НГТУ. – Нижний Новгород, 2010. – 233 с.
2. **Юрлов, Ф. Ф.** Выбор эффективных решений в экономике / Ф. Ф. Юрлов [и др.]; НГТУ. – Нижний Новгород, 2004. – 159 с.
3. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс: [пер. с англ.] / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: ИД «Вильямс», 2006. – 1104 с.
4. **Гладков, Л. А.** Генетические алгоритмы: учеб. пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. - 2-е изд. – М: Физматлит, 2006. – 320 с.
5. **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTech / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2012*

**S.A. Borisov, A.F. Plekhanova**

### **INNOVATIVE APPLICATION OF MATHEMATICAL METHODS FOR SOCIAL – ECONOMIC FORECASTING**

Nishny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

**Purpose:** Social –economic forecasting is an important way to determine the status of the economic state of the object for a specific period of time in the future. The main goal of this research is to review the new methods of social – economic forecasting in conjunction with specific applied economic problems. The article shows the relevance of such methods in cases of large –scales data, as well as their strong noise.

**Design/methodology/approach:** In conditions of strong uncertainly for qualitative prediction of the results, it is necessary to use advanced mathematical methods, one of the most effective methods are based on a discrete mathematics, such as a fuzzy logic, neural networks and genetic algorithms.

**Findings:** The main results serve to illustrate the effectiveness of innovative methods of social –economic forecasting for specific applications of economic problems, recommendations for use of various new mathematical methods for solving specific classes of problems

**Originality/value:** Moreover, results of this articles show the effectiveness of the application of innovative mathematical methods for solving a very high dimensional data and noise.

*Key words:* social –economic forecasting, mathematical methods, neural network, genetic algorithm, fuzzy logic.

УДК 338.242.2

А.А. Шарова<sup>1</sup>, А.Ф. Плеханова<sup>2</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА  
НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА  
(НА ПРИМЕРЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ)**ОАО «УралСиб»<sup>1</sup>,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Эксперты в области управления рисками признали организационный аспект наиболее уязвимым и проблематичным для современных предприятий. При разработке и внедрении в деятельность предприятия риск-менеджмента значимым этапом является моделирование нового функционального направления, результатом которого становятся важнейшие параметры инфраструктуры: процессы риск-менеджмента, система сбалансированных показателей риск-менеджмента, информационные потоки риск-менеджмента и его ролевые модели.

*Ключевые слова:* риск-менеджмент, процесс риск-менеджмента, система сбалансированных показателей риск-менеджмента, информационные потоки риск-менеджмента, ролевая модель риск-менеджмента.

Риск-менеджмент, в настоящее время – это динамично развивающееся научное направление, изучающее основные его функции и разрабатывающее методологию управления различного рода рисками, тогда как основной проблемой практикующей части риск-менеджеров является организационная составляющая [1, 3]. Сам термин «риск-менеджмент» означает систему мероприятий, направленную на предупреждение рисков событий или минимизацию последствий их наступления. Действительно, каждое предприятие вынуждено принимать на себя различного рода риски для достижения поставленных целей, тогда как риск-менеджмент должен оптимизировать набор этих рисков. В развитых странах риск-менеджмент уже довольно давно признан действенным инструментом современного управления. Вместе с тем, развитие риск-менеджмента, в отличие от российского, происходило в условиях информационной насыщенности, при наличии формализованных процедур и отработанной методологии, с применением современных разработок информационного программного обеспечения.

Масштаб и численность рисков постоянно возрастают, независимо от сектора экономики и масштабов бизнеса, увеличивая, тем самым, значимость риск-менеджмента. Например, к основным проблемам российской химической промышленности следует отнести высокую степень износа основных фондов, низкую эффективность управления, инфраструктурные и ресурсно-сырьевые ограничения, низкую инновационную активность, недостаток оборотных средств, высокую стоимость энергоносителей и др. Структурные трансформации мировых рынков, ужесточение конкуренции и кризисные явления в экономике также убеждают собственников и менеджмент предприятий в необходимости управления рисками.

В России практика управления рисками получила распространение лишь на крупнейших предприятиях химической промышленности (например, «Сибур», «ЕвроХим»). Кризисные явления в экономике в определенном смысле играют позитивную роль в осознании топ-менеджментом компаний того, что конкурентоспособная промышленность не может развиваться успешно без комплексного управления рисками. Иными словами, каждое химическое предприятие, претендующее на устойчивое развитие и присутствие на мировых рынках, должно обязательно применять в своей деятельности системное управление рисками.

Международная и отечественная практика управления демонстрирует очевидные преимущества системного подхода при решении организационных задач. Именно системный подход лежит в основе действующих международных стандартов в области риск-

менеджмента (ISO 31000; AS/NZS 4360:2004). Представленная на рис. 1 схема отражает важнейшие элементы системного видения риск-менеджмента на предприятии.



**Рис. 1. Схема риск-менеджмента на предприятии**

Согласно предложенной схеме, процесс риск-менеджмента изначально базируется на требованиях регуляторов относительно показателей деятельности компании. Например, учитываются требования по безопасности для опасного химического производства, а также предельно допустимых выбросов отходов промышленности в окружающую среду. Также необходимо определить и обозначить важнейшие ресурсы для обеспечения нормального функционирования разрабатываемой системы риск-менеджмента: риск-менеджеры с необходимыми профессиональными характеристиками, достаточное финансирование проекта, обеспечение процесса управления рисками качественным документооборотом, информационной поддержкой и соответствующим программным обеспечением.

Под инфраструктурой риск-менеджмента следует понимать основные организационно-методологические элементы процесса, носящие вспомогательный характер, совокупность которых обеспечивает нормальное функционирование системы управления рисками в целом. Например, основным документом, отражающим отношение топ-менеджмента компании к рискам управляемого бизнеса, является политика управления рисками. Политика управления рисками предприятия должна четко регламентировать основные виды рисков, их классификацию, общие подходы и принципы к управлению ими. В свою очередь, основная цель управления рисками – это обеспечение достижения стратегических целей, благодаря чему происходит успешная интеграция риск-менеджмента в деятельность всего предприятия.

Одним из важнейших этапов построения риск-менеджмента на предприятии является разработка процедур управления рисками, описания сопровождающих информационных потоков и распределения ответственности и полномочий между участниками процесса. На взгляд авторов статьи, наиболее наглядным и эффективным способом решения этих задач является моделирование в рамках процессного подхода - современной управленческой тех-

нологии выполнения управленческих функций, преимущества которого представляются в следующем:

- 1) процессная структура управления рисками ориентирована на выполнение функций посредством конкретных бизнес-процессов, когда результат труда будет виден каждому участнику;
- 2) позволяет выявить и распределить необходимые ресурсы для обеспечения процессов;
- 3) подобная структура управления рисками получается более прозрачной, адекватной, понятной и менее забюрократизированной.

Современный инструментарий процессного подхода - это совокупность методов, которые позволят с помощью информационных технологий произвести моделирование структур и процессов риск-менеджмента. Предложенная В.В. Трофимовым бизнес-модель предприятия в общем виде выглядит следующим образом [2] (рис. 2).

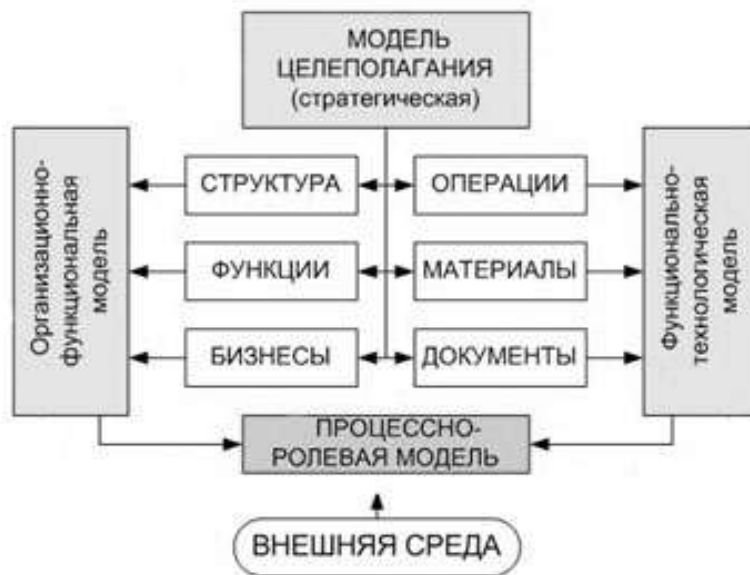


Рис. 2. Обобщенная бизнес-модель предприятия

Обобщенная бизнес-модель предприятия представляет собой совокупность стратегической модели, организационно-функциональной модели, функционально-технологической модели, а также ролевой модели процессов. Бизнес-модель – это модель организации деятельности. Бизнес-модель, как любая модель, является некоторым упрощенным представлением реального объекта. Основными сторонами бизнес-систем, отображаемыми в моделях, являются:

- цели разрабатываемой системы;
- структурная организация;
- функции системы и ее составных частей;
- процессы, которые протекают в системе;
- распределение по процессам ресурсов;
- распределение ответственности за ресурсы и процессы.

Следует отметить, что на этапе построения риск-менеджмента модель целеполагания (рис. 2) будет носить временный характер (стратегическая модель внедрения риск-менеджмента) до апробации результатов на практике, таким образом, ее демонстрация выходит за рамки данной статьи.

Функционально-технологическая модель служит для представления функций риск-менеджмента в виде процессов, то есть выстроенных во временной ряд последовательных операций, преобразования входных информационных ресурсов в приемлемый уровень риска,

в соответствии с разработанной регламентирующей документацией, с использованием специализированных программных средств. Подобная модель разлагает необходимые функции по процессам - последовательностям операций, которые, в свою очередь, объединены, в нашем случае, по циклам принятия различных управленческих решений.

*Процессы риск-менеджмента* – это упорядоченная в пространстве и времени совокупность взаимосвязанных работ, которые направлены на обеспечение приемлемого уровня рисков для предприятия, с точным определением входов и выходов, необходимых ресурсов и средств управления (рис. 3 и рис. 4).



Рис. 3. Общий процесс риск-менеджмента

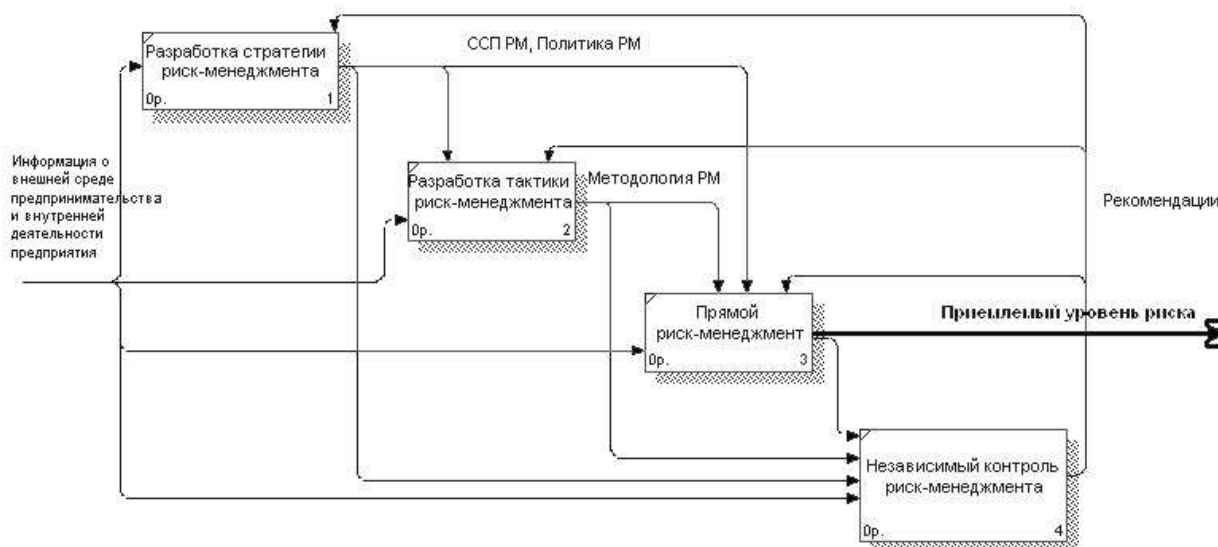
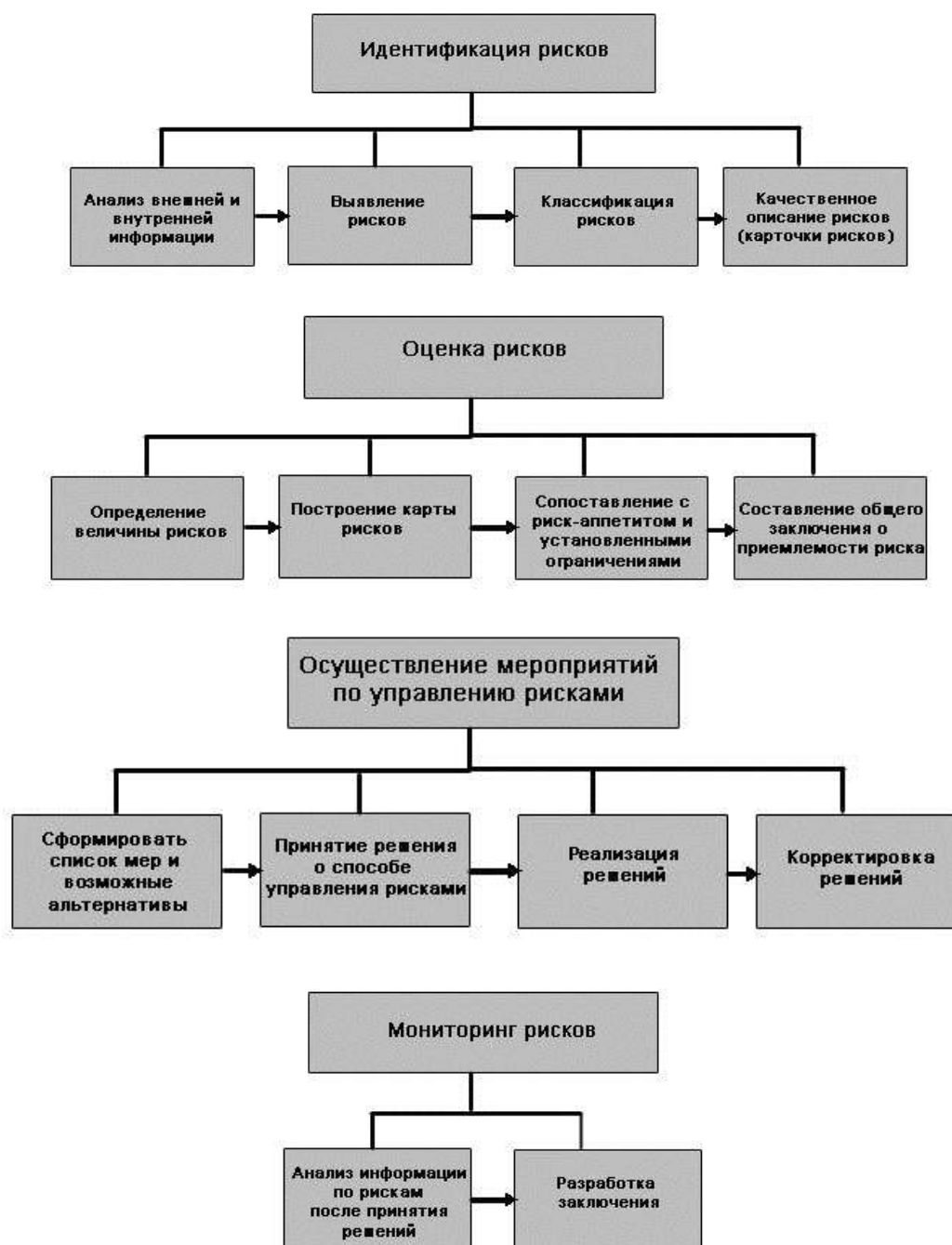


Рис. 4. Детализированный процесс риск-менеджмента

Подробнее рассмотрим пример прямого управления рисками (циклическая оперативная деятельность по управлению рисками). Авторы выделяют его следующие основные функции – это:

- идентификация рисков;
- оценка рисков;
- осуществление мероприятий по минимизации рисков;
- мониторинг рисков.

Далее необходимо построить последовательность действий и принятия решений, представляя каждую из этих функций в виде процессов (рис. 5).



**Рис. 5. Представление основных функций прямого управления рисками в виде последовательности процессов**

Таким образом, модель детализации операций прямого риск-менеджмента позволит изначально создать оптимальную последовательность взаимосвязанных операций, обеспечит грамотный документооборот и координацию риск-менеджмента в целом.

*Организационно-функциональная модель риск-менеджмента* – закрепление основных и поддерживающих функций за структурными подразделениями предприятия. На практике данная модель представлена положением об отделе риск-менеджмента. Документ описывает основные задачи, функции, порядок взаимодействия отдела с остальными подразделениями. Наибольший интерес представляет собой задача – описать взаимодействие отдела риск-

менеджмента с другими подразделениями. Построим модель информационных потоков, которые формируются в процессе риск-менеджмента (табл. 1). За пример взята стандартная организационная структура промышленного химического предприятия.

Таблица 1

## Модель информационных потоков риск-менеджмента

Отправитель информации	Пример входящей информации		Выходящая информация	Получатель информации
1	2	3	4	5
Отдел маркетинга	Данные о рыночной позиции и преимуществах товара; главных конкурентах	Отдел риск-менеджмента	Оценка риска потери конкурентоспособности	Комитет предприятия по рискам
Коммерческое управление, юридический отдел	Данные о претензиях со стороны партнеров, информация о поставщиках и покупателях		Оценка риска неисполнения контрактных обязательств	Комитет коммерческого управления, Комитет предприятия по рискам*
Финансовое управление	Результаты прогнозирования макроэкономических параметров за предыдущие периоды (план/факт)		Оценка риска макроэкономического риска	Комитет финансового управления, Комитет предприятия по рискам*
Финансовое управление	Баланс предприятия, качественная характеристика составляющих статей		Оценка риска структуры баланса	Комитет финансового управления, Комитет предприятия по рискам*
Финансовое управление, Коммерческое управление	Реестр форс-мажорных ситуаций, динамика прогнозирования оттока пассивов (план/факт)		Оценка риска потери ликвидности	Комитет финансового управления, Комитет коммерческого управления, Комитет предприятия по рискам*
Финансовое управление	Данные по рыночным позициям, данные для определения валютной позиции		Оценка рыночного риска	Комитет финансового управления, Комитет предприятия по рискам*
Отдел управления персоналом, Отдел безопасности труда	Реестр нарушений персонала, данные тестирования и аттестаций		Оценка риска действий персонала	Комитет управления персоналом, Комитет предприятия по рискам*
Отдел безопасности труда, цеха (основные и вспомогательные), Производственное управление, Отдел технической подготовки производства	Данные сбоев, брака, результаты расследования причин		Оценка риска производственных процессов	Комитет производственного управления, Комитет предприятия по рискам*
Отдел информационных систем, Отдел безопасности труда, Отдел технической подготовки производства	Данные сбоев, брака, результаты расследования причин		Оценка риска информационных технологий и оборудования	Комитет предприятия по рискам
Отдел технической подготовки производства	Данные сбоев, брака, результаты расследования причин		Оценка риска материально-технической базы	Комитет предприятия по рискам
Коммерческое управление	Стратегия предприятия, результаты ее выполнения		Оценка стратегического риска	Комитет коммерческого управления, Комитет предприятия по рискам*

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Отдел маркетинга, отдел управления персоналом	Данные об узнаваемости бренда, результаты анкетирования персонала, партнеров на предмет отношения к деятельности и соц.ответственности		Оценка репутационного риска	Комитет предприятия по рискам
Юридический отдел, Финансовый отдел, Производственный отдел	Реестр правонарушений, итоги расследований		Оценка нормативно-правового риска	Комитет предприятия по рискам
Отдел безопасности труда	Реестр событий чрезвычайного характера (вызванные внешними угрозами), положения о действиях персонала в ЧС		Оценка риска внешних угроз (природного, политического и криминального характера)	Комитет предприятия по рискам
Финансовое управление, Коммерческое управление	Данные о результатах инвестиционной и инновационной деятельности		Оценка риска снижения стоимости бизнеса	Комитет предприятия по рискам

Примечание: \*в зависимости от масштабов возможных рисков

Действительно, любой функционал предприятия обязательно регламентируется документами: различного рода положениями, инструкциями, описаниями технологических процессов и др. Модель информационных потоков риск-менеджмента формирует состав и вид информации для обработки и принятия управленческих решений, закрепляет за подразделениями дополнительные функции хранения и агрегирования информации, касающейся рисков, на своем участке.

Рольевые модели управления рисками – это этапы, процессы или функции с закреплением уровня ответственности или конкретных исполнителей за них. В табл. 2 наглядно приведен пример распределения ролей в процессе функционирования системы риск-менеджмента на предприятии между участниками.

Таблица 2

**Пример распределения ролей при осуществлении риск-менеджмента (на основе стандартной организационной структуры химических предприятий)**

	Разработка стратегии	Методология и регламенты	Планирование	Организация	Принятие решений	Исполнение	Контроль, мониторинг
Директор	+				+		+
Отдел риск-менеджмента	+	+	+	+	+	+	+
Производственное управление			+		+	+	
Гл.инженер			+		+	+	
Финансовое управление			+		+	+	
Коммерческое управление			+		+	+	
Управление персоналом			+		+	+	
Юридический отдел			+		+	+	



Таким образом, в статье представлено мнение о том, что при построении риск-менеджмента требуется обязательный этап моделирования инфраструктуры. Процессный подход является современным методом для разработки и внедрения в деятельность предприятий управленческих систем. В России управление рисками как специфический вид деятельности призван способствовать решению наиболее важных задач:

- во-первых, то, что работа специалистов по управлению рисками позволит выработать мотивацию к более взвешенному и грамотному отношению к рискам со стороны генерирующих риски функциональных направлений и отделов;
- риск-менеджмент должен стать своего рода философией организации, элементом ее корпоративной культуры, доступной для каждого сотрудника;
- использование потенциала разрабатываемой системы управления рисками способно решить основную общероссийскую проблему – обеспечить прозрачность компаний в целом.

#### Библиографический список

1. Report on the Accenture 2011 Global Risk Management Study [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.accenture.com/GlobalRiskManagementDiagnostic](http://www.accenture.com/GlobalRiskManagementDiagnostic) 2011.
2. Казаков, М.К. Управление проектами как инструмент реализации стратегии развития компании ОАО "СевЗап НТЦ" [Электронный ресурс]: <http://www.pmssoft.ru/knowledgebase/articles/detail.php?ID=1539&print=Y>.
3. Управление рисками: состояние и развитие корпоративного риск менеджмента в России 2011 (Марш Риск Консалтинг по России и СНГ) [Электронный ресурс]. – М.: MARSH, 2008.

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2012*

**A.A. Sharova<sup>1</sup>, A.F. Plekhanova<sup>2</sup>**

#### **MODELING INFRASTRUCTURE OF RISK-MANAGEMENT BASED ON THE PROCESS APPROACH (ON THE EXAMPLE OF CHEMICAL ENTERPRISES)**

Joint-stock company "Uralsib"<sup>1</sup>,  
Nishny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev<sup>2</sup>

**Purpose:** Practice shows that the organizational and methodological problems of risk management are now key in the construction of risk management systems in enterprises, the author proposes to solve them using pre-developed infrastructure, the organizational model of the functional.

**Design/methodology/approach:** The most widely used approach is process-based approach, which is up-to-date and appropriate for organizational modeling.

**Findings:** A system of models for risk-management infrastructure is designed as a result of research.

**Research limitations/implications:** The application of the proposed method helps avoid various organizational problems and treats.

**Originality/value:** In addition, the result of research helps personnel to understand the perception of risk-management model and avoid large-scale resistance to organizational changes.

*Key words:* risk-management, process approach, modeling of risk-management, business model, business process.

УДК 330.117: 001.895

И.Б. Ромашова<sup>1</sup>, А.Е. Шигина<sup>2</sup>**ИННОВАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ КАК ФАКТОР РЕАЛИЗАЦИИ  
ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА**Нижегородский архитектурно-строительный университет<sup>1</sup>,  
Институт экономики, управления и права<sup>2</sup>

Рассмотрены вопросы, связанные с инновационным поведением и инновационным потенциалом. Освещены подходы к определению базовых понятий. Выявлены факторы, непосредственно влияющие на инновационное поведение сотрудников. Предложены мероприятия по формированию результативного инновационного поведения сотрудников, раскрывающего инновационный потенциал предприятия.

*Ключевые слова:* инновационный потенциал, инновационное поведение, человеческий ресурс, инновационная фирма, инновационная среда организации.

С переходом от постиндустриальной к новой экономике во многих развитых странах принципиальное значение приобретает инновационное поведение персонала как фактор реализации инновационного потенциала предприятий. Современные ученые дают следующее определение: «новая экономика – это экономика постиндустриального технологического уклада, в котором ключевыми факторами производства становятся интеллектуальные ресурсы, или знания» [1, 17]. Основной характеристикой новой экономики стало производство и внедрение инноваций, что непосредственно связано с человеческими ресурсами, их интеллектуальным развитием и инновационными способностями. В настоящее время в промышленно развитых государствах до 80–95 % прироста валового внутреннего продукта приходится на долю новых знаний, воплощенных в нестандартных новшествах, передовой технике и технологиях.

Российская экономика в последние годы также имеет стратегическую установку на инновационное развитие. Целью инновационного развития является комплексное использование товарных, организационных, технологических и иных инноваций в производстве современных товаров и услуг. В деятельность большинства предприятий должен быть включен инновационный процесс – последовательность действий по созданию инновации, включающий в себя все стадии: от постановки социально-экономической задачи до получения конкретного результата. Однако на данный момент инновационная деятельность в России характеризуется низким результирующим показателем инновационной активности при значительном научно-техническом потенциале. В настоящее время разработку и освоение инноваций осуществляют всего около 6,2 % промышленных предприятий (по данным экспертных оценок).

Всякое инновационное развитие – это не только реализация инновационного процесса, но и создание системы факторов и условий, необходимых для его осуществления, т. е. формирование инновационного поведения людей, являющихся основными носителями новшеств. Другими словами, речь идет о создании креативной среды, стимулирующей выработку новых идей и предложений, содействии новаторам в реализации их проектов, финансировании потенциально эффективных преобразований. Инновационное поведение позволяет раскрыть и укрепить инновационный потенциал любой организации.

На данный момент сложилось несколько подходов к определению инновационного потенциала:

- 1) ресурсный (инновационный потенциал – совокупность ресурсов, необходимых для инновационной деятельности);
- 2) комплексный (характеристика способности системы к изменению, улучшению, прогрессу);
- 3) результативный (способность получать результат или накапливать информацию об инновациях);
- 4) интегральный (система факторов и условий, необходимых для осуществления инновационного процесса).

Наиболее полной характеристикой инновационного потенциала организации, на наш взгляд, отличается подход, предложенный директором Института стратегических инноваций А. И. Николаевым. Автор подчеркивает, что инновационный потенциал как бы определяет завершающую часть производственного цикла и его реальные пропускные возможности, что существенно сказывается на конечном результате. Он отмечает, что «между частями общего потенциала существуют весьма сложные и разнообразные диалектические связи» [7] и что собственно инновационный потенциал любого хозяйствующего субъекта представляет собой определенное ядро всего потенциала, органически входя в каждую его часть: производственно-технологическую, кадровую, финансово-экономическую, научно-техническую и т.д.

Инновационный потенциал организации, согласно исследованиям М. Ю. Ефимовой, характеризуется следующими признаками:

- способностью организации к креативно-деструктивной деятельности;
- способностью к саморазвитию;
- гибкостью и адаптивностью организационного механизма [2].

В то же время известно, что основой любых успешных организаций является персонал. Теория человеческого капитала предлагает перейти от восприятия сотрудников фирмы как бессубъектных безынициативных работников к восприятию их как личностей, обладающих интеллектуальным потенциалом и способных к собственному целеполаганию, творчеству и ответственности. Любые технические, экономические и другие «факторы действуют через человека, опосредуются его активностью». [4]

Согласно расчетам Всемирного банка, 76 % национального богатства стран Северной Америки составляет человеческий капитал. В Западной Европе этот показатель находится на уровне 74 %, в Северной Африке он составляет 69 %, в Южной Азии – 65 %, а в России – только 50 % [5].

Человеческий капитал включает в себя совокупность знаний, умений, навыков, используемых для удовлетворения многообразных потребностей человека и общества в целом. По сути, человеческий капитал – это возможность получения прибыли, благодаря имеющимся человеческим ресурсам, что приводит нас к определению скрытого потенциала. Если человеческий потенциал дает возможность получения прибыли, то возможность развития организации напрямую зависит от инновационного потенциала сотрудников.

Под инновационным потенциалом работника понимается его способность к позитивно - критическому восприятию новой информации, приращению общих и профессиональных знаний, выдвижению новых конкурентоспособных идей, нахождению решений нестандартных задач, новым методам решения традиционных задач, использованию знаний для предвидения, практической материализации новшеств.

Кроме того, к инновационному потенциалу следует отнести интеллектуальный ресурс как системообразующее качество инновационной личности. Согласно Ю. А. Карповой, интеллектуальный ресурс – это личностная зрелость человека, которая в условиях современности означает способность к переосмыслению мира, себя и своего способа жизни с учетом социально-значимых ценностей, способность к изменению мира, созданию новой социальной реальности [3]. С экономической точки зрения – способность к преобразованию окружающей среды для достижения поставленных целей.

Инновационный потенциал не будет реализован при отсутствии инновационного поведения (как фирмы, так и ее сотрудников). В первую очередь это касается руководителей предприятия, поскольку именно их Й. Шумпетер рассматривал как центральный фактор, влияющий на успех инноваций.

Инновационное поведение, как его определяет Л.Я. Косалс, – это система действий и поступков, совершаемых человеком в процессе осуществления нововведений и отражающих его реакцию на условия инновационной деятельности, а также на различные ее составляющие. Если рассматривать инновационное поведение на уровне фирмы, то его можно определить как систему действий работников, нацеленных на реализацию инновационного потенциала организации. В инновационной фирме эти действия будут направлены на изменения не только технологий и техники, но и организационной культуры, нормативно-правовой базы, системы коммуникаций, организационной структуры и др.

Исследователи факторов инновационности сделали интересный вывод о том, что наибольшей тенденцией к инновациям обладают общества с высокими показателями индивидуализма и низким уровнем авторитарности в управлении. Именно отношение к персоналу как к самовыражающейся личности, поддержка инновационного поведения отличают инновационную организацию от традиционной.

Инновационное поведение базируется на двух основных группах умений:

- стратегические умения:
  - долгосрочное видение ситуации;
  - умение идентифицировать и/или даже предвидеть тенденции развития различных объектов и процессов;
  - желание и умение собирать, обрабатывать и анализировать технологическую, экономическую и иную информацию;
- организационные умения:
  - вкус и умение действовать в рискованных ситуациях (склонность к риску);
  - внутренняя кооперация между различными людьми и функциональными отделами;
  - внешняя кооперация с исследовательскими центрами, консультантами, потребителями и поставщиками;
  - вовлеченность персонала и фирмы в целом в процесс изменений;
  - инвестиции в человеческий капитал, т.е. переобучение, переподготовка и повышение квалификации.

Результатом инновационного поведения высшей степени являются инновации в виде интеллектуальных активов. Исследователи Л. Эдвидсон и П. Салливан сформулировали предположение о том, что выгода компании от человеческих ресурсов – это трансформация их в интеллектуальные активы. Под интеллектуальными активами, согласно определениям Л. И. Лукичевой, понимаются [5]:

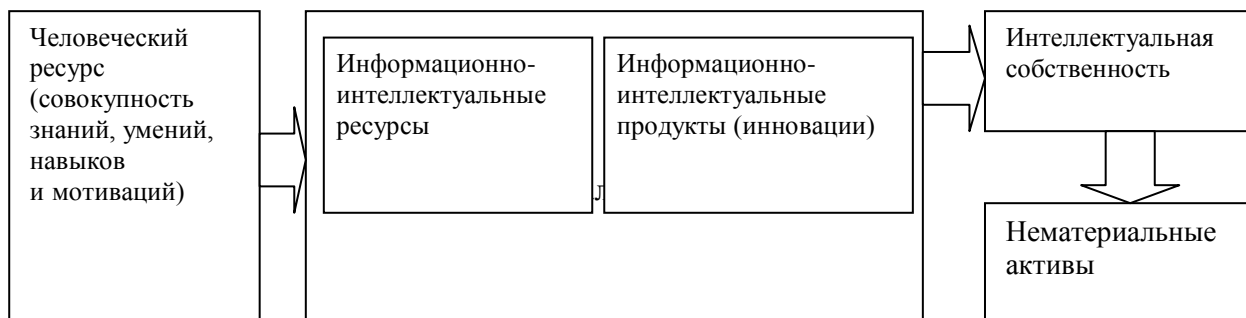
- информационно-интеллектуальные ресурсы – управленческие идеи, методы, инструменты и технологии, а также формы существования информации и информационные технологии, которые используются или могут быть использованы в деятельности организации и приносить конкурентные преимущества;
- информационно-интеллектуальные продукты – оформленные результаты преобразования информационно-интеллектуальных ресурсов, имеющие форму интеллектуальной собственности и обладающие коммерческой ценностью для организации.

Каждый из этих активов произведен человеческими знаниями, и совокупность этих знаний определяет скрытые источники ценности, наделяющие компанию нетрадиционно высокой рыночной оценкой.

При этом результатами инновационной деятельности, то есть актуализацией потенциала предприятия, являются информационно-интеллектуальные продукты, а информационно-интеллектуальные ресурсы можно включать непосредственно в инновационный потенциал

предприятия.

Таким образом, можно проиллюстрировать инновационный процесс с точки зрения преобразования человеческих ресурсов в нематериальные активы предприятия, которые могут быть оценены в денежном эквиваленте (рис. 1).



**Рис. 1. Схема преобразования человеческих ресурсов в нематериальные активы предприятия**

Следовательно, инновационная фирма – это фирма, характеризующаяся инновационным поведением, результатом которого становятся интеллектуальные активы.

Поскольку инновационное поведение фирмы напрямую зависит от поведения ее сотрудников (и в первую очередь – руководителя), далее будем рассматривать инновационное поведение на уровне субъекта деятельности – человека.

Выделим факторы, влияющие на инновационное поведение сотрудника фирмы.

Как и в любых других сферах, существуют внешние и внутренние факторы. Внешние по отношению к человеку факторы формирует его окружение (в нашем случае – предприятие), а внутренние формируются в самом сотруднике на основании его воспитания, знаний, жизненного и профессионального опыта.

На основании работ Л. Я. Косалса, А. И. Пригожина, В. А. Чернеца, И. В. Жежко, В. В. Сипачева, С. Ю. Глазьева, В. Г. Капранова, Ю. А. Карповой автором были выделены следующие внутренние факторы.

1. Интеллектуальные факторы:

- уровень интеллектуального развития;
- уровень квалификации;
- умение усилить шансы и минимизировать потери.

2. Личностные факторы:

- уровень духовного и нравственного развития;
- отношение к действительности;
- инициативность;
- творческий подход (уровень креативности);
- самостоятельность (в том числе в принятии решений);
- настойчивость;
- ответственность;
- готовность к изменениям;
- способность к риску;
- воля;
- интуиция.

3. Мотивационные факторы:

- доминирование потребностей в самореализации и отождествление с организацией или сообществом специалистов;
- пассивность потребности в безопасности;
- потребность в общественно-полезной деятельности;

- потребность личного продвижения в организационной иерархии.

В наибольшей степени направленность развития внутренних факторов человека определяет институт образования. Для обеспечения инновационного развития необходимо, чтобы в процессе образования не только изучались актуальные знания и технологии, но и происходило развитие индивидуальных способностей и творческого потенциала.

Фокусом современной модели развития человеческого потенциала становится непрерывное образование. В России его различными видами в 2011 г. была охвачена почти четверть (24.8%) населения в возрасте 25–64 лет (в 2006 г. – 22.4%), причем наибольшее распространение получает самообразование – 20.9% (17.4%) и дополнительное (неформальное) образование – 12.1% (8.0%). Участие населения в формальном образовании в 2006–2010 гг., напротив, сократилось с 4.5 до 2.7%.

По всем этим показателям Россия занимает явно недостаточные позиции: в 25 государствах – членах ЕС в среднем в различных формах непрерывного образования участвовало 42.0% населения (в том числе в формальном – 4.5%, дополнительном – 17.0%, самообразовании – 32.5%). В то же время в отдельных странах ситуация различается принципиальным образом: максимальная образовательная активность взрослого населения зафиксирована в Австрии (охват непрерывным образованием – 89.2%), Словении (82%) и Люксембурге (81.9%), а минимальная – в Румынии (10%) и Венгрии (11.7%) [10].

Внешние факторы, воздействующие на сотрудника фирмы, формируются внутренней средой предприятия:

1. Технические: использование новейшей техники и технологии.
2. Экономические: доступ к управлению финансовыми ресурсами.
3. Организационные: степень взаимодействия отделов и сотрудников, корпоративная культура, организационная структура.
4. Управленческие: участие сотрудника в управлении, непрерывное образование персонала, мотивация, поощрение инициативы и ненаказание ошибок.

Легче всего формировать соответствующие факторы малым предприятиям: у них более гибкая организационная культура, возможность непосредственного общения сотрудников, в том числе с руководителем, меньше бюрократизма и выше скорость принятия решений. С другой стороны, крупные предприятия могут обеспечить закупку новой техники и технологий, обучение сотрудников.

Внутренняя среда инновационного предприятия будет качественно отличаться от внутренней среды обычных предприятий. В первую очередь это касается организационной культуры и менеджмента. Внутренняя среда инновационного предприятия должна быть гибкой, оперативно подстраиваться под требования изменчивой внешней среды. Основными ценностями организационной культуры будут сотрудник как личность и постоянное развитие как самих сотрудников, так и, как следствие, фирмы. Менеджмент, в свою очередь, должен быть лишен таких тормозящих факторов, как бюрократизм, авторитарность, разъединение функций.

Несмотря на то, что организационные изменения – важная часть развития предприятия, организационными инновациями в 2009 г. занимались лишь порядка 3,7% от промышленных предприятий (по данным Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики») [10].

Выделяют шесть факторов, реализация которых в компании обеспечивает наличие инновационной среды [9]:

- 1) желание «заглянуть за горизонт» – внимание и поддержка ценным идеям сотрудников, независимо от степени их проработки;
- 2) позитивная ответственность за провал – умение поощрить сотрудника, взявшегося за реализацию идеи, и поддержать его в случае неудачи;
- 3) доступность руководителя в обсуждении идей – возможность рядовому сотруднику донести идею до руководства;

4) тихая инициатива – предоставление сотрудникам свободы принятия решений о применении инноваций на своем уровне;

5) кросс-функциональное взаимодействие – активный контакт и сотрудничество подразделений, имеющих противоречащие интересы (например, производства и продаж);

б) совместная выработка решений – при вовлечении сотрудников в обсуждение проблем организации они также принимают участие в выработке решений. Таким образом, при реализации решения они осознают необходимость перемен. Вместо сопротивления оказывают поддержку изменениям.

Именно такие решения используются в ведущих инновационных фирмах развитых стран (Procter&Gamble, Porsche). Подобная политика позволяет им постоянно разрабатывать и успешно внедрять инновации во все сферы внутренней среды: производство, маркетинг, управление и т.д. При этом сопротивление сотрудников нововведениям либо отсутствует, либо сводится к минимуму.

Инновационное предприятие характеризуется постоянным инновационным поведением. Ранее было отмечено, что необходима среда, стимулирующая инновационное поведение у сотрудников. Кроме того, сами сотрудники должны обладать достаточным инновационным потенциалом.

Согласно И. В. Жежко, инновационный потенциал в той или иной степени свойственен каждому человеку, но почти у всех он подавляется господством привычных стереотипов. Люди, у которых сильно развиты необходимые внутренние факторы, обладают инновационным мышлением, которое помогает преодолевать стереотипы.

Следовательно, для инновационной компании необходим персонал, обладающий инновационным потенциалом и инновационным поведением, позволяющим реализовать этот потенциал. Есть две стратегии привлечения нужных сотрудников:

1. Подбор персонала с инновационными характеристиками. Очевидно, что в современном российском обществе таких людей достаточно мало, что во многом связано с подавлением индивидуализма в советский период. Те, кто обладает необходимыми качествами, скорее всего, сами являются предпринимателями либо занимаются творческими профессиями.

2. Обучение персонала. Это стратегия более перспективна, поскольку позволяет, например, сохранить сотрудников с высоким инновационным потенциалом. Кроме того, как было отмечено, инновационная фирма должна обеспечивать постоянное обучение своего персонала.

Именно недостаток современных знаний зачастую становится тормозящим фактором для внедрения инноваций.

Мотивация персонала должна быть построена таким образом, чтобы удовлетворялись нижние уровни потребностей (физиологические, в безопасности, принадлежности) и активизировались высшие потребности (в уважении и признании, самовыражении). Тогда у человека будет желание постоянно самосовершенствоваться, используя ресурсы предприятия и свои собственные.

На основании проделанной работы можно сделать следующий вывод: инновационная фирма характеризуется наличием инновационной среды, которая позволяет наиболее полно реализовывать инновационный потенциал сотрудников. Реализация инновационного потенциала работников осуществляется посредством инновационного поведения, результатом которого становятся интеллектуальные активы предприятия.

#### Библиографический список

1. **Бовин, А.А.** Управление инновациями в организации: учеб. пособие / А. А. Бовин, Л. Е. Чередникова, В. А. Якимович. – 2-е изд., стер. – Москва: Издательство «Омега-Л», 2008. – 415 с.
2. **Ефимова, М. Ю.** К определению понятия «инновационный потенциал» // Методы активизации инновационных процессов. – М.: ВНИИСИ. 1988. Вып. 16.
3. **Карпова, Ю.А.** Введение в социологию инноватики: учеб. пособие / Ю. А. Карпова. – СПб.: Питер, 2004. – 192 с.

4. **Красовский, Ю. Д.** Социокультурные основы управления бизнес-организацией: учеб. пособие / Ю. Д. Красовский. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 391 с.
5. **Лукичёва, Л.И.** Управление интеллектуальным капиталом: учеб. пособие / Л.И. Лукичёва. – 2-е изд., стер. – М.: Омега-Л, 2008. – 552 с.
6. **Мингалева, Ж.А.** Современные подходы в исследовании инновационного потенциала // Инновационное развитие регионов: методы оценки и поддержка исследований: межвуз. сб. науч. статей. – Пермь: Перм. гос. ун-т., 2009. С. 4–16.
7. **Николаев, А.И.** Российский инновационный потенциал, инновационное развитие и инновационная культура // Инновационная политика и инновационный бизнес в России: аналитический вестник Совета Федерации ФС РФ. Специальный выпуск к пятому Петербургскому экономическому форуму. 2001. №15 (146). С. 33.
8. **Николаев, А.** Инновационное развитие и инновационная культура // Проблемы теории и практики управления: Международный журнал. 2001. № 5.
9. **Якунин, А.** Практика создания инновационной среды в белорусских компаниях / А. Якунин, В. Степанов // - <http://www.e-executive.ru/community/articles/1437928/>
10. Российский инновационный индекс / под ред. Л.М. Гохберга. – М.: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2011. – 84 с.

*Дата поступления  
в редакцию 30.01.2012*

**I. B. Romashova<sup>1</sup>, A. E. Shigina<sup>2</sup>**

## **INNOVATION BEHAVIOR AS THE FACTOR OF THE REALIZATION OF THE INNOVATION POTENTIAL**

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering<sup>1</sup>,  
Institute of the economy, control and right<sup>2</sup>

In the article the authors examine the questions, connected with the innovation behavior and the innovation potential. The approaches to the definition of innovation potential, the innovation behavior are covered. The activities for the formation of the innovation behavior of the personnel are suggested. Measures for molding of the successful innovation behavior of colleagues are proposed.

*Key words:* the innovation potential, the innovation behavior, the human resource, the innovation environment of the organization.



УДК 001.895

Ю.С. Солдатова<sup>1</sup>, С.Н. Яшин<sup>2</sup>

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ ФИНАНСОВО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ООО «ТисенКрупп Материалс»<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

**Цель.** Совершенствование методологии оценки финансово-экономического состояния и возможностей предприятий по осуществлению инновационной деятельности, что будет способствовать принятию оптимальных решений в области инноваций потенциальными инвесторами и руководителям предприятий.

**Методология.** Достижение поставленной в работе цели предполагает построение рейтинговой системы оценки и расчет двух интегральных групп показателей, одна из которых предполагает оценку финансово-экономического состояния предприятия, другая – оценку уровня инновационных возможностей.

**Результаты и область их применения.** Результатом исследования является новый метод оценки финансово-экономического состояния и возможностей предприятий по осуществлению инновационной деятельности, который может использоваться потенциальными инвесторами при выборе предприятий, в инновационные проекты которых можно вложить средства с наименьшим риском, и руководителями организаций для оценки собственного уровня инновационного развития. Изложены результаты оценки по предложенной методике ряда российских предприятий, также даны соответствующие рекомендации по участию в инновационной деятельности.

**Выводы.** Инновационной активности российских промышленных предприятий необходима поддержка, которая способствовала бы переходу российской экономики на инновационную социально-ориентированную модель развития.

*Ключевые слова:* инновационная деятельность, инновации, методология, финансово-экономическое состояние, инновационные возможности, система показателей.

В настоящее время признанным стратегическим фактором экономического роста в мировой экономике являются инновации, которые оказывают существенное воздействие на структуру общественного производства и изменяют экономическую организацию общества. Следует отметить, что в настоящее время Правительством РФ инновационному развитию уделяется все больше внимания, инновационная деятельность становится важнейшей составной частью государственного устройства.

Россия ставит перед собой амбициозные, но достижимые цели долгосрочного развития: обеспечение высокого уровня благосостояния населения, закрепление геополитической роли страны как одного из глобальных лидеров, определяющих мировую политическую повестку дня. Единственным возможным способом достижения этих целей является переход экономики на инновационную социально-ориентированную модель развития. Это означает необходимость формирования экономики лидерства и инноваций.

Количественные показатели такой экономики в соответствии со «Стратегией инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года» – занятие существенной доли (в 5-10 %) на рынках высокотехнологичных и интеллектуальных услуг по пяти-семи позициям, повышение в два раза доли высокотехнологичного сектора в ВВП (с 10,9 до 17-20 %), увеличение в пять-шесть раз доли инновационной продукции в выпуске промышленности, в четыре-пять раз – доли инновационно активных предприятий (с 9,4 до 40-50 %) [1]. Отсюда очевидно, что изучение принципов функционирования инновационных процессов на предприятии, оценка эффективности инновационной деятельности является актуальной проблемой исследования в настоящее время [2].

Достижение приведенных показателей невозможно без грамотного распределения

финансовых ресурсов различными хозяйствующими субъектами. В связи с этим, также особенно актуальным становится вопрос о совершенствовании методов оценки финансово-экономического состояния и возможностей предприятий по осуществлению инновационной деятельности, посредством которых инвесторы и само государство смогут определить тот объем финансовых средств, который необходим компаниям для разработки и реализации новых технологий, продуктов и услуг.

Актуальность исследований в области инновационных возможностей российских предприятий не вызывает сомнений, так как в последнее время наблюдается сокращение срока жизни инновационной продукции вследствие повышения интенсивности появления на рынке все новых и новых товаров и услуг.

Опрос, проведенный среди представителей 100 компаний с годовым оборотом от \$100 млн и выше, представляющих практически все отрасли российской экономики, показал, что значительная их часть ведет активную инновационную деятельность. При этом 39 % респондентов заявили, что их компании в течение двух последних лет приступили к производству новых продуктов. Вдвое чаще инновации связаны с внедрением инновационных технологий и бизнес-процессов (73 % и 66 % респондентов соответственно). Также удалось выяснить, что компании в два раза чаще адаптируют уже существующие инновационные продукты, технологии и бизнес-процессы, чем внедряют новые для мирового рынка. Важно отметить, что почти 80 % новых продуктов и технологий разрабатываются внутри внедривших их компаний [3].

По мнению авторов, наиболее результативным является подход к оценке финансово-экономического состояния на основе интегральных групп показателей, определяющих возможности организации по реализации инновационных проектов. Для решения поставленной задачи предлагается использовать систему показателей, принятых для анализа специалистами экспертной группы по улучшению инвестиционного климата в Приволжском федеральном округе.

Для оценки финансово-экономического состояния предприятия предлагается использовать показатели:

- собственный капитал (СК), млн руб.;
- основные средства (ОС), млн руб.;
- коэффициент автономии (Кавт), %;
- коэффициент долгосрочной независимости, Кдн;
- коэффициент текущей ликвидности, Ктл.

Предложенные показатели, рассчитываемые на основе официальной отчетности предприятия, являются объективной характеристикой финансового состояния. Немаловажным моментом является и то, что потенциальный инвестор при выборе организации, в инновационное развитие которой планируется вложение средств, сможет взять информацию, необходимую для расчета данных показателей из официальной отчетности предприятия.

Предложенные авторами пределы показателей основываются на исследованиях, обозначенных в научной литературе в области инновационной деятельности, экономической литературе, а также на мнении российских экспертов в области инвестиций в инновации [2, 4–7].

Принятию наиболее рационального решения об инвестировании средств в инновационную деятельность предприятия также способствует расчет второй интегральной группы показателей, характеризующей внутренние инновационные возможности организации.

Под инновационными возможностями понимают совокупность материальных и интеллектуальных средств предприятия, используемых для разработки новых продуктов, технологий и их вовлечению в хозяйственный оборот. Грамотная оценка инновационных возможностей увеличивает шансы потенциального инвестора сделать оптимальный выбор

предприятия, в проекты которого можно вложить средства с наименьшим риском.

Произвести оценку инновационных возможностей организации и принять оптимальное решение предлагается на основе расчета и анализа группы экономических показателей, характеризующих возможности предприятия в освоении новых продуктов и технологий.

Успешная разработка и реализация инновационного проекта невозможна без наличия на предприятии квалифицированных специалистов, занимающихся НИОКР. Наличие необходимого профессионального кадрового состава можно определить при помощи коэффициента НИР и ОКР персонала ( $K_{\text{НП}}$ ):

$$K_{\text{НП}} = \frac{Ч_{\text{ИН}}}{Ч_{\text{ОБЩ}}},$$

где  $Ч_{\text{ИН}}$  - численность работников, занятых в НИР и ОКР, чел.;  $Ч_{\text{ОБЩ}}$  - общая численность работников, чел.

Для оценки способностей организации по освоению новых производств предлагается использовать коэффициент освоения новой техники ( $K_{\text{ОТ}}$ ):

$$K_{\text{ОТ}} = \frac{ОФ_{\text{Н}}}{ОФ_{\text{СР}}},$$

где  $ОФ_{\text{СР}}$  - среднегодовая стоимость основных производственных фондов (ОПФ), тыс. руб.;  $ОФ_{\text{Н}}$  - стоимость вновь введенных ОПФ, тыс. руб.

Оценив возможности предприятия по освоению новых производств, рекомендуется перейти к оценке способностей по освоению новой продукции ( $K_{\text{ОП}}$ ):

$$K_{\text{ОП}} = \frac{В_{\text{НП}}}{В_{\text{ОБЩ}}},$$

где  $В_{\text{НП}}$  - выручка от продажи новой или усовершенствованной продукции, тыс. руб.;  $В_{\text{ОБЩ}}$  - выручка от реализации продукции, тыс. руб.

Отличительным преимуществом любой организации, характеризующим наличие перспективных направлений развития, является присутствие объектов интеллектуальной собственности, объем которых может быть определен следующим образом:

$$K_{\text{ИС}} = \frac{С_{\text{И}}}{А_{\text{ВН}}},$$

где  $С_{\text{И}}$  - стоимость нематериальных активов, тыс. руб.;  $А_{\text{ВН}}$  - внеоборотные активы, тыс. руб.

При выборе объекта инвестирования потенциальному инвестору также необходимо обращать внимание на опыт предприятия по разработке инновационных проектов. Для решения этой задачи предлагается использовать коэффициент инновационного роста ( $K_{\text{ИР}}$ ):

$$K_{\text{ИР}} = \frac{И_{\text{ИС}}}{И_{\text{ОБЩ}}},$$

где  $И_{\text{ИС}}$  - стоимость научно-исследовательских и учебно-методических проектов, тыс. руб.;  $И_{\text{ОБЩ}}$  - общая величина инвестиций, тыс. руб.

В табл. 1 представлена система показателей для оценки финансово-экономического состояния и возможностей предприятия по осуществлению инновационной деятельности.

Сущность предлагаемого авторами метода заключается в определении интегрального численного показателя, присваиваемого в зависимости от значений показателей финансово-экономического состояния и уровня инновационных возможностей предприятия, которые позволят сделать соответствующие выводы о степени готовности организации к реализации инновационного проекта. При этом наиболее целесообразно использовать показатели, рассчитанные на основе официальной финансовой отчетности предприятия, годовых отчетов,

инвестиционного меморандума и устава.

Таблица 1

**Система оценки финансово-экономического состояния и возможностей предприятий по осуществлению инновационной деятельности**

Баллы	1. Группа коэффициентов, характеризующих финансовое состояние				
	Собственный капитал (СК), млн. руб.	Основные средства (ОС), млн. руб.	Коэффициент автономии (Кавт), %	Коэффициент долгосрочной независимости, Кдн	Коэффициент текущей ликвидности, Ктл
20	$СК \geq 300$	$ОС \geq 300$	$Кавт \geq 70$	$Кдн \geq 0,6$	$2 \leq Ктл \leq 3$
15	$200 \leq СК \leq 300$	$200 \leq ОС \leq 300$	$60 \leq Кавт \leq 70$	$0,4 \leq Кдн \leq 0,6$	$1,5 \leq Ктл \leq 2; Ктл \geq 3$
10	$100 \leq СК \leq 200$	$100 \leq ОС \leq 200$	$50 \leq Кавт \leq 60$	$0,3 \leq Кдн \leq 0,4$	$1 \leq Ктл \leq 1,5$
5	$50 \leq СК \leq 100$	$50 \leq ОС \leq 100$	$30 \leq Кавт \leq 50$	$0,2 \leq Кдн \leq 0,3$	$0,5 \leq Ктл \leq 1$
0	$СК \leq 50$	$ОС \leq 50$	$Кавт \leq 30$	$Кдн \leq 0,2$	$Ктл \leq 0,5$
Баллы	2. Группа коэффициентов, характеризующих уровень инновационных возможностей				
	Коэффициент НИР и ОКР персонала (Кнп).	Коэффициент освоения новой техники (Кот)	Коэффициент освоения новой продукции (Коп)	Коэффициент обеспеченности интеллектуальной собственностью (Кис)	Коэффициент инновационного роста (Кир)
20	$Кнп \geq 0,3$	$Кот \geq 0,4$	$Коп \geq 0,5$	$Кис \geq 0,2$	$Кир \geq 0,6$
15	$0,25 \leq Кнп \leq 0,3$	$0,35 \leq Кот \leq 0,4$	$0,45 \leq Коп \leq 0,5$	$0,15 \leq Кис \leq 0,2$	$0,55 \leq Кир \leq 0,6$
10	$0,2 \leq Кнп \leq 0,25$	$0,3 \leq Кот \leq 0,35$	$0,4 \leq Коп \leq 0,45$	$0,1 \leq Кис \leq 0,15$	$0,5 \leq Кир \leq 0,55$
5	$0,15 \leq Кнп \leq 0,2$	$0,25 \leq Кот \leq 0,3$	$0,35 \leq Коп \leq 0,4$	$0,05 \leq Кис \leq 0,1$	$0,45 \leq Кир \leq 0,5$
0	$Кнп \leq 0,15$	$Кот \leq 0,25$	$Коп \leq 0,35$	$Кис \leq 0,05$	$Кир \leq 0,45$
Значимость	1	0,7	0,5	0,3	0,1

В ходе исследования было проанализировано финансовое состояние десяти российских предприятий на предмет готовности к реализации инновационных проектов, среди них ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «Опытно конструкторское бюро машиностроения им. Африкантова», ОАО «Арзамасский завод коммунального машиностроения», ОАО «Верхневолгопромвентиляция» ОАО «Досчатинский завод медицинского оборудования», ОАО «Волгабурмаш», ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт рестроения с опытным производством», ООО «Самарский резервуарный завод», ОАО «Резметкон» и ООО «Мортон-PCO» (табл. 2).

Основными критериями при выборе группы предприятий для анализа были объем собственных и основных средств не менее 10 млн руб., а также срок функционирования на российском рынке не менее четырех лет. Выбор данных критериев обусловлен исследованиями российских экспертов в области инновационной деятельности предприятий, а также результатами исследований, обозначенными в экономической литературе [2, 5–7].

Для расчета показателей использовались данные из официальной отчетности пред-

приятый за первое полугодие 2011 года.

В общем виде показатель финансово-экономического состояния и уровня инновационных возможностей предприятия определяется по формуле

$$R = \sum_{i=1}^n a_i \times K_i + \sum_{j=1}^n a_j \times K_j,$$

где  $R$  – общий интегральный показатель, определяющий уровень инновационных и финансово-экономических возможностей предприятия;  $K_i, K_j$  – показатели, рассчитываемые на основе показателей отчета о результатах деятельности предприятия и баланса;  $a_i, a_j$  – значимость, заранее присвоенная соответственно каждому показателю  $K_i, K_j$ , которая определялась экспертной группой.

Проанализируем в качестве примера состояние ОАО «Выксунский металлургический завод» на основе данных из официальной финансовой отчетности предприятия на 30 июня 2011 года:

$$R=(20*1+20*0,7+0*0,5+10*0,3+20*0,1)+(15*1+20*0,7+0*0,5+10*0,3+15*0,1)=72 \text{ балла}$$

Предприятие обладает большим объемом основных и собственных средств, достаточно независимо от изменения рыночной конъюнктуры, организация располагает достаточным количеством персонала, квалификация которого позволяет заниматься разработкой инновационных проектов и активно осваивает новую технику.

Таблица 2

#### Результаты оценки промышленных предприятий

Предприятие	Финансово-экономическое состояние, баллы	Уровень инновационных возможностей, баллы	Общий интегральный показатель, баллы	Рейтинг
Предприятие 1	39	34	73	A
Предприятие 2	39	33	72	A
Предприятие 3	37	25	62	A
Предприятие 4	35	21	56	B
Предприятие 5	34	19	53	B
Предприятие 6	33	11	44	C
Предприятие 7	19	16	35	C
Предприятие 8	21	10	31	C
Предприятие 9	12	16	28	D
Предприятие 10	7	6	13	D

В соответствии с количеством баллов, экспертной группе предлагается присваивать рейтинг каждому из предприятий, определяющий уровень инновационных и финансово-экономических возможностей организации (табл. 3). По такому рейтингу руководство предприятия, а также потенциальные инвесторы смогут судить о готовности предприятия к реализации инновационного проекта.

Таблица 3

#### Рейтинговая система оценки готовности предприятия к ведению инновационной деятельности

Рейтинг	Характеристика состояния предприятия и рекомендуемая стратегия инновационного развития
1	2
$A \geq 60$	Предприятие располагает большим объемом основных, собственных средств и накопленного капитала, которые могут быть направлены на разработку и реализацию инновационных проектов. Рекомендуется придерживаться стратегии лидера в освоении новых продук-

тов и технологий

Окончание табл. 3

1	2
$45 \leq B < 60$	Предприятие обладает достаточным количеством собственного капитала, имеет место нормальная финансовая обеспеченность производства необходимыми ресурсами. Требуется некоторый объем заемных средств для наиболее эффективного вовлечения новых технологий в хозяйственный оборот. Предприятия группы <i>B</i> могут быть как последователями, так и лидерами в освоении новых или улучшающих продуктов и технологий
$30 \leq C < 45$	Для предприятия характерна нехватка основных средств и накопленного, требуется привлечение значительного объема финансовых средств из внешних источников. Предприятия данной группы могут быть лишь последователями в освоении улучшающих продуктов и технологий
$D < 30$	На предприятии практически отсутствует база для разработки и реализации инновационных проектов, характерен дефицит или полное отсутствие источников формирования затрат, финансовое состояние неустойчиво. Организации группы <i>D</i> к ведению инновационной деятельности не готовы

Проанализировав ряд российских промышленных предприятий, можно дать некоторые рекомендации по участию в инновационной деятельности. Организации группы *A* в состоянии приступить к освоению новых продуктов и технологий. При реализации стратегии инновационного развития рекомендуется делать акцент не только на разработку прогрессивных технологий и новой продукции, но и на повышение качества уже выпускаемой продукции и расширение ее ассортимента.

Предприятиям группы *B* рекомендуется немедленно приступить к развитию способностей по освоению новой продукции, новых производств и совершенствованию материально-технической базы, также особое внимание рекомендуется уделять повышению потребительских свойств выпускаемой продукции.

Предприятиям группы *C* для ведения инновационной деятельности на более высоком уровне необходимо увеличение доли персонала, занятого НИР и ОКР, а также развитие собственного потенциала в освоении новых технологий и новых производств. Руководству имеет смысл задуматься над возможностью реинжиниринга бизнес-процессов на предприятии.

В организациях группы *D* необходима разработка грамотной стратегии инновационного развития, нацеленной на формирование устойчивого механизма по разработке и реализации инновационных проектов, повышению конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Анализ группы российских промышленных предприятий позволяет сделать вывод, что в Нижегородской области преобладают предприятия групп *A* и *C*.

Из Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года следует, что в ближайшей среднесрочной перспективе значительного прироста инвестиций в высокотехнологичный сектор экономики ожидать не следует, поэтому, на взгляд авторов, российским промышленным предприятиям при реализации Стратегии инновационного развития целесообразно сочетать два процесса:

- расширять прогрессивную технологическую базу за счет частично освоенных в производстве и уже разработанных наукоемких технологий, для которых не требуется создание новой производственной базы и, следовательно, больших капитальных вложений;
- максимально использовать частично адаптированный к рыночным условиям уже имеющийся технологический потенциал с параллельным инвестированием разработки новых и модернизацией уже выпускаемых видов продукции для улучшения их потребительских свойств и технико-экономических параметров. Данные мероприятия направлены на повышение спроса, что позволит российским предприятиям наработать стабильную основу для дальнейшего долгосрочного развития и реализации инновационных проектов, а также добиться более устойчивого финансового состояния.

Результаты оценки российских промышленных предприятий позволили выявить об-

щую тенденцию. Даже при наличии необходимого объема финансовых средств предприятия не используют их в полном объеме в ходе разработки и реализации инновационных проектов. Отсюда возникает вопрос, что же является сдерживающими факторами на пути к инновационному развитию организаций? Очевидно, что большое влияние на уровень инновационного развития российских промышленных предприятий оказывают следующие факторы:

- отсутствие квалифицированного персонала, способного заниматься инновационной деятельностью;
- неготовность рынка к восприятию новой продукции;
- высокий уровень экономических, технических, организационных рисков;
- нехватка необходимого оборудования;
- непонимание персоналом сущности инноваций в науке и технике;
- отсутствие готовности рисковать у руководства предприятий;
- стереотипность мышления.

Для того чтобы снизить степень сопротивления инновациям, необходима система эффективного управления, инструментами которой должны быть:

- во-первых, тщательная подготовка к изменениям, непременно возникающим с запуском того или иного инновационного проекта;
- во-вторых, необходимо проработать систему мер по стимулированию инновационной активности рядовых сотрудников предприятия.

Практическая значимость предложенной системы оценки готовности предприятий к ведению инновационной деятельности:

1. Потенциальные инвесторы, проанализировав финансовое состояние предприятия, смогут сделать объективный выбор организации, наиболее надежной с точки зрения вложения инвестиций.

2. В ходе оценки руководители смогут выявить ряд узких мест, которые препятствуют развитию инновационной деятельности в организации.

3. Предложенный метод оценки может использоваться в ходе сравнения финансово-экономического состояния анализируемого предприятия с финансово-экономическим состоянием конкурентов.

4. При ежеквартальном анализе деятельности организации по предложенной методике можно, прослеживая динамику изменения основных показателей деятельности, делать выводы о развитии предприятия, а также прогнозировать наличие средств в будущем при принятии решения об инвестировании инновационного проекта.

5. При выборе одного из нескольких альтернативных инновационных проектов для инвестирования, предложенная методика позволит выбрать оптимальный проект с точки зрения наличия на предприятии средств, необходимых для успешной разработки и реализации каждого из анализируемых проектов.

В настоящее время инновационная деятельность является значительным движущим элементом и показателем научно-технического прогресса, источником развития экономики, производства и общества в целом. Исходя из современной расстановки действующих сил в экономике и промышленности, приоритет ее развития должен быть отдан активизации инновационной деятельности во всех ее базовых наукоемких отраслях.

Инновационные процессы выдвигаются сегодня в центр назревших и необходимых перемен, связанных с проявлением устойчивой заинтересованности общества в высокоэффективных инновациях. Даже при всей сложности продвижения и затратности на начальном этапе внедрения инновационные технологии оправдывают себя и стимулируют переход с количественного сценария производства продукции на качественный. Все перечисленные факты свидетельствуют о необходимости разработки новых методов анализа и оценки возможностей российских промышленных предприятий к разработке и реализации все новых и новых инновационных технологий и продуктов.

По результатам анализа среди предприятий Нижегородской области наиболее высо-

ким уровнем инновационных возможностей и финансово-экономического состояния обладают ОАО «ОКБМ им. Африкантова» и ОАО «Выксунский металлургический завод». Данным предприятиям рекомендуется придерживаться стратегии лидера в освоении новой продукции и технологий, а также делать акцент на повышение качества, расширение ассортимента и модификацию уже существующей продукции.

Однако, как показывают исследования [2, 5, 7], общим технологическим недостатком производственно-технологической базы крупных российских промышленных предприятий является высокая ресурсоемкость производственной инфраструктуры и вспомогательных производств. Отсюда следует вывод, что инновационной активности в нашей стране необходима поддержка. Инновации способствуют росту доходности предприятия, увеличению его рыночной доли, снятию с производства устаревшей продукции. Именно внедрение инновационных технологий способствует созданию новых рынков сбыта, расширению ассортимента продукции и дает стимулы к совершенствованию управленческой деятельности.

### Библиографический список

1. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 г. (Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2011 г. № 2227-р.)
2. **Шамина, Л.К.** Теоретические аспекты функционирования инновационных процессов / Л.К. Шамина. – СПб.: Наука, 2008. С. 43–56.
3. [www.k2kapital.com](http://www.k2kapital.com). Бизнес верит в инновационное будущее России от 03.02.12.
4. **Ильенкова, С.Д.** Инновационный менеджмент / С.Д. Ильенкова. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007.
5. **Афонин, И.В.** Управление развитием предприятия: стратегический менеджмент, инновации, инвестиции, цены: учеб. пособие / И.В. Афонин. – М.: Дашков и Ко, 2002.
6. **Яшин, С.Н.** Финансовый и инвестиционный анализ инноваций: учеб. пособие / С.Н. Яшин, Е.В. Кошелев; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2010.
7. **Туккель, И.Л.** Экономика и финансовое обеспечение инновационной деятельности: учеб. пособие / И.Л. Туккель [ и др.]. – СПб.: БХВ – Петербург, 2011.

*Дата поступления  
в редакцию 06.04.2012*

**Y.S. Soldatova<sup>1</sup>, S.N. Yashin<sup>2</sup>**

### **IMPROVED METHODOLOGY FOR ASSESSING THE FINANCIAL AND ECONOMIC CONDITIONS AND OPPORTUNITIES FOR COMPANIES TO IMPLEMENT INNOVATION**

LLC TisenKrupp Materials<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alekseev<sup>2</sup>

**Purpose:** Improved methodology for assessing the financial and economic conditions and opportunities for businesses to implement innovative activities that will contribute to optimal solutions in the field of innovation potential investors and business leaders.

**Methodology:** Achieving the goal requires the work to build a rating system to evaluate and calculate the integral of two groups of indicators, one of which involves the assessment of financial and economic condition of the company, the other - an assessment of the level of innovative features.

**The results and their application area:** The result of this study is a new method for estimating the financial and economic conditions and opportunities for businesses to implement innovative activities that can be used by potential investors in the choice of enterprises in innovative projects that you can invest with the least risk and the heads of organizations to assess their own level of innovation development. The results of evaluation of the proposed method a number of Russian companies are also given recommendations for participation in innovative activities.

**Findings:** Innovation activity of Russian industrial enterprises need the support that would facilitate the transition of the Russian economy on an innovative socially-oriented development model.

*Key words:* innovative activity, innovation, methodology, financial and economic situation, innovative features, the system performance.



## СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 316.343.001

В.И. Казакова

### ОТ СРЕДНЕГО КЛАССА К МОДЕРНИЗАЦИИ: НОВАЯ КУЛЬТУРА ПОСТРОЕНИЯ КОММУНИЗМА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предметом статьи является вопрос о культурных основаниях и социальном акторе российской модернизации. В качестве последнего в современных отечественных исследованиях обозначается «средний класс». И «средний класс», и «модернизация» рассматриваются автором как состояния общественного самосознания современной России, сосредоточенного на установлении новой системы взаимоотношений человека и государства. В контексте проблематики социального времени анализируется параллели «среднего класса» и «пролетариата», проектов модернизации и построения коммунизма.

*Ключевые слова:* средний класс, модернизация, пролетариат, социальное действие, общественный идеал, социальная онтология, социальная феноменология.

Представление о «социальном акторе модернизации» постепенно вытесняет из сферы социологических исследований понятие «средний класс» [1-6]. Эта дискурсивная переориентация знаменует собой окончание этапа социальной «транзиции», «переходного» состояния российского общества, переживаемого и переосмысливаемого в течение двух постсоветских десятилетий. Во многих отношениях состояние перехода, перелома можно рассматривать как перманентное для российского общества – в силу его позднего цивилизационного и культурного развития; вместе с тем, применительно к настоящему периоду определённое состояние постсоветского «завершения» очевидно. Социальная мысль и социальная реальность достигли в своём взаимодействии некоторого стабильного состояния; произошло переосмысление ценностных и целевых ориентиров. «Ожидание общественного идеала» обрело черты целостности, способной компенсировать динамичность социально-экономических преобразований, которые, в свою очередь, стали оцениваться более взвешенно и рационально [7].

То, что принято называть «социальной структурой», также приняло черты определённой завершённости, отразившиеся, с одной стороны, в воспроизводимости профилей основных социальных групп, с другой стороны, в закономерном «исходе» реформ, исчерпавших свои преобразовательные ресурсы [8]. Массовая утрата идентичности освоилась, наконец, в пространстве несуществующих мест, характеристикой которых являются не критерии и факторы, но маркеры и «штрихи» социальных портретов. В сфере общественного самосознания произошло не так много перемен, ментальные структуры, по общему мнению, не претерпели существенных изменений. Как и в рамках прежней советской идеологии, ценностные ориентации примеряются к действительности мыслью, живущей собственной жизнью, не только весьма далёкой от этой действительности, но и не ищущей точек соприкосновения с ней. Решающей переменной и, возможно, главным достижением было формирование новых мифов, появляющихся в последовательности, достойной, на наш взгляд, определённого социологического внимания.

Поиск социального актора модернизации предшествовал её становлению в качестве

общенационального проекта постреформенной России. Интересно отметить, что очевидная безрезультатность этого поиска нимало не повлияла на интенсивность дальнейших исследований в том же направлении. Не меньшего удивления достойно также и то, что резкое падение уровня жизни, маргинализация значительной части населения, рост коррупции и административного произвола не породили, тем не менее, никакого значимого взрыва социального негодования, никакого потрясения. Причины этого могут быть рассмотрены и проанализированы на различных уровнях осмысления. Традиционный для не вполне изжитой советской идеологии марксистский взгляд может обозначить здесь конструктивность стратегии воздействия на общественное самосознание, адекватность построения диалога между властью и народом. На более широком уровне обобщения можно говорить о формировании в постсоветском пространстве определённых механизмов социальных взаимодействий, нацеленных на установление экзистенциального равновесия во взаимоотношениях человека и государства, традиционно переживаемых в России как нечто глубоко личное.

Параллельно с этим осуществлялся своего рода переход от бинарной к тернарной организации мышления общества, поиск экзистенциально-онтологического «третьего», который в первую очередь реализовался как конструирование «среднего класса». Как и последующий, преемственно связанный с ним дискурс модернизации, «средний класс» является собой весьма неоднородную и разноплановую ментальную структуру, максимально полно отражающую психологическую потребность в пространственно-временной иерархии, различным образом проявляющуюся на тех или иных стратификационных уровнях. Закономерным следствием их комплексного взаимодействия являются как аксиологическая перегруженность, так и хаотичная непоследовательность тенденций развития рассматриваемых дискурсов.

Очевидные несообразности «среднего класса» и «модернизации» в последнее десятилетие были предметом радостного оживления социологической науки, имеющей в целом не так уж много поводов для плодотворного развития большинства своих дискурсов. В ситуации «перехода» самого общества, неясности пути и хаотичности действий обществоведческая мысль примеряла множество концептуальных ориентиров, не остановившись окончательно ни на одном. Применение «синтетических» подходов, сочетающих в себе положения подчас диаметрально противоположных теоретических конструкций, во многих отношениях представляется единственным выходом из положения; соответственно, выявляется ориентация скорее на рефлексивное мышление, нежели на эмпирический материал [2, 4, 9, 10].

Вместе с тем, мысль об обществе, живущая собственной жизнью и выступающая как действенное начало социального конструирования, может быть подчас гораздо более интересна, нежели жизнь самого общества. Духовные основания современной России заключают в себе ряд очевидных преемственных составляющих, которые позволяют рассмотреть «средний класс» и «модернизацию» в контексте их метафизических измерений, в рамках религиозно определённой и культурно организованной среды. Подобный подход открывает возможности построения более целостной картины, нежели при попытке комбинировать различные концептуальные модели теоретической социологии, ориентированной на опыт западных традиций. Между тем, и «средний класс», и «модернизация», несмотря на очевидное заимствование их дискурсов из зарубежного опыта, укоренены в духовной потребности «несвершения», составляющей неотъемлемую часть русской идеи [11-13].

Предметом настоящей статьи является феноменологический анализ «среднего класса» и «модернизации» как состояний общественного самосознания, как знаковых стратегий социальной мысли. Как первое, так и второе выступают в качестве «метафизических возможностей», конечным основанием которых является конструирование некоторой формы самоопределения по отношению к внешнему миру, всему инородному, расположенному по ту сторону черты, ограничивающей нашу самобытность. Последний аспект предполагает, помимо прочего, определённую опору на системный подход, поскольку принципиально важным в данном случае является соотнесение рассматриваемых дискурсов с завершением со-

циальной транзисии постсоветских десятилетий, исход которой в лумановской терминологии можно было бы определить как «осуществление дифференциации с окружающим миром, революционизации смыслов» [14]. В русле русских духовных традиций это осуществление произошло через адаптацию заимствованных концептов, трансформированных в нашем пространстве идей, где практически полностью отсутствует внутренняя мера как гарантия порядка, где никогда не было чётко обозначенного центра, где любой общенациональный проект ориентирован, в конечном итоге, на преодоление изначального темпорального разрыва.

«Запаздывающий» характер отечественной модернизации в равной мере может быть отнесён и к отечественному среднему классу, поскольку классические работы Берла и Минза, описывающие механизм разделения собственности и управления, отнюдь не являясь универсальной теоретической моделью, относятся к строго определённом этапу развития западного индустриального общества. Именно с данной тенденцией замены господства над человеком управлением делами, обозначившейся в начале 30-х годов прошлого столетия, связывают формирование среднего класса как «класса-для-себя» [15]. Бремя ответственности за «счастливую и прекрасную жизнь», впервые возложенное на среднее состояние Аристотелем, было естественным образом перенесено на индустриальное воплощение социального компромисса, «снимающего» прежний конфликт противоборствующих классов и нейтрализующего возможность всякого социального противоречия [16].

Вместе с тем, античный идеал блага «среднего достатка, порождающего умеренность» имеет мало общего с реальным средним классом в его западной интерпретации, который является не столько диалектическим синтезом богатства и бедности, сколько технического и социального в их взаимодействии как *sui generis*. Строго говоря, «культ» среднего класса изначально оказался сильно преувеличенным, «подвижный стык стратифицированного общества» [10] отнюдь не всегда рисуется лучезарными красками, он заключает в себе и угрозу обезличивания, и диктат усреднённости, и упадок мегалотимии. Этот ценностный ориентир «запоздал» как на уровне концептуального осмысления, так и в качестве стратегии действия.

Как и «модернизация», он изначально заключает в себе некоторый уничижительный оттенок, вполне созвучный российскому социальному пространству, чуждому чувству меры и не имеющему центра. И, тем не менее, именно «средний класс» стал предметом устремлений значительной части населения России и своего рода культом постсоветской социологической мысли. Данный дискурс, не отражая реального центра стратификационной пирамиды, воплотил в себе некий заряд предвидения, предощущения центра иного порядка: он сфокусировал на себе мысль об обществе в целом, стремление переосмыслить советское прошлое и разработать стратегию будущего.

Число несостоявшихся кандидатов в средний класс стремительно росло, составив страту гораздо более реальную, чем заданная социологическим описанием модель. «Выращивание» среднего класса как гаранта стабильности и необратимости прогрессивных социальных изменений во многих отношениях можно рассматривать как миф, но миф, гармонирующий социальные отношения, конструктивный и необходимый для социальной адаптации большинства, стремящегося к аристотелевской идеализации умеренности как лучшего из всех благ.

Социологический поиск «среднего класса» воплотил надежду на обновление постсоветской жизни, на преодоление «ностальгии центра» и обретение новых смысловых ориентиров. Миф об инициативе средних слоёв, о «народном ополчении» простых людей, в духе Минина и Пожарского восстанавливающих общественный порядок и законность, чрезвычайно востребован современным российским самосознанием [10]. Средний класс – так, как он был воспринят и осмыслен в постсоветском обществе – в полной мере воплощает шпенглеровское различие между переживанием и познанием, тот способ «реализации души в рамках окружающего её мира» [17], через которую постепенно в социальное пространство входила так долго подавляемая прежней идеологией жизнь.

Главной стратегией явился здесь поиск человека – «путь к тому высшему элементу в человеческом существе, который первичен как по отношению к «жизни», так и по отношению к разуму и характеризуется активным светоносным присутствием» [18, с. 118]. Образ простого человека, воплощённый в «среднем классе», задал то осязаемое поле «конституированных сознанием и наделённых смыслом идеальных предметностей» [19], то «самоутверждение правильности», которое выходит за пределы антитез, порождённых процессом распада, оказывается по ту сторону «the best and the rest», адаптировавшихся и не адаптировавшихся к резким социальным переменам.

Средний класс – воплощение «благоприятной перспективы» [1] трансформирующегося (или трансформировавшегося?) российского общества. Немарксистский взгляд мог бы искренне восхититься на предмет удивительной гармонии «верхов» и «низов» в вопросе того, каким должен быть простой российский человек. Возможно, именно в этом отчасти кроется разгадка малопонятного «безмолвия народа» перед лицом резкого падения уровня жизни, растущей коррупции и маргинализации широких слоёв населения. Отсутствие резко выраженного недовольства, массовых акций протеста свидетельствуют о быстро установившемся балансе во взглядах различных социальных групп на стратегию общественного развития. «Средний класс» действительно является ключевым аспектом – не с точки зрения социальной онтологии, где поиски его корреляции с реальными людьми неизменно заканчиваются провалом, но с точки зрения общественного идеала, его этико-аксиологических составляющих.

Представление о «простом человеке» составляет суть того, что в известной мере преодолевает феномен «русского раскола», оно является реальной синтезирующей силой и потенциалом стабилизации в состоянии «перехода». Здесь однозначно прослеживается связь с феноменом «пролетариата», который, не обладая никаким реальным коррелятом в социальном пространстве, тем не менее, удивительно гармонично вписался в пространство духа.

В обоих случаях мы имеем дело с комплексом этико-аксиологических ориентиров, функционирующих в общественном сознании в некритически воспринимаемой форме. И та, и другая идея во многих аспектах может быть представлена как миф, причём миф инородный. Призрак «среднего класса», подобно пролетариату, успел изрядно побродить по Европе, прежде чем осесть на российских просторах; помимо этого, можно говорить о ярко выраженной идее разрешения проблематики социальной темпоральности, играющей для русского самосознания ключевую роль. Раскол, инициированный, в конечном итоге, поздним цивилизационным развитием России, испытывает перманентную потребность в пространстве идей нивелирования этого временного сдвига, принципиальная неустранимость того и другого изначально ориентирует на формирование чрезвычайно высокого и, вследствие этого, недостижимого идеала. Аксиологически перегруженные представления о «среднем классе» и «пролетариате» вмещают в себя всё то, что могло бы разрешить проблему темпоральности, если бы данный проект изначально обладал сколько-нибудь значимым потенциалом реализации.

Средний класс – и как социологическое понятие, и как желаемая социальная судьба, в значительной мере является наследием метафизики пролетариата. На уровне мифа он достаточно быстро за два постсоветских десятилетия впитал в себя всё то, что ранее относилось к возможности потерять исключительно свои цепи. Движущая сила революционных преобразований, контуры которой имеют столь мало общего с реальным рабочим классом, постепенно сменила свой социологический образ на новый – и столь же далёкий от действительных стратификационных картин. Так же, как и «пролетариат», «средний класс» оказался заимствованным из иной культуры, и, тем не менее, удивительно гармонично вписавшимся в проекты социального обновления.

Идеология строительства коммунизма, где среднему классу не находилось места в советской формуле «2+1» (союз рабочего класса и крестьянства, интеллигенция – в роли «попутчика»), принципиально выводила социальное действие за рамки общественной жизни.

Пролетариат воплощал иоакимитскую этику равенства и братства с её концентрацией энергии на мессианском идеале будущего [20]. В постсоветское время социальному действию отводится новое место, оно обретает иное воплощение – но в аналогичной структуре прежнего мифа. «Метафизическая возможность» модернизации, являющейся, по сути, позитивистским проектом, воплотила в наши дни иррациональное стремление российской ментальности оставаться *tabula rasa* – «чистым листом», открытым для новых начинаний. В духовное основание русской жизни положено не представление о вечной и неизблемой истине, а идея постоянного поиска; в связи с этим, отечественную модернизацию, в терминологии Ю. Хабермаса рассматриваемую часто как «незавершённый проект», можно обозначить как идеологию не столько «незавершения», сколько «несвершения» [13].

В сфере социологических и социально-философских исследований смещение акцентов из онтологической сферы в праксеологическую связано с определённым мировоззренческим поворотом в сфере общественнознания: целевые ориентиры впервые начинают преобладать над ценностными. Интерес к среднему классу и модернизации объединяет не только «народ» и «не-народ», имущих и неимущих, но и общественность и научные круги. Циркуляция данных понятий не только в сфере научных исследований, но и в публицистике, интенсивное взаимодействие данных дискурсов свидетельствуют об их глубоких онтогносеологических основаниях, не сопоставимых с интеллектуальной модой определённого периода. «Народ» и «не-народ» обретают возможность единства через определённую форму противостояния внешнему цивилизационному миру, раскол между ними нивелируется, таким образом, общей мерой диссонанса по отношению к инородной среде. В наше время «ожидания» общественного идеала мы не можем черпать идеи из глубины своего прошлого, мы вынуждены заимствовать иное, при этом то иное, которое в значительной мере было отторгнуто этой внешней по отношению к нам средой. Модернизация, как и ранее проект строительства коммунизма, выступает как проект социального обновления, определяемого воздействием на общество технической реальности и сконцентрированной при этом на мессианском идеале будущего, являясь одновременно стратегией выведения социального действия за рамки общественной жизни, за пределы возможного воплощения.

На уровне социальной онтологии можно говорить о стремлении нивелировать определённый темпоральный сдвиг, инициированный, в конечном итоге, воздействием техники на общество. Пролетариат как движущая сила революционных преобразований на пути построения коммунизма, средний класс как опора модернизационных проектов – в равной мере представляют собой гармонизацию русского раскола «народа» и «власти». Игнорируя изначальный уничижительный оттенок, приданный этому понятию ещё до распада СССР, российское самосознание восприняло её как проект освобождения одновременно и от «тлетворного влияния» Запада, и от бремени советского прошлого.

«Модернизированными обществами» по малопонятным причинам называют передовые страны, в период перехода к информационной стадии сосредоточившие в своих руках развитие высоких технологий [1, 4]. При этом среднему классу данных обществ не вполне обоснованно приписывают широкий диапазон характеристик, которые никогда не были его отличительными чертами применительно к западному миру, но которые оказываются чрезвычайно востребованными в современной России. Речь идёт о рациональном экономическом поведении, инициативности, профессионализме, которые составляют ценностные ориентиры западного самосознания в целом, а не какой-то отдельной страты или прослойки. В нашей стране они представляют собой некий недостижимый идеал, проект конструирования которого, обосновываемый целями «модернизации», в действительности ориентирован на достижение политического и экономического равновесия.

Средний класс современной России имеет, по-видимому, столь же мало общего с реальным «базовым слоем», сколь и советский народ – с пролетариатом. Вместе с тем, оба они отражают необходимую для стабильности социальной системы степень консенсуса различных властных уровней с управляемыми слоями населения. В качестве критериев «выращива-

емого» среднего класса всё чаще обозначается толерантность к рыночным реформам, а следовательно, и к динамике социально-политических преобразований. Развитие новых технологий и внедрение экономических инноваций является здесь мерилom взаимопонимания власти и народа, критерием лояльности второго к первой. Модернизация выступает здесь как конститутивный элемент взаимодействия личности и государства, солидаризирующихся на основе противостояния внешнему миру, её проект – попытка искусственного формирования центра социального пространства в условиях острой нехватки внутренней сосредоточенности и свободы.

Дискурсы «среднего класса» и «модернизации» являются, с одной стороны, наиболее насыщенными смыслом с точки зрения взаимосвязи различных направлений социальной мысли, с другой, – ключевыми для понимания социальной транзитуции и её завершения. Без большого преувеличения можно отметить, что оба они могут быть рассмотрены в качестве индикаторов состояния общества, основных тенденций его развития и формирования самосознания. Преемственность и взаимосвязь обоих дискурсов – среднего класса и модернизации – очевидна: оба они нацелены на формирование в постсоветском пространстве определённых механизмов социальных взаимодействий.

В нашей стране, где отношения человека и государства смещены на глубоко личный экзистенциально-психологический уровень, конструирование обновлённого социального пространства в последнее время было ориентировано на восстановление утраченного баланса «власти» и «народа». Два социокультурных мира, два разных уровня реальности, составляющих один из самых ярких примеров русского «раскола», обозначили таким образом определённые этапы своего взаимодействия, определённые *конвенциональные аспекты* своего сосуществования, определённые перспективы социально-экономического развития России.

#### Библиографический список

1. **Аврамова, Е.М.** Особенности занятости в России и перспективы формирования российского среднего класса как актора модернизации / Е.М. Аврамова, М.С. Токсанбаева // Вестник института социологии РАН. 2011. №3. С. 106-119.
2. **Лапин, Н.И.** Социокультурные факторы российской стагнации и модернизации // СОЦИС. 2011. №9. С. 3-17.
3. **Малева, Т.** Социальная модернизация и средний класс [Электронный ресурс] // [http://www.socpolitika.ru/rus/social\\_policy\\_research/applied\\_research/document\\_11108.shtml](http://www.socpolitika.ru/rus/social_policy_research/applied_research/document_11108.shtml)
4. **Мареева, С.В.** Экономическое сознание россиян и процессы модернизации // Вестник института социологии РАН. 2011. №3. С. 28-46.
5. Российский средний класс и модернизация (по материалам фокус-групп и экспертных интервью) [Электронный ресурс]: // [http://www.politcom.ru/tables/doclad\\_bunin\\_makarenko.pdf](http://www.politcom.ru/tables/doclad_bunin_makarenko.pdf).
6. **Тихонова, Н.Е.** Средний класс как субъект модернизации России [Электронный ресурс] // <http://www.lawinrussia.ru/srednii-klass-kak-subekt-modernizatsii-rossii>.
7. **Маслов, Е.С.** Ожидание осуществления социального идеала как феномен массового сознания / Е.С. Маслов — дисс. на соискание учёной степени канд. филос. наук. – Казань: КГТУ, 2003. – 188 с.
8. **Тихонова Н.Е.** Низший класс в социальной структуре российского общества // СОЦИС. 2011. №5. С. 24-34.
9. **Аглиуллова, А.Х.** Критерии идентификации среднего класса в России / А.Х. Аглиуллова. — дисс. на соискание учёной степени канд. соц. наук. – М.: МГУ, 2011. – 29 с.
10. **Дождиков, А.В.** Политическая и социальная активность среднего класса в России как основной критерий идентификации его представителей // Вестник МГГУ им. М.А. Шолохова. Серия «История и политология». 2011. №2. С. 57-74.
11. **Казакова, В.И.** Средний класс: феноменологический взгляд // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. Серия «Управление в социальных системах. Коммуникативные технологии». 2011. №1. С. 21-31.
12. **Казакова, В.И.** Российская модернизация в горизонте идеологии «несвершения» // Будущее

- технической науки: материалы международной научной конференции. – Н. Новгород: НГТУ, 2011. С.
13. **Маркова, Т.В.** Модернизация как общественный идеал: возможность, вероятность, ожидание / Т.В. Маркова, В.И. Казакова // Актуальные проблемы. 2011. № 5.
  14. **Луман, Н.** Общество общества / Н. Луман. – М.: изд-во «Логос», 2011. – 640 с.
  15. **Bearle, A.A.** The Modern Corporation and Private Property / A.A. Bearle, G.G. Means (2nd edition) Harcourt, Brace and World, New York, 1967.
  16. **Бодрийяр, Ж.** Функция-знак и классовая логика / Ж. Бодрийяр. К критике политической экономии знака. – М.: Академический проект, 2007. – 335 с.
  17. **Шпенглер, О.** Закат западного мира. Очерки морфологии мировой истории / О. Шпенглер. – М.: изд-во АЛЬФА-КНИГА, 2010. – 1085 с.
  18. **Эвола, Ю.** Миф и ошибка иррационализма / Ю. Эвола. Лук и булава. – СПб.: Владимир Даль, 2009. – 384 с.
  19. **Смирнова, Н.В.** От социальной метафизики к феноменологии естественной установки (феноменологические мотивы в современном социальном познании) / Н.В. Смирнова. – М.: ИФ РАН, 1997. – 120 с.
  20. **Дугин, А.Г.** Социология воображения. Введение в структурную социологию / А.Г. Дугин. – М.: Академический проект, 2010. – 564 с.

*Дата поступления  
в редакцию 27.04.2012*

**V.I. Kazakova**

## **THE MIDDLE CLASS AND MODERNIZATION: NEW CULTURE OF COMMUNISM RECONSTRUCTING**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alekseev

**Purpose:** The topic under consideration is the cultural background and middle class as social actor of Russian modernization.

**Design/methodology/approach:** Social phenomenology theoretical framework is proposed to be the methodological base of the research. The elements of system approach are also used.

**Findings:** The middle class and the modernization are described by means of social consciousness forms and social-ontological levels. The main strategy of their constructing means the balance of the people and the power, which describes as two different spheres of social space. The middle class features contains the elements of «social order», as well as modernization. This situation can be discovered as «the call and the response» of the power and the people dialogue.

**Research limitations/implications:** The results of the research provides a starting-point for new way of contemporary Russian society study.

**Originality/value:** The parallels of middle class and proletarian, modernization and communism are analyzed from phenomenological point of view.

*Key words:* middle class, modernization, proletarian, social act, social ideal, social ontology, social phenomenology.

УДК 1.001

Ю.В. Малахова

## ИЗ ИСТОРИИ МЕТОДА

Нижегородский институт управления при президенте РФ РАГС

Основным предметом анализа в данной статье выступает история развития метода как педагогического феномена в Западной Европе XVII–XVIII веков. Рассматриваются основные взгляды Я. А. Коменского, И. Г. Песталлоцци и И. Ф. Гербарта, оказавшие наибольшее влияние на современную науку.

*Ключевые слова:* метод, методология, теория обучения, исторический анализ, педагогика, образовательные технологии.

В теории обучения есть целый ряд понятий, которые довольно затруднительно «рассортировать»: к какому именно аспекту они относятся? Они не только облегчают взаимопонимание и практику, но и вскрывают взаимоотношения между теорией и реальной действительностью. Сюда относятся: «вхождение (вступление, введение) в тему», «повторение», «применение наглядности», «иллюстрация», «пример». Эти понятия соотносятся с «методом», при этом «метод» трактуется как аспект, а не как некий ящичек, куда все они складываются в определённом порядке. Здесь речь идёт о своеобразном растре формы и содержания: начало дискуссии было положено великим Аристотелем, в её продолжении может принять участие любой актёр или художник, кого род деятельности постоянно сталкивает с диадой «форма - содержание».

В контексте образования эта диада может быть рассмотрена по принципу «спирали». Однако «спираль» - фигура для работы с макроструктурами, а нам необходим «инструмент» для описания микроструктур. Принцип упорядочения содержания стратегических учебных планов (семестровых, годовых, курсовых) мы переносим на организацию социокультурного взаимодействия в образовательном пространстве.

Основная идея «спирали» – всё повторяется на более высоком уровне – настолько проста, что она, если не соотносится с другими методическими идеями, воспринимается как нечто само собой разумеющееся:

- если что-то произошло в понедельник, то это произойдёт и во вторник, но будет более чётким, богатым, стройнее структурированным. И, повторяясь в среду, станет ещё более чётким, богатым, стройным;
- то, что узнал и выучил шестилетний ребёнок, узнает и выучит и 12-летний подросток, но его знания и умения будут чётче, богаче, стройнее. Те же знания и умения 18-летнего юноши, приобретаемые им в вузе, будут соответственно ещё более чёткими, богатыми, стройными;
- всё, что написано в книге на странице 100, было уже на странице 51, но не так развёрнуто и подробно; и всё то же самое можно прочитать на самых первых страницах;
- как сказал Эдгар Алан По, весь сюжет рассказа заключён уже в первом предложении. Применяя этот драматургический (методический) принцип к каждому конкретному уроку, можно утверждать с полной уверенностью: уже введение в урок (в тему) - форма - включает в себя всё содержание; всё последующее - только его развёртывание.

Проиллюстрировать изложенное можно следующим примером. Я.А. Коменский формулирует мысль: «*Deus creavit mundum*» – Бог создал мир. Эта фраза для *tirones* – начинающих; учитель только структурирует (формулирует более логично и последовательно) то, что ребёнок уже знает от своей матери. Он высказывает это знание на латыни, т.е. делает его «научным». Кратко, точно (лапидарно) учитель выражает то существенное, что нужно знать о Боге и о Мире, он даёт базу - *fundamentum*.



На второй ступени школы знания об этих феноменах расширяются, фраза о Мире и о создавшем этот Мир Боге приобретает структуру, становится более пространной, факты дифференцируются. Три слова, составлявшие утверждение для *tirones*, раздвигаются, предоставляя пространство для уточнений: «Deus - Бог, желая проявить своё могущество, мудрость и доброту, - creavit - на пустом месте, из Ничего, создал этот видимый нам всем - Mundum - Мир». Эти «три кита» фразы узнаваемы без труда: Deus, creavit, mundum. Они находятся в её грамматических центрах – субъект (подлежащее), предикат (сказуемое), объект (дополнение). Они гарантируют, что при любом расширении содержания структура знания заключённого в этой фразе - форме - останется неизменной. Она остаётся такой и на третьей ступени школы, где почти выпускники (*perficientes*) встречаются с той же мыслью - содержанием - о создании Мира Богом, но уже заключённой в форму длинного периода из 42 слов.

Таким образом, от простого знания ребёнок у Коменского «пошагово» - *gradatim* - достигает такого уровня информации, какой даёт *theologia* - теория религии. С восхождением к третьей ступени знание становится богаче, шире, полнее, развёрнутее, дифференцированное, но в основе, в общем и целом, оно всё то же. С самого начала оно было неизменным.

Если мы говорим: «Всё повторяется, становясь при этом более дифференцированным», - то мы смотрим на процесс с позиций дидактики. Содержание рассматривается в определённом аспекте и организуется вокруг некоей постоянной величины. Если мы говорим: «Развитие идёт по восходящей», - имея в виду спираль, то мы уже на позициях методики, а точнее, образовательной технологии; учебный процесс развивается поэтапно, «пошагово», и это развитие строго регламентировано во времени: за первым шагом следует второй, за вторым - третий, не обгоняя друг друга и не перепрыгивая друг через друга. О каком временном периоде идёт речь: о шести годах между этапами, об одном месяце или о двух строчках, – не имеет абсолютно никакого значения.

Возвращаясь к истории развития метода как процесса реализации технологии, отметим, что только в эпоху Просвещения профессиональная педагогическая деятельность стала до некоторой степени серьёзным социальным явлением. Деньги и происхождение всё ещё гарантировали привилегии, но эта гарантированность понемногу теряла свою абсолютность. Причина всё увеличивающейся шаткости родовых привилегий крылась в следующем: если человек оценивается по способности мыслить, т.е. иметь разум и пользоваться им, а наличие разума выражается в том, чтобы уметь помножить 2 на 2 и распознать, почему птица летит, а камень падает, и эти способности имеет каждый, кто учился, и если эта оценка применяется в реальной жизни, а не покоится в книгах, где она «прописалась» уже с давних пор, то словные привилегии переходят в разряд профессиональных отличительных признаков, всё ещё существующих. Но они скоро падут с признанием того, что не только человек как явление Универсума, но и сам Универсум построен по единому конструкционному принципу: разум, рацию.

В эту эпоху всеобщее распространение в Западной Европе получил так называемый «катехизисно-сократовский» метод обучения, точнее, научения. Однако в названии метода кроется недоразумение. Сократ, которому хотели подражать «просвещенцы», разумеется, далеко не демократ с позиций понимания демократии в XVIII–XXI веках. Обучая, он задавал вопросы, и придавал, как и его последователи из эпохи Просвещения, большое значение тому, чтобы спрашиваемый, отвечая, подтверждал только то, что он сам увидел, признал и познал. И этим исчерпывается параллельность с Сократом, с его индуктивным методом. Разложенная по миниатюрным полочкам, постигаемая мизерными шажками, экзегеза (толкование) природы и разума коренным образом отличается от сократовского метода познания. Драматургия псевдосократовского урока совершенно иная, она не имеет ничего общего с его «диалогами»: ни перипетий афористичных ситуаций, ни строгой скупости средств театрализованных инсценировок.

Отграничение методов изучения катехизиса от педагогических технологий эпохи Просвещения довольно затруднительно, здесь можно провести параллели, если речь идёт о

работе над текстом. Структура и детали методов идентичны: учитель «катехизирует», т.е. выясняет с помощью вопросов, что написано в тексте. Однако цель, по крайней мере, подразумеваемая, совершенно иная: не знание или зазубривание текста, а тренировка «душевных сил» учащегося, развитие его способностей. Тем не менее, можно дифференцировать эти методы, подчеркнув их различия:

- метод катехизиса предполагает овладение репродуктивными умениями и является инструментом усвоения;
- метод «просветителей» способствует развитию конструктивных способностей и является инструментом для «проникновения в суть».

И всё же в практике эти различия стираются. В целом оба метода сводятся к вопросно-ответной работе: педагог спрашивает, дети отвечают. Точнее, знающий спрашивает, незнающий отвечает.

Заметим в скобках: этот принцип удивительно уютно чувствует себя во всей образовательной вертикали. Тот, кто знает, спрашивает того, кто не знает вообще или знает гораздо меньше. Это одна из наиболее странных, но мало кем замечаемых несуразностей образовательной системы.

Следующий тезис: структура метода педагогических «просветителей» как бы задаётся структурой предмета. Эта мысль важна, но также неверна.

Проследим за реализацией вопросно-ответного метода - он актуален и поныне. Педагог задает вопрос, формулируя его преимущественно с вопросительным словом: кто, что, где, почему, какой? Показывая классу, к примеру, чучело канарейки, он спрашивает: Что это за зверёк? Почему это птица? Какая это птица? Почему это канарейка? Каковы её размеры? Что у неё спереди на голове? Из скольких частей состоит клюв? Какую форму имеет его верхняя часть? Какой формы у птички носовые отверстия? Какова форма нижней части клюва? Зачем канарейке клюв? Каждая деталь предмета исследуется очень педантично, для каждой достойной внимания части готов вопрос. Если сравнить эту «драматургию» с несколькими искусственными обстоятельными построениями Коменского, то можно подумать (и думать!), что вся «соль» этого метода, наиболее характерное в нём, заключается именно в этой «объективной двухмерности», которая скрупулёзно исследуется шаг за шагом. Сначала то, что видно спереди, потом – сзади. Сначала изучается предмет (субъект), а затем его признаки. Прежде описание – информация о том, что можно увидеть в предмете, и только потом анализ: какие выводы можно сделать из увиденного.

Но нельзя запросто «перекидать» информацию о реальной действительности в мозг. Просветители должны были методически грамотно объяснять людям, как «устроена» объективная реальность, обучать их свободному от предрассудков наблюдению и мышлению: так устроен мир, и мы с этим ничего поделать не можем! Но исследовать то, что «сверху», а что «снизу», что «спереди», а что «сзади», какая деталь важнее и почему, почему «красота» канарейки менее значима, чем «польза» от неё – такие вопросы, находившиеся ранее в ящичке с ярлычком «историзм природного мироустройства», а сегодня заменённом на «социальная перцепция» (или «социальная структура реальности»), свидетельствуют о том, что речь здесь идёт не о «фотографировании» – отражении, а о программировании: происходит обучение мировоззрению.

Один из наиболее известных «просвещённых просвещенцев» Иоганн Генрих Песталлоцци считал, что человек как общественное существо органично входит в своё окружение, реальные обстоятельства, благодаря своему «индивидуальному положению», причём между его «силами» и «отношениями» есть диалектическая связь: «Обстоятельства делают человека; в то же время можно сказать, что человек сам творит обстоятельства. Внутри человека живёт сила, способная по его воле изменить его же» [5]. Песталлоцци называет своё утверждение «правдой мастера» (*Meisterwahrheit*). Оптимальное образование и воспитание, считал он, должно строиться в соответствии с естественным ходом развития человеческой природы: «Ход природы в развитии человеческого рода неизменен. Не может быть поэтому двух хо-

роших методов обучения. Только один метод хорош, и именно тот, который основывается на вечных законах природы» [5]. Тезис Песталоцци рождает логический вывод: если педагог хочет изменить человека, он должен способствовать становлению его «внутренних сил» – способностей – в динамике его отношений с реальной действительностью. Иными словами: кто хочет придать пластилину определённую форму, должен знать, что этот материал собой представляет и как с ним обходиться.

В своём универсальном методе Песталоцци ухватил и спрессовал воедино три гетерогенных мысли своего времени.

1. Познание нами мира происходит в процессе приобретения социального опыта, а не извлекается из накопленного опыта: ощущения, «поставляемые» нам органами чувств, приобретают пространственную и временную форму, не зависящую от опыта, с помощью мышления, интеллектуальных категорий. Можно ли этому научить? Имеет ли какое-либо значение то обстоятельство, в окружении каких форм – мебель, игрушки, интерьеры, рисунки тканей, обоев и т.д. – растёт ребенок: округлых, мягких или остроугольных, резко очерченных? Философ ответил бы «нет», педагог же твёрдо отвечает «да!» и изобретает оптимальную стратегию представления окружающего мира.

2. Во времена Песталоцци уже было совершенно ясно, что дети видят, обоняют, слышат, ощущают вкус и чувствуют иначе, чем взрослые, т.е. получают иные ощущения, или по-иному получают ощущения, по-иному познают мир. Но через какое-то время они станут взрослыми - совершенно очевидно, что это произойдёт не наутро после одной из новогодних ночей. Очевидно также, что педагог (и родитель!) должен учитывать это постоянно меняющееся незаметное «вползание во взрослость», выстраивая свои стратегии и определяя тактики в соответствии с этим процессом.

3. Амфитеатр происходящего, паноптикум реальной действительности не имеет границ: мир полон форм и предметов. Для того чтобы дать детям представление о классе насекомых, педагог не должен описывать каждый из 750 000 их видов: достаточно представить осу, блоху и майского жука. Понятие «окно» дифференцируется как «церковное окно», «кухонное окно», «подвальное окно». За презентацией формы «колесо» следует иллюстрация примерами: телега, почтовая карета, бричка, повозка, автомобиль, шасси, вагон и т.д. - тем самым педагог наиболее рациональными способами выводит учащихся на суть вещей.

Эти три обсуждаемых тезиса приводят к трём различным выводам. Обучение должно:

- давать представление о формах;
- соответствовать фазам развития;
- подкрепляться наглядными примерами.

Это не три аспекта одной проблемы, их нельзя «перекрыть» одним методом. Это самостоятельные проблемы, для решения которых необходимы самостоятельные же тактико-технологические действия.

*Первое.* Человеческий аппарат познания и мышления, Кант называет его «душой», располагает «формами», облекающими окружающий мир и синтезирующими его. Как научить этим процессам? Очевидно, наиболее оптимальной будет та техника, которая «нагружает» чувства и разум минимумом содержания: оно обыденно, привычно и даже скучно – гораздо важнее его взаимосвязи и взаимозависимости.

*Второе.* Дети видят и мыслят гораздо менее дифференцированно, чем взрослые. Педагог может им помочь, обращая их внимание на степени, особенности этих взаимосвязей и взаимозависимостей, всё более усложняя их с помощью применяемых способов дифференциации.

*Третье.* Мир полон самых разных явлений и вещей. Педагогу необязательно исследовать их каждое в отдельности. Достаточно научить находить, определять и чувствовать общее: жёлтое, круглое, прямоугольное, доброе, коварное, трудолюбивое – и тогда общие при-

знаки позволят распознать тыкву, колесо, стол, бабушку, змею, пчелу. Для этого вовсе не нужно идти в огород или лес, пробовать, катать, ощупывать и т.д. Обобщенная форма пробирует просеку в окружающих нас хаотичных и неведомых дебрях реальности.

Гениальная универсальность метода Песталоцци состоит в том, чтобы, собрав и обобщив опыт не только школьной, внутренней, но и внешней, реальной действительности, превратить этот опыт в инструмент обучения и взаимодействия, который значит и даёт больше, чем все конституции, святыне таинства и технические достижения.

Значительный след в истории развития образовательного метода оставил и Иоганн Фридрих Герbart. Он рассматривал душевную жизнь как единое целое и говорил: «Душа всегда находится в движении. В ней среди массы ассоциаций витают фантазии». Он исходил из того, что метод обучения должен основываться на психологических началах, так как всё развитие личности «совершается изнутри». Излагая свои мысли о воспитывающем обучении, Герbart начертал два направления образования: «ввысь», открывая учащемуся «самое прекрасное и достойное», и в противоположном направлении, анализируя действительность с её «недостатками и нуждами», чтобы подготовить человека к встрече с ними.

Герbart набрасывает четырёхкомпонентную схему деятельности и утверждает: так действуют субъекты образования – отдаются впечатлению, событию в своём опыте, новому делу. Они соединяют новое с уже известным им, соотносят новое и старое, «взирая» на них со стороны, с высоты птичьего полёта, рассматривая их связь и упорядоченность в перспективе, используя обогащенный опыт. «Единое рассматривается детально, представляется углублённо, без туманно-расплывчатых примесей иных представлений. Душа, фантазия идут от представления к представлению, соединяют их, не позволяя им ни незаметно перетекать одно в другое, ни просто сосуществовать рядом. Разделённые и снова объединённые части целого, каждая на своём месте, образуют некий порядок, систему. Свободное движение в этой системе порождает новые образы и представления, которые можно проверить применением на практике» [4].

#### Цепочка Герbart:

Klarheit	+	Assoziation	+	System	+	Methode
Ясность	+	Ассоциация	+	Система	+	Метод

Эта цепочка выводит на его метод познания. В ней прозрачна параллель с аристотелевыми ступенями познания: ощущения – память – опыт – наука. В самом деле, через ощущения мы обретаем ясность об объектах окружающего нас мира, ассоциации идентифицируются в памяти, образуя стойкие связи, опыт систематизируется, а метод можно понимать как науку о том, как действовать. В «переводе» же на «образовательный» язык это означает: к обучающемуся «подключается» обучающий его субъект, они вступают во взаимодействие, а четыре звена цепочки раскрывают смысл и последовательность его, субъекта, деятельности, не отражая того, что в действительности происходит на «просцениуме социализации». При этом процессуальный характер социокультурного взаимодействия как бы затушёвывается, а термины

Darbietung	+	Verknüpfung	+	Zusammenfassung	+	Anwendung
Представление	+	Соединение	+	Обобщение	+	Применение

предложенные впоследствии школой взамен тех, которые ввёл Герbart, слабо его отражают. Кто соединяет? Может что-либо соединиться само по себе? Трудно это представить. На примере речевого взаимодействия это можно объяснить так: «Ты молодец!» - говорит X. Этот звуковой сигнал Y идентифицирует со своим предыдущим речевым опытом, воспринимает его и осознаёт в соответствии с речевой ситуацией. Второе звено в цепочке, кажется, выпадает: смысл сказанного никто третий не должен растолковывать, он понятен адресату без посредников.

Недооценка образовательной системы со стороны общества, умаление её значения явилось, безусловно, одной из причин того, что концептуальная ясность метода познания Гербарта была на практике (речь идёт о периоде Реформации) руинирована. Взамен было предложено более свободное, «вольное» его толкование, структурированное уже в пять этапов, что, впрочем, в системообразующем аспекте не столь уж значимо:

Vorbereitung + Darbietung + Verknüpfung + Zusammenfassung + Anwendung  
Подготовка + Представление + Соединение + Обобщение + Применение.

Увеличивая угол рассмотрения проблемы, мы получаем не только жёстко структурированную организацию деятельности во времени безотносительно объёма её содержания, будь то урок, цикл или учебный год, когда все пять этапов неукоснительно следуют один за другим, но и технологию, применимую всюду, в любой социальной сфере. По этому алгоритму работают Шекспир и иллюстрированный еженедельник, армия и реклама зубной пасты, кабинет министров и доцент, читающий лекцию. Эта технологическая цепочка порождает следующие вопросы: откуда берётся то, что мы связываем воедино, как мы связываем это с выводами, что мы обобщаем с целью применения, как мы применяем полученное? Исчерпывающих ответов на эти вопросы не даёт ни учебный текст, ни энциклопедия, ни психотерапевт, ни средства массовой информации. Но метод работает - познание (обучение) происходит.

Метод, предложенный Гербартом, предлагает «извлекать» представления, служащие основой мыслей, из опыта и социального взаимодействия. Обучаемый уже имеет некоторый их запас, пусть неупорядоченный и неполный. Но без этого запаса обучение теряет под собой почву. Метод Гербарта, по сути, представляет собой каталог точек зрения. Технология управления процессом познания и взаимодействия может быть основана на этом методе при условии допущения расширяющих проблемное поле факторов, как то: «душа», «расположение духа», настроение, опыт в представлениях и в мыслительной деятельности.

И. Ф. Гербарт предложил концепцию полного акта мышления как образовательной цели. Проблемность образования в данном контексте заключена в вопросе: как индуцировать мысль? Оригинальную трансцендентальную дидактику разработал М.К. Мамардашвили, опираясь на собственные концепции человека и «живого знания». Он считал, что следует учить «правильному отношению» к акту мышления, но сознание трактовал в фундаментальном, онтологическом, а не эмпирически-психологическом смысле:

«Мыслить - значит быть причастным «вечному настоящему», которое и есть первичная структура сознания. Мы должны мыслить, так как бытие сознания, мысли неустранимо изначально, онтологически» [2]. Традиционная дидактика избегала «бытийной понимающей хромотопики сознательных явлений», ибо исходила из идеала инструментальной рациональности и концепции знания как «содержания». Идея Мамардашвили заключалась в определении порядка индуцирования физического образа мысли, её «метафорической арматуры» невербальными средствами, такими, как нагнетание, ускорение, интонация, пауза, обрыв, повторение, жесты, «харизма» лектора, а также особых стратегий речи, в том числе «психомоторных» глагольных форм. Он погружал слушателей в особое психомоторное состояние, дающее возможность «искать, находить, и следовать за физически-телесным продвижением Мамардашвили от одной мысли к другой» [3].

Он организовывал «кружение мысли» по закону феноменологической редукции возле точки – начала мысли, выбирая определённый угол зрения в перспективе «захвата» мира мыслью с помощью пластических, психомоторных, аффективных сил индивида. Мамардашвили сравнивал сознание со «всепроникающим эфиром», который подобен волне, распространяющейся и обнаруживающей «другого» как свою границу (узнавание «Я» в «ТЫ») и возвращающейся к своему источнику, обогатившись новыми смыслами [2]. Источником проблематизации при взаимодействии выступает экзистенциальное переживание, дополнен-

ное энергией внешнего участия. Мысли он соединял трансгрессивными глагольными формами, вбирая в себя психомоторику субъектов взаимодействия. Те, кто слушал, научались «заскочить» на стадию персонификации и обретали умение привносить в повседневность и профессиональную деятельность дополнительные смыслы, связанные с трансцендентальными основаниями культуры.

Подчеркнём важность чувственного в процессе образования мысли, её кристаллизации: каждая мысль имеет свою эмоциональную матрицу. Поэтому память, «замешанная» на эмоциях (эмоциональная), быстро формируется, долго функционирует и сохраняет информацию, благодаря эмоциональному отношению к явлению.

Процесс обучения перманентен, он происходит везде и всегда: смотрим ли мы кино, читаем ли газету или рекламный щит, слушаем оперу или «болеем» за любимую команду, обедаем в кафе или сидим на уроке. В основе этого процесса лежит универсальная технология: *программирование*. Пластину придаётся определённая форма - он программируется. В музыкальное произведение закладывается определённое содержание - оно программируется. Этой деятельностью занимались Иисус и Геббельс, Ленин и Де Голль, Петр I и Столыпин; этим занимаются политик и пиарщик, диск-жокей и преподаватель.

Содержанием программы может быть таблица умножения и свастика, демократия и устав гарнизонной службы, антисемитизм и астрология, периодическая система Менделеева и противозачаточные пилюли, иностранный язык и методы обучения. Такая программа не «вырастает» в мозгу, как опухоль, не оседает в виде снега, не вырабатывается рефлексом на какой-либо раздражитель из окружающей действительности - она закладывается не естественным, но искусственным путём и является следствием реализации обучающих («программирующих») технологий в рамках управляемого образовательного процесса.

Основываясь на историческом анализе метода как основы современной образовательной технологии, подведём итог. Технологии взаимодействия в образовательном процессе выступают механизмом освоения человеком социокультурного пространства. Они имеют задачей не обучение действиям по алгоритму, но развитие у человека способности строить алгоритм социокультурных действий как основную потребность информационного общества. Духовно-творческий потенциал личности раскрывается только в инновационном образовании, базирующемся на принципах антропоцентризма.

Инновационные образовательные технологии (методы) объединяют научную теорию, профессионально-управленческую практику, методологию и методику взаимодействия в образовательном процессе в единое пространство и представляют собой механизм культурного развития человека, его внутреннего мира, ценностных ориентаций, мышления и речи. Они составляют идейно-организационную основу новой дидактики, соответствующей изменениям социокультурного пространства в информационном обществе.

На самореализацию взаимодействующего человека как языковой личности оказывают влияние не только социокультурная среда и специфика образования, но и национальные традиции, и инновационные тенденции глобализации социальных процессов. Совокупность способностей и свойств личности, развивающихся в образовательном пространстве, обеспечивают ей комфортное, духовно гармоничное и рационально организованное, национально обусловленное и интеркультурно диалогизированное взаимодействие в реальной действительности.

#### Библиографический список

1. **Мамардашвили, М.К.** Как я понимаю философию: сб / под общ. ред. Ю.П. Сенокосова. – 2-е изд., изм.и доп. – М.: Прогресс-Культура, 1992. – 414 с.
2. **Мамардашвили, М.К.** Неизбежность мысли // Человек. 1999. № 1.
3. **Подорога, В.А.** Феноменология тела. Введение в философскую антропологию / В.А. Подорога. – М.: Ad Marginem, 1995. – 339 с.

4. **Herbart, J.** Allgemeine Pädagogik aus dem Zweck der Erziehung abgeleitet. In: Kleine pädagogische Texte 25. Weinheim: Beltz, 1960. S. 49-51.
5. **Pestalozzi, J.H.** Übergang zu dem Wesentlichen meines Buches. Edition Arnold Steuzel. Klinkhardts päd.Quellentexte. Heilbrunn: Klinkhardt, 1962.

*Дата поступления  
в редакцию 27.04.2012*

**J.V. Malakhova**

## **ON THE ISSUE OF METHOD HISTORY**

Nizhny Novgorod Institute of Management under the President of the Russian Federation RAGS

**Purpose:** The main subject of present article analysis is the historical development of methods as pedagogical phenomenon in West Europe of XVII-XVIII centuries. Design/methodology/approach. The theoretical-methodological base of the article combines descriptive and comparative analysis.

**Findings:** The approach described in this paper can be applied for theoretical interdisciplinary composing. It means new opportunities of humanitarian scientific methodology.

**Research limitations/implications:** The application field of this research results is the great diapason of theoretical and methodological base of various interdisciplinary research levels.

**Originality/value:** The main ideas of Ya.A. Comensky, I.G. Pestalozzi and I.F. Herbart are conceded which have made the main influence on the modern science.

*Key words:* method, methodology, teaching theory, historical analysis, pedagogic, educational technologies.

УДК 65.0

А.Е. Меркулов

## ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ, МЕТОДОЛОГИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОГО ОБЩЕСТВА

Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов

Анализируются историко-методологические аспекты теории постиндустриального общества, её возможные перспективы в наступившем столетии и возможности применения к современному российскому обществу. Проанализированы смысловые акценты постиндустриализма применительно к науке, образованию, социальной структуре общества, технологической сфере и политике.

*Ключевые слова:* постиндустриальное общество, информационное общество, научное знание, информация, информационные технологии.

К середине XX века стало очевидно, что эпоха индустриального общества, которое формировалось на Западе с конца XVIII века, подходит к концу. Социальная философия ответила на этот парадигматический сдвиг значительным количеством теорий развития, авторы которых стремились представить максимально адекватный анализ происходящих изменений и наиболее вероятный прогноз развития общества. Общеизвестно, что немалая часть этих теорий основывается на теории постиндустриального общества, которая является логическим завершением эволюции европейской социальной мысли. В теории постиндустриального общества нашли свое отражение идеалы, ценности и методология философии эпохи Просвещения, позитивизма, Вебера, некоторые аспекты марксизма, а также ряд предположений, высказанных послевоенными исследователями Кларком и Фурастье.

Мы можем выделить следующие историко-философские и методологические предпосылки формирования теории постиндустриального общества.

1. Понятие общественного прогресса и исторический оптимизм: видение человеческой истории как процесса поступательного развития общества в направлении все больше-го совершенства, убежденность в неизбежности достижения такого состояния.

2. Анализ общественных явлений с последовательно материалистических позиций.

3. Периодизация истории на основании стадий технологического развития, доминирование технологических аспектов производства над идеологическими и культурными различиями, применение методов естественных наук к гуманитарным наукам.

4. С некоторыми оговорками, историзм, т.е. положение о том, что можно выделить определенные закономерности и тенденции исторического развития, и на этом основании предугадать направление общественного развития.

5. Вера в неограниченные способности человеческого разума, сциентизм и технократизм, положение о науке как непосредственной производительной силе общества.

6. Разделение народного хозяйства на первичный, вторичный и третичный секторы.

7. Методологическое правило последовательного наблюдения и анализ общественной системы в различные эпохи, которые оно проходит.

Возвращаясь к проблеме терминологии, можно согласиться с В. Иноземцевым, который полагает, что многочисленные определения формирующегося социума, предложенные в 70–80-х годах прошлого века, за исключением постиндустриального общества, акцентируют внимание на частных признаках современного общественного порядка, не позволяя полностью и комплексно определить его характер. В связи с этим, понятие «постиндустриальное общество» представляется ему самым удачным, так как оно акцентирует внимание на основ-



ном признаке, который преодолевается в формирующемся социуме: на индустриальной природе прежнего способа производства. Помимо этого, использование понятия «постиндустриальное общество» «предполагает, пусть в неявном виде, что определяющие признаки нового строя невозможно четко назвать и достаточно полно описать, пока сам строй не достигнет известной зрелости» [4, с. 32].

Что касается столь популярной ныне теории информационного общества, в определенном плане, глубину и определенность эта концепция получила только с развитием теории постиндустриального общества, соответственно теорию информационного общества можно рассматривать как одно из направлений постиндустриализма [5, с. 21].

Термины постиндустриальное и информационное общество являются близкими, если не идентичными по своему содержанию, поскольку постиндустриальное общество, по существу, является информационным, так как информационная деятельность является в нем определяющей. В этом смысле понятие «информационное общество» более конкретно, чем «постиндустриальное». Однако уже в конце 70-х годов XX в. «определяющие признаки нового строя»: стремительное развитие информационных технологий – проявились довольно явно. Это привело к тому, что главный теоретик постиндустриального общества Д. Белл, стал рассматривать информационное общество в качестве стадии развития постиндустриального общества. Если мы в определении постиндустриального общества, т.е. общества, «в экономике которого приоритет перешел от преимущественного производства товаров к производству услуг, проведению исследований, организации системы образования и повышению качества жизни; в котором класс технических специалистов стал основной профессиональной группой и в котором внедрение нововведений... во все большей степени зависит от достижений теоретического знания» [1], конкретизируем понятие «услуга» как «услугу по предоставлению, распространению, хранению и использованию информации», то получим определение информационного общества.

В современной литературе термины «постиндустриальное» и «информационное общество» используются в качестве взаимозаменяемых понятий. Белл упоминал понятия «информационное» и «постиндустриальное общество» как эквивалентные: «Постиндустриальная эра наступает в результате длинной цепи технологических перемен... Но если мы определим информационное общество как такое, в котором существуют...» [1]. Зачастую его относят его в первую очередь к теоретикам информационного, а не постиндустриального общества: «...информационного общества, о котором писали Д. Белл, А. Турен, Э. Тоффлер, П. Дракер, З. Бжезинский, Й. Масуда...» [3, с. 10].

В проекте «Стратегии развития информационного общества России», который обсуждался на Совете Безопасности РФ 25 июля 2007 года, можно прочитать: «Информационное общество характеризуется высоким уровнем развития информационных и телекоммуникационных технологий и их интенсивным использованием гражданами, бизнесом и органами государственной власти...Переход от индустриального к постиндустриальному обществу существенно усиливает роль интеллектуальных факторов производства» [8]. В чем причина популярности термина информационное общество? Ответ на этот вопрос прост: представители науки и политической элиты не могут использовать «негативное» определение для характеристики современной эпохи.

Постиндустриальное общество возникает вследствие последовательности перемен, происходящих исключительно в социально-экономическом секторе общества, который не оказывает влияния и не подвергается влиянию культуры и политики. Этот сектор включает в себя систему экономических отношений, уровень научно-технического развития, структуру занятости, систему социальной стратификации.

Развивая идеи Фурастье и Кларка, Белл отмечал, что общество проходит три периода в своем развитии:

1) доиндустриальное общество, основными характеристиками которого является добывающий характер экономики и взаимодействие человека с природой;

2) индустриальное общество носит производящий характер: оно использует энергию и машинную технологию для изготовления товаров, отличается взаимодействием человека с преобразованной природой и машинами;

3) постиндустриальное общество характеризуется взаимодействием человека с человеком, опосредованным при помощи телекоммуникации и компьютеров.

Наступление одной из перечисленных стадий экономического развития полностью не ликвидирует другие. Индустриальное общество включает в себя некоторые структуры, элементы и процессы, присущие доиндустриальному строю. Таким же образом постиндустриальное общество не полностью ликвидирует черты, характерные для предыдущих стадий развития.

В связи с этим, неудивительно, что в постиндустриальном обществе имеются те же отрасли промышленности и сельского хозяйства, что были и раньше, хотя и происходит изменение их значения для функционирования общественной системы. Самый распространенный вид трудовой деятельности является детерминирующей чертой общества. Историческое своеобразие постиндустриального общества заключается в том, что оно основано на взаимодействии между людьми, при этом основным ресурсом общества является не мускульная сила или физическая энергия, а информация.

Для Белла одним из осевых принципов социальной структуры постиндустриального общества является «экономизация через распределение ресурсов в соответствии с принципами наименьших затрат, взаимозаменяемости, оптимизации, максимизации и т.д.» [6, с.58]. Иными словами, ключевым фактором в переходе от одной общественной системы к другой является рост производительности труда, который становится возможным вследствие применения принципа рационализации (эффективности).

Белл считал, что к 1973 году вполне ясно определилось пять черт общественной системы будущего [1]:

- переход от экономики обрабатывающих отраслей к экономике услуг;
- растущее преобладание «класса специалистов и техников»;
- главенствующая роль теоретических знаний в качестве основы нововведений и формулирования политики;
- ориентация в будущем на контроль и оценку технологии;
- принятие решений на базе новой «интеллектуальной технологии».

Постиндустриальное общество можно определить как социум, «в экономике которого приоритет перешел от преимущественного производства товаров к производству услуг, проведению исследований, организации системы образования и повышению качества жизни; в котором класс технических специалистов стал основной профессиональной группой и, что самое важное, в котором внедрение нововведений... во все большей степени зависит от достижений теоретического знания... Постиндустриальное общество... предполагает возникновение интеллектуального класса, представители которого на политическом уровне выступают в качестве консультантов, экспертов или технократов» [1].

Белл недаром считал, что показателем зрелости постиндустриального общества является «способность трансформировать научные знания в конечный продукт, называемый обычно “высокими технологиями”». Э.А. Араб-Оглы отметил, что наука и знание стали не только важнейшим ресурсом постиндустриального строя, но и эмбрионом нового общественного строя в индустриальную эпоху.

Белл утверждал, что в постиндустриальном мире имеет значение не просто большое количество информации, то есть «обработки данных в самом широком смысле слова», а знания. Под знанием Белл подразумевал «организованный набор фактов или идей, представляющий обоснованное суждение или результат опыта, который передается через какое-либо коммуникативное средство в некой систематической форме» [1, с. 168]. П. Дракер отмечал, что «и на Западе, и на Востоке знание всегда соотносилось со сферой бытия, существования. И вдруг почти мгновенно знание начали рассматривать как сферу действия. Оно стало одним

из видов ресурсов, одной из потребительских услуг» [5, с. 150]. Белл утверждал, что постиндустриальное общество необходимо рассматривать в качестве общества знания, в котором «в связи с центральной ролью теоретического знания возникли новые отношения между наукой и технологией» [1, с. 212].

Очевидно, что наука во все времена в той или иной степени являлась движущей силой общественного развития, однако трансформация всех уровней социальной системы под воздействием теоретического знания является весьма молодым явлением. Некоторые американские исследователи отмечали, что научно-технический прогресс, «превратившись из экзогенного по отношению к хозяйству в эндогенный фактор, обеспечил примерно 40-50% экономического роста США в последние 50 лет и в среднем 2/3 прироста производительности труда» [7, с. 105].

Каждая общественная система опиралась на знания, но только в информационном обществе систематизация результатов теоретического исследования стала основой технических инноваций, изменяя взаимодействие науки с производством. Большинство изобретений индустриальной эпохи представляло собой результат аккумуляции эмпирического опыта, в то время как, начиная с 60-х годов прошлого века, фундаментальные научные исследования предшествуют технологическим прорывам. В постиндустриальном обществе мы можем наблюдать преобладание теории над эмпирическим опытом и «кодификацией знания в абстрактные системы символов, которые могут быть использованы для того, чтобы пролить свет на различные и разнообразные сферы практического опыта» [1, с. 20].

Значительная часть современных научных знаний была получена в результате усилий, осознанно направленных на понимание фундаментальных законов и получения данных, необходимых для достижения последующих технических результатов. Часто повышение роли науки в общественном производстве связывают с «систематическим соединением науки с изобретательством, главным образом через организацию научных исследований и технических разработок» [1, с. 266-267].

Таким образом, Белл, хотя и не в совсем явной форме, высказывает «продуктивистское» представление о знании, информации, науке как неотъемлемых элементах производительной силы. Главный смысл их воздействия на общество заключается в иницировании роста производительности труда и повышении эффективности хозяйства. Если капитал и труд являются основными структурирующими элементами индустриального социума, то информация и фундаментальное научное знание – это основа постиндустриального общества.

В связи с этим выдвигались предположения, что центральная роль теоретического знания в постиндустриальном обществе определит и новый статус университетов. «Подобно тому, как фирма (предприятие) являлась ключевым институтом в последние сотни лет благодаря ее роли в организации массового производства товаров-вещей, университет или какая-либо другая форма институционализации знания будет центральным институтом в последующие сотни лет благодаря своей роли источника инноваций и знания», – прогнозировал Белл [1].

Существенной характеристикой постиндустриального общества явится новая интеллектуальная технология, используемая в принятии управленческих решений. Если прежде действия были ответом на практические запросы (технические проблемы, социальные сложности), теперь значительная часть жизни организована на основе теорий поведения, на абстрактных, обобщенных принципах. Он полагал, что в ближайшем будущем интеллектуальная технология будет играть столь же выдающуюся роль в человеческих делах, какую играла машинная технология в прошедшие полтора века.

Новые математические и экономические методы служат технологической основой моделирования, имитации и других элементов системного анализа теории решений, позволяющей находить более эффективные, «рациональные» подходы к экономическим, техническим и даже социальным проблемам. Основной проблемой постиндустриального общества является проблема «организованной сложности», т.е. проблема управления огромными системами с большим числом взаимозависимых переменных. В связи с этим, «интеллектуаль-

ными технологиями» Белл называет применение средств и методов, разрабатываемых в таких областях как кибернетика, теории игр, решений, информации, полезности. Применение ин-теллектуальной технологии позволяет выявлять определенные закономерности из больших множеств, получать оптимальные решения из противоречивых альтернатив, определять рациональные моменты в условиях неопределенности.

Интеллектуальная технология, в интерпретации автора теории постиндустриального общества, предполагает использование алгоритмов как правил решения проблем взамен интуитивных суждений. Если роль «мастера» в интеллектуальной технологии играет теория принятия решений, то роль «инструмента» выполняет компьютер. Без компьютера применение новых математических средств было бы предметом лишь интеллектуального интереса или осуществлялось бы с «очень низкой разрешающей способностью». Именно компьютеры, позволяющие выполнять значительное число операций в течение короткого интервала времени, делают возможным развитие интеллектуальной технологии.

Компьютеризация позволяет не только управлять «организованной сложностью», но и благодаря программированию создавать «интеллектуальную технологию» [1, с. 29], которая включает в себя знания (правила, операции и т.д.) и, в свою очередь, способствует инновациям, основанным на теоретическом знании. Белл считал, что компьютеры позволят более активно применять интеллектуальные технологии для решения практических задач. Его теория стала одной из первых попыток понять суть развивающихся компьютерных и коммуникационных технологий.

По мнению автора теории постиндустриального общества, в XXI столетии решающее значение для экономической и социальной жизни, способов производства знания, а также для характера трудовой деятельности человека приобретет развитие нового социального уклада, ждущегося на телекоммуникациях. Становление постиндустриального общества он связывает с развертывающейся революцией в организации и обработке информации и знаний, в которой центральную роль играет компьютер [2, с. 330]. Компьютер является символом и одновременно материальным носителем очередной технологической революции: именно компьютер коренным образом трансформирует общество второй половины XX века. Таким образом, ключевая роль в новом обществе отводится информации и электронным средствам, обеспечивающим техническую базу для ее использования и распространения.

Для постиндустриального общества будет характерна новая элита, основанная на квалификации, получаемой индивидами благодаря образованию, а не на обладании собственностью, наследуемой или приобретаемой за счет предпринимательских способностей, и не на политической позиции, достигаемой при поддержке партий и групп.

Американский социолог отмечает, что в постиндустриальном обществе знание применяется к области самого знания и это можно назвать революцией в сфере управления. Знание быстро превращается в определяющий фактор производства, отодвигая на задний план и капитал, и рабочую силу. В постиндустриальном обществе личные качества, образование и способности человека определяют его доходы в большей мере, чем его формальный статус, предоставляя невиданный уровень свободы от внешнеэкономической конъюнктуры: нельзя лишиться таланта, в отличие от земли или капиталов.

Таким образом, в значительной степени снимается главное противоречие индустриального капитализма – конфликт из-за средств производства. Беллу постиндустриальное общество представлялось обществом неограниченных ресурсов, так как знание и информация – это возобновляемый ресурс. Применение интеллектуальных технологий в экономике и социальной сфере позволит избежать экономических кризисов и добиться высокого уровня сбалансированности и устойчивости в обществе, грамотное планирование устранил все превратности социальной жизни.

Если рассматривать социальную сферу, то вступление общества в постиндустриальную эпоху характеризуется значительным сокращением числа работников, занятых в сельском хозяйстве и промышленности, при постоянном и уверенном росте производительности,

обеспеченном непрекращающейся рационализацией производства. Увеличение производительности промышленности приводит к росту богатства, которое может быть потрачено на удовлетворение новых потребностей, что ведет к развитию сектора услуг, который до определенного момента зависит от производительности в первичном и вторичном секторах, поскольку потребляет ресурсы, произведенные в них. В связи с этим, он высказывал надежду, что политическим строем постиндустриального общества будет меритократия, поскольку власть будет принадлежать коллективному обладателю важнейшей производительно силы - научному сообществу.

Подводя итоги, следует отметить, что теория постиндустриального общества не претендует на создание глобальной картины мира; она отчасти неконкретна, а многие положения Белла, в особенности в политической и культурной сфере, оказались неверными. В то же время, как уже было показано, родоначальник постиндустриализма никогда не претендовал на то, что его теория станет истиной в конечной инстанции. Теория постиндустриального общества является одной из самых адекватных и непротиворечивых концепций общественного развития, предложенных на сегодняшний день. Как показало время, создатель этой концепции представил наиболее реалистичный прогноз развития экономической и технологической сфер общества.

#### Библиографический список

1. Белл, Д. Грядущее постиндустриальное общество. Опыт социального прогнозирования / Д. Белл. – М.: Academia, 1999.
2. Белл, Д. Социальные рамки информационного общества // Новая технократическая волна на Западе. – М., 1986. С. 330.
3. Иванов, Д.В. Виртуализация общества / Д.В. Иванов. – СПб: Петербургское востоковедение, 2000.
4. Иноземцев, В.Л. Современный постмодернизм: конец социального или вырождение социологии? // Вопросы философии. 1998. №9. С. 27-37.
5. Новая постиндустриальная волна на Западе. Антология / под ред. В.Л. Иноземцева. – М.: Academia, 1999.
6. Уэбстер, Ф. Теории информационного общества / Ф. Уэбстер. – М.: Аспект Пресс, 2000.
7. Экономическая теория национальной экономики и мирового хозяйства. – М.: – Политическая экономия /под ред. А.Г. Грязновой, Т.В. Чечеловой, 1998.
8. <http://www.kremlin.ru/text/docs/2007/07/138695.shtml>.

*Дата поступления  
в редакцию 27.04.2012*

**A.E. Merkulov**

#### **HISTORICAL BACKGROUND, METHODOLOGY AND MAIN PROPOSITIONS OF THE POSTINDUSTRIAL SOCIETY THEORY**

St. Petersburg State University of Economics and Finance

**Purpose:** The author aims to prove that theory of postindustrial society has been developed in within western socio-philosophical tradition and its application diapason is limited.

**Design/methodology/approach:** The theoretical-methodological base of the article combines descriptive and axiological elements. Comparative analysis also used by the author gives new ways of revealing positive and negative aspects of postindustrial society methodology.

**Findings:** The paper focuses on the postindustrial society theory applications concerned modern Russia.

**Research limitations/implications:** This article looks at the systematization of further research of the contemporary society nature.

**Originality/value:** The results show that postindustrial society theory includes incorrect points and false tendencies.

*Key words:* postindustrial society, informational society, scientific knowledge, information, technology.

---

## МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Д. Вавилов

### ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА СО СМЕЩЕННОЙ ОСЬЮ КАЧАНИЯ МАЯТНИКА

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Разработан интегральный компенсационный акселерометр с электростатической отрицательной обратной связью. Микромеханический чувствительный элемент выполнен из монокристаллического кремния. В контуре регулирования акселерометра в качестве корректирующего устройства применен ПИД-регулятор и микроконтроллер.

Получены расчетные соотношения для микромеханической и электрической частей, а также для коэффициентов ПИД-регулятора. Акселерометр рассчитан на диапазон 50-100 g. Достигнутая статическая точность составляет  $10^{-3}$  от диапазона измерений, а динамическая полоса пропускания - порядка 100 Гц. Приведена программа оптимизации параметров акселерометра по переходному процессу.

Для сравнения на графиках приведены результаты моделирования процессов успокоения с помощью газодинамического демпфирования в электрическом контуре.

*Ключевые слова:* микроэлектромеханические системы (МЭМС), электростатический преобразователь момента, отрицательная «электрическая жесткость подвеса», микроконтроллерная обработка, программа оптимизации характеристик акселерометра.

Акселерометр является одним из наиболее востребованных приборов в навигационно-пилотажных задачах летательных аппаратов. При интегральном исполнении чувствительные элементы акселерометров чаще всего выполняют маятниковыми со смещенной осью качания. Маятниковость (произведение чувствительной массы на плечо) выполняют по - разному. На рис. 1 – рис. 4 приведены варианты выполнения маятников. Материалом для построения маятников служит проводящий монокремний, заготовки которого применяют в виде прямоугольных пластин 1. Размерную обработку производят с помощью химико-технологических методов, например, окисления, диффузии, сквозного травления 2 и др. Тело маятника представляет собой прямоугольную пластину 3, соединенную с каркасной посредством упругих подвесов 4. Ось качания маятника проходит через упругие подвесы 4 и разделяет пластину на две несимметричные части. На одной из частей пластины выполняют чувствительную массу 5. Вся конструкция микромеханического чувствительного элемента является монолитной: из одного материала и без контактных сопряжений его узлов. Упругие подвесы могут работать на изгиб (рис. 1) или на кручение (рис. 2 – рис. 4).

За счет несимметричности маятника достигается его чувствительность к линейным ускорениям. На рис. 1 и рис. 4 несимметричность маятника выполнена за счет разной длины его частей, на рис. 2 – за счет добавок дополнительной массы к одной из его частей, а на рис. 3 – за счет удаления части массы посредством вытравления сквозного окна. Как динамическая система микромеханический маятник имеет одну степень свободы: угловое движение относительно оси  $x$ . Для всех вариантов маятников передаточные функции одинаковы, разные только коэффициенты, определяемые конструктивными параметрами.

Из приведенных вариантов маятников наиболее эффективным является вариант

(рис. 4). При этом варианте электростатического момента достаточно, чтобы уравновесить момент инерции для ускорений до 500 g. Тем не менее, достаточное силовое уравновешивание не решает полностью всех проблем создания навигационного акселерометра, например обеспечения заданной собственной частоты (10-100 Гц), которая определяет рабочую полосу пропускания, а также обеспечения требуемого нулевого уровня. Частично обе этих характеристики могут быть удовлетворены снижением жесткости упругого подвеса. В свою очередь, снижением жесткости упругого подвеса возможно только уменьшением его размеров, которые по причине потери надежности нельзя снижать беспредельно.

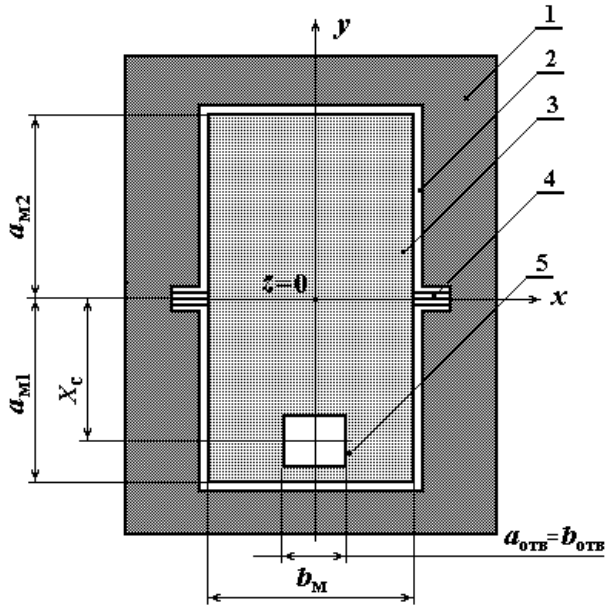


Рис. 1. Смещение оси качания маятника за счет сквозного отверстия

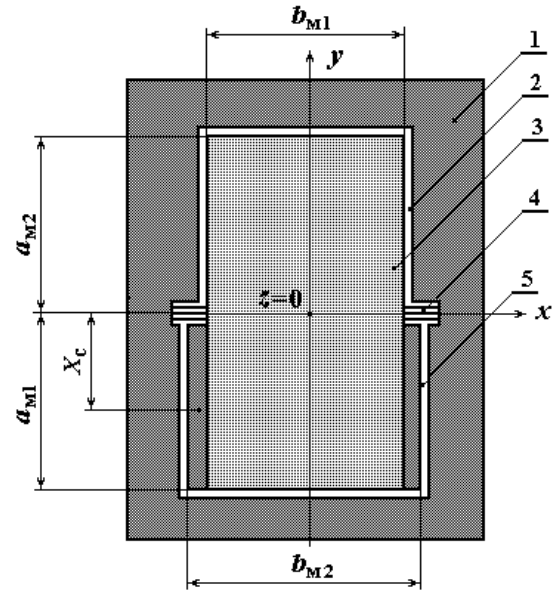


Рис. 2. Смещение оси качания маятника за счет боковых добавочных масс

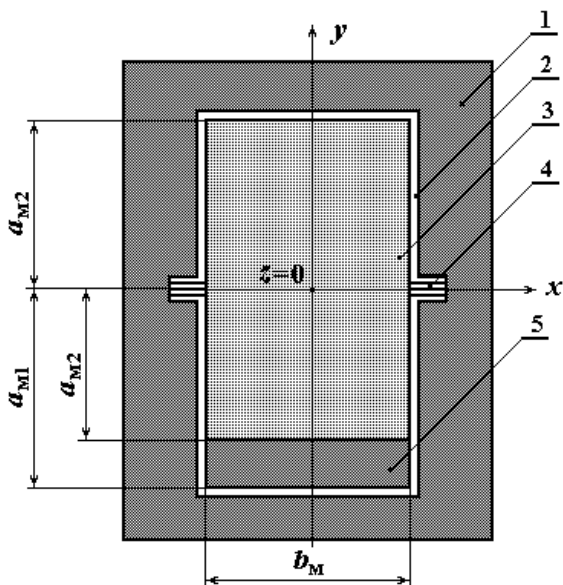


Рис. 3. Смещение оси качания маятника за счет несимметрии его частей:

- 1 – каркасная пластина; 2 – сквозное травление;  
3 – тело маятника; 4 – упругий подвес;  
5 – чувствительная масса

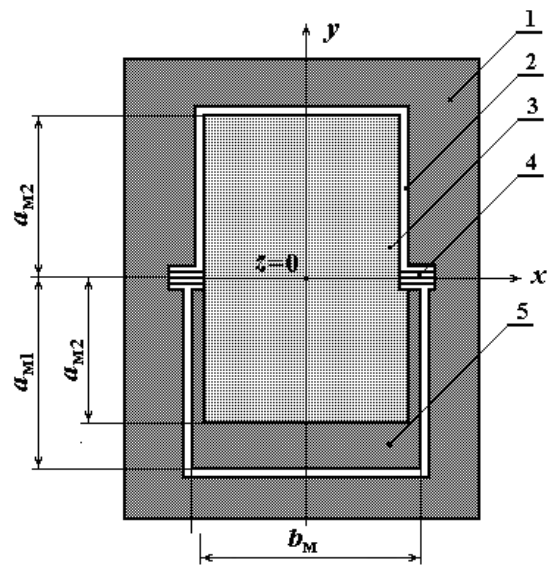
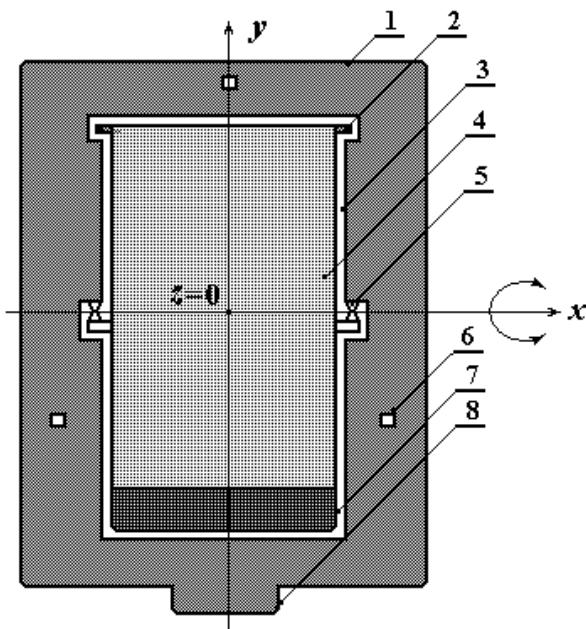


Рис. 4. Смещение оси качания маятника за счет комбинации второй и третьей конструкций

Как подвижный узел маятник имеет одну степень свободы, соответственно описывается передаточной функцией второго порядка:

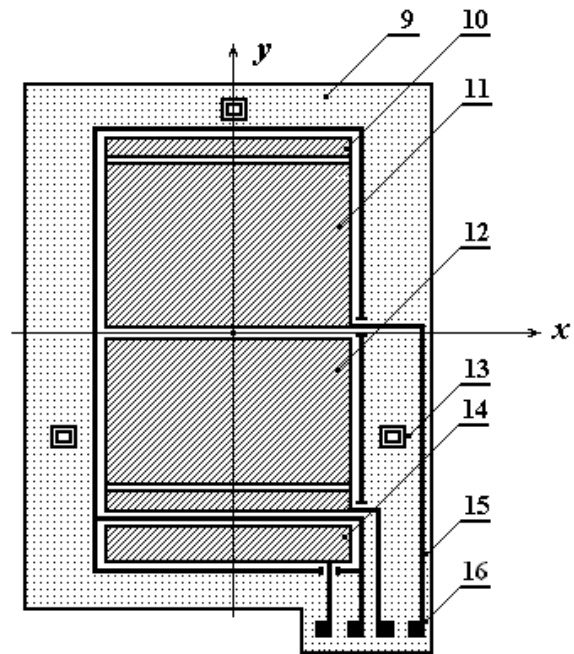
$$W_{\text{пн}}(s) = \frac{mL}{J_x s^2 + K_{\text{дн}} s + G_{\text{кр}}}, \quad (1)$$

где  $m = \rho(a_{\text{м1}} - a_{\text{м2}})b_{\text{м}}c_{\text{м}}$  - чувствительная масса;  $K_{\text{дн}} = \mu[(a_{\text{м1}} + a_{\text{м2}})b_{\text{м}}L]^2/h^3$  - коэффициент демпфирования;  $J_x = \rho b_{\text{м}}c_{\text{м}}[a_{\text{м1}}(a_{\text{м1}}^2/3 + c_{\text{м}}^2/12) + a_{\text{м2}}(a_{\text{м2}}^2/3 + c_{\text{м}}^2/12)]$  - момент инерции маятника относительно оси  $x$ ;  $X_c = a_{\text{м2}} + (a_{\text{м1}} - a_{\text{м2}})/2$  - плечо маятника;  $G_{\text{кр}} = kE_{[100]}b_{\text{п}}c_{\text{п}}^3/96(1 + \gamma)a_{\text{п}}$  - жесткость подвеса на кручение;  $\rho$  - плотность кремния;  $E_{[100]}$  - модуль упругости в кристаллографическом направлении 100;  $k$  - число торсионов упругого подвеса;  $a_{\text{м1}}$ ,  $a_{\text{м2}}$  - длины первой и второй частей пластины маятника;  $b_{\text{м}}$ ,  $c_{\text{м}}$  - ширина и толщина пластины маятника.



**Рис. 5. Чувствительный элемент маятникового типа:**

1 - пластина из проводящего кремния; 2 - ограничитель перемещения; 3 - сквозное травление; 4 - подвижный узел (маятник); 5 - упругие подвесы; 6 - сквозное отверстие для соединения; 7 - чувствительная масса; 8 - отвод для соединения с «землей»



**Рис. 6. Неподвижная обкладка:**

9 - пластина из непроводящего кремния; 10 - электрод датчика угловых перемещений; 11 - диффузионная область верхнего силового электрода; 12 - диффузионная область нижнего силового электрода; 13 - сквозное отверстие для соединения; 14 - электрод тестирования; 15 - охранный контур; 16 - контактная площадка

Чувствительный элемент представляет собой пакет из трех кремниевых пластин, жестко соединенных между собой. На рис. 7 приведен увеличенный фрагмент соединения кремниевых пластин.

Для определения полной передаточной функции маятникового акселерометра в замкнутом контуре воспользуемся структурной схемой (рис. 8) с соответствующими параметрами. Одно из важных требований, предъявляемых к системам регулирования, заключается в том, чтобы постоянное входное воздействие обрабатывалось без установившейся ошибки. Для статических систем при классическом синтезе этого можно добиться с помощью включения ПИД-регулятора в прямую цепь контура регулирования.



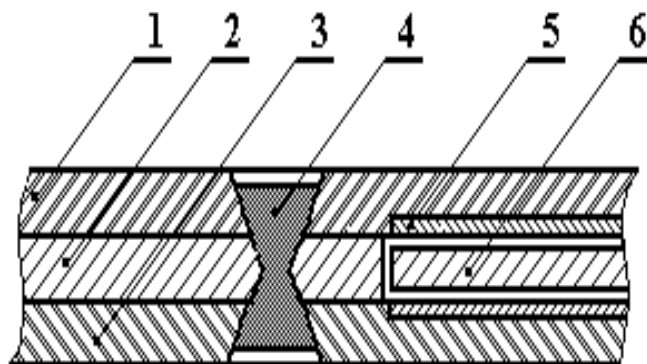


Рис. 7. Фрагмент соединения кремниевых пластин:

1, 3 – пластины из непроводящего кремния; 2 – пластина из проводящего кремния;  
4 – силикатный клей; 5 – проводящий диффузионный электрод; 6 – мятник

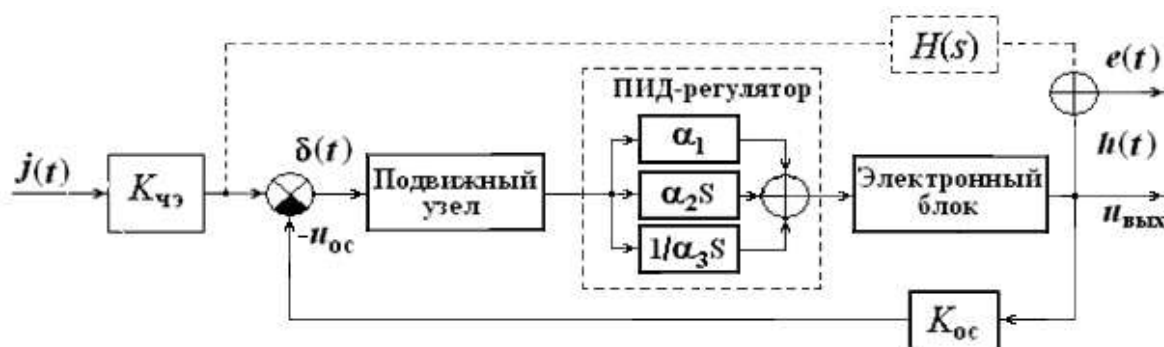


Рис. 8. Структурная схема микроакселерометра

Передаточная функция корректирующего устройства может быть записана в следующем виде:

$$W_{\text{кор}}(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s + \frac{1}{\alpha_3 s}, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  - постоянные коэффициенты регулятора, определяемые требуемыми характеристиками микроакселерометра.

Коэффициент  $\alpha_1$  пропорционального звена выбирается так, чтобы измеряемая величина полностью обрабатывалась по цепи обратной связи, а ошибка стабилизировалась на значении, близком к нулю. Численное значение этого коэффициента устанавливается величиной коэффициента усиления выходного усилителя:

$$\alpha_1 = K_{yc}. \quad (3)$$

$R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  - резисторы в цепях обратных связей операционного усилителя ОУ<sub>1</sub>.

Дифференциальная составляющая  $\alpha_2$  противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, которые могут произойти в будущем. Эти отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему. Чем быстрее регулируемая величина отклоняется от измеряемого значения, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей. Именно это свойство дифференцирующего звена используется в конструкции акселерометра для демпфирования движений подвижного узла. Параметры дифференцирующего звена выбирают по оптимальному переходному процессу акселерометра. Выходной сигнал полностью обеспечивается интегральной составляющей  $\alpha_3$  регулятора. При установившемся режиме на емкости интегратора удерживается напряжение обработки, пропорциональное входному

сигналу. При переменном входном сигнале интегратор отслеживает его изменения с заданной постоянной времени.

Для обеспечения синхронной работы узлов акселерометра постоянные времени механического подвижного узла, дифференцирующего звена и интегратора должны быть равными:

$$T_{\text{мех}} = T_{\text{диф}} = T_{\text{инт}}. \quad (4)$$

Учитывая введенное требование (4), определим постоянные коэффициенты корректирующего устройства в следующем виде:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \sqrt{G_{\Sigma}/J}, \quad (5)$$

где  $G_{\Sigma}$  - разность жесткостей упругого подвеса и отрицательной “электрической жесткости”:

$$G_{\Sigma} = G_{\text{кр}} - G_{\text{эл}}, \quad (6)$$

где  $G_{\text{эл}} = 4\varepsilon_0\varepsilon U_{\text{оп}}^2 FL^2/h^3$  - отрицательная “электрическая жесткость”;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  – соответственно абсолютная и относительная диэлектрическая проницаемость,  $F$  – площадь электрода,  $U_{\text{оп}}$  - опорное напряжение линейризатора,  $L$  – расстояние от оси подвеса до центра приложения силы обратной связи,  $h$  – зазор между неподвижным электродом на крышке и подвижным электродом на маятнике электростатического датчика момента обратной связи.

Одним из недостатков электростатического преобразователя момента является эффект электропереноса между подвижным и неподвижными электродами чувствительного элемента, который имеет место при питании преобразователя постоянными опорными напряжениями. В конструкции разрабатываемого микроакселерометра применен способ, устраняющий этот недостаток [3], посредством применения знакопеременного линейризатора.

Знакопеременный линейризатор включен в цепь обратной связи контура регулирования и управляется выходным аналоговым сигналом. Коэффициент передачи цепи обратной связи определяется в виде

$$K_{\text{ос}} = 2\varepsilon\varepsilon_0 FU_{\text{оп}}L/h^2. \quad (7)$$

Для случая, когда маятник находится в нейтральном положении, площади неподвижных электродов с разных сторон маятника одинаковы и расположены от него с одинаковыми зазорами. При этом электростатическая сила, действующая на маятник, равна нулю. При отклонении маятника относительно оси качания  $\varphi$  на угол  $\alpha$  возникает электростатическая сила притяжения в сторону меньшего зазора. Момент от электростатической силы всегда совпадает по направлению с возмущающим моментом. Создается эффект отрицательной жесткости. Варьируя напряжением на электродах можно достичь любой разности между механической жесткостью упругого подвеса и “электрической жесткостью”. Контур “электрической жесткости” не связан электрически с контуром регулирования измерительного канала. Но при его наличии все характеристики микроакселерометра зависят от разности жесткостей упругого подвеса и отрицательной “электрической жесткости”.

На рис. 9 приведена электрическая схема измерительного канала контура регулирования акселерометра. Схема состоит из емкостного первичного преобразователя с неподвижными и подвижными электродами. Роль подвижного электрода выполняет проводящий маятник, соединенный с «землей». Чувствительная к ускорениям масса показана на маятнике затененной. Электроды силового преобразователя и электроды емкостного преобразователя перемещений изолированы друг от друга и функционируют отдельно. Все узлы электрической схемы управляются микроконтроллером. Выходной сигнал микроконтроллера представляется в двух формах: аналоговой и цифровой.

В соответствии с электрической схемой, микроконтроллер включен в прямую цепь контура регулирования акселерометра. За исключением устройства отрицательной жесткости и источников опорных напряжений микроконтроллер программно управляет всеми узлами и блоками микроакселерометра. Разработанный микроакселерометр ориентирован на

применение микроконтроллера фирмы *Texas* инструмент серии MSP430 с встроенным ШИМ для емкостных датчиков, ключами и выходным операционным усилителем.

В схеме имеется широтно-импульсный модулятор, преобразующий угловые перемещения маятника в изменения длительности прямоугольного сигнала. Состоит модулятор из двух идентичных генераторов меандра, во времязадающих цепях которых включены измерительные емкости. Емкости изменяются дифференциально. В составе широтно-импульсного модулятора имеется фильтр нижних частот, одновременно выполняющий функции масштабного усилителя. Передаточная функция преобразователя перемещений с ШИМ имеет вид

$$W_{\text{ш}}(s) = \frac{U_{\text{оп}} L K_{\text{ус}}}{h (1 + \tau s)}, \quad (8)$$

где  $K_{\text{ус}}$  - коэффициент передачи масштабного усилителя;  $\tau$  - постоянная времени масштабного усилителя.

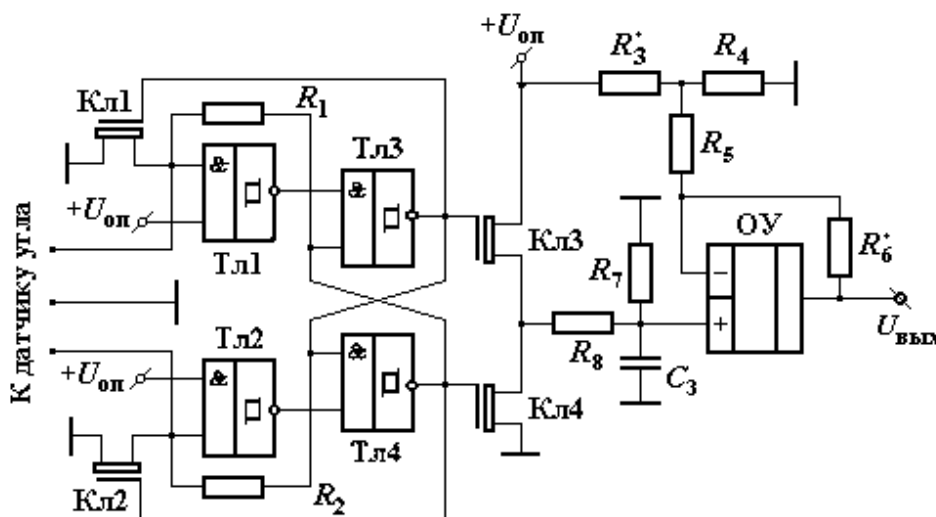


Рис. 9. Электрическая схема преобразователя перемещений

Далее в цепи контура регулирования включено корректирующее устройство (рис. 10), представляющее собой ПИД-регулятор с параметрами, определяемыми зависимостями (2)–(5). С выхода ПИД-регулятора приборный сигнал поступает по команде микроконтроллера на линейризатор электростатического преобразователя и одновременно на вход приема информации микроконтроллера для преобразования в цифровой сигнал и далее в аналоговый.

Аналоговый сигнал идет на вход одного из компараторов микроконтроллера для сравнения с приборным сигналом. При равенстве этих сигналов цифровой код переписывается на выход микроакселерометра. Непосредственно цифровой код микроакселерометра в контуре регулирования не используется.

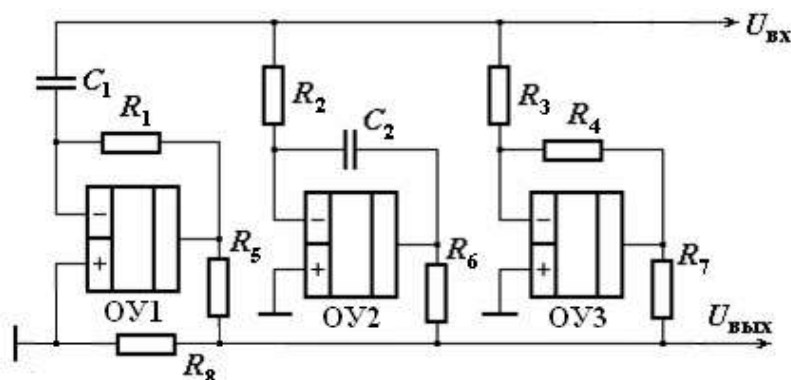


Рис. 10. Электрическая схема корректирующего устройства

Измеряемая величина при наличии ПИД-регулятора обрабатывается пропорциональной составляющей обратной связи, а ошибка стабилизируется на значении, близком к нулю. Выходной сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая регулятора. Дифференциальная составляющая противодействует отклонениям регулируемой величины пропорционально скорости их нарастания. Эти отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему. Чем быстрее регулируемая величина отклоняется от измеряемого значения, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей.

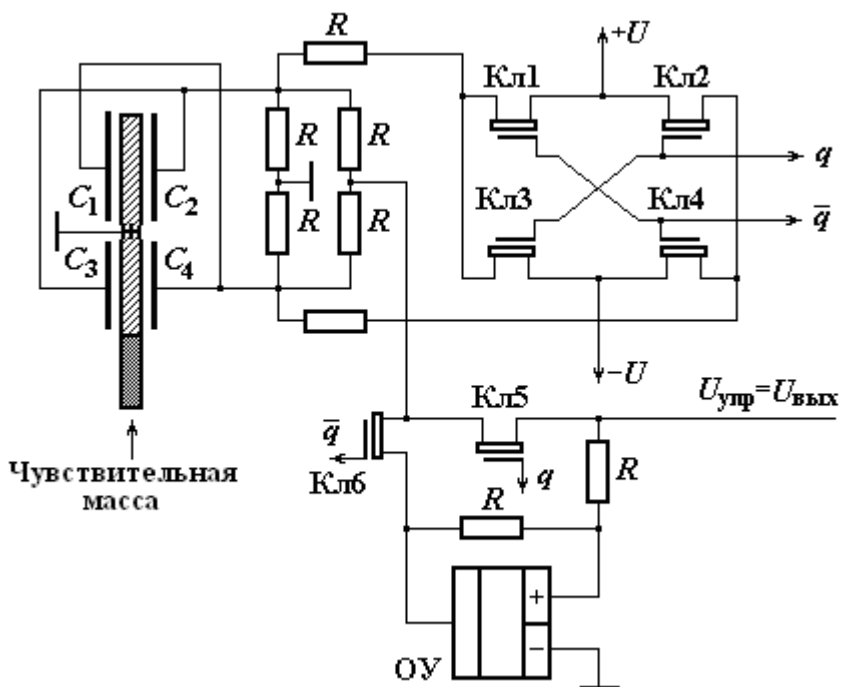


Рис. 11. Электрическая схема линейризатора электростатического преобразователя

Пользуясь структурной схемой (рис.9) в замкнутом контуре, найдем передаточную функцию осевого микросистемного акселерометра:

$$W_{\text{акс}}(s) = \frac{K(\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0)}{\alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}, \tag{10}$$

где  $K = K_{\text{чз}} K_{\text{шп}} K_{\text{yc}}$ ,  $\alpha_4 = JT\tau$ ;  $\alpha_3 = K_{\text{ду}} T\tau + JT$ ;  $\alpha_2 = GT\tau + K_{\text{ду}} T + K_{\text{ос}} K_{\text{шп}} K_{\text{yc}} T^2$ ;

$\alpha_1 = (G_y + K_{\text{ос}} K_{\text{шп}} K_{\text{yc}})T$ ;  $\alpha_0 = K_{\text{ос}} K_{\text{шп}} K_{\text{yc}}$  – коэффициенты знаменателя передаточной функции;

$\beta_2 = T^2$ ;  $\beta_1 = T$ ,  $\beta_0 = 1$  – коэффициенты числителя.

Одной из важных характеристик микроакселерометра является полоса пропускания, которую задают по собственной частоте  $\omega_c$ . При интегральном исполнении массы элементов являются малыми, а жесткости узлов – большими. Соответственно, имеют место высокие собственные частоты чувствительных элементов, что для микроакселерометров крайне нежелательно. Высокочастотные микроакселерометры ловят шумы от работы двигательных установок, вибрации корпуса и др. Микроакселерометры должны измерять низкочастотные ускорения, например, при маневрах летательных аппаратов (10-100) Гц. Одним из методов решения вопроса обеспечения требуемой полосы пропускания является введение отрицательной “электрической жесткости”.

Необходимую полосу пропускания маятникового микроакселерометра можно определить по допустимому воздействию поперечных сил на отклоненный от нейтрального положения маятник. Отклонение обычно выбирают в пределах 2-3 угловых секунд.

Для компенсационных микроакселерометров полосу пропускания можно определить по жесткости “электрической пружины” в замкнутом контуре, которая представляет произведение коэффициентов передачи всех звеньев, охватываемых контурами прямой и обратной связей:

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{ос}} K_{\text{мп}} K_{\text{ус}}}{J}}, \quad (11)$$

где  $K_{\text{ос}} K_{\text{мп}} K_{\text{ус}}$  - жесткость “электрической пружины” в замкнутом контуре.

Алгоритм и компьютерная программа расчета постоянных времени ПИД-регулятора посредством оптимизации переходного процесса приближением к дираковской ступеньке приведены далее.

```
function [Wopt,K,CKO]=CKO(x,y,z);
%передаточная функция чувствительного
элемента
clc
%Программа с меткой
%Accelerometr with feedback:
%density of silicon
rho=2328;
gamma=0.27
%The module of elasticity of silicon (100)
E100=1.295e11;
%acceleration of gravitation
g=9.80665;
%length of a pendulum
am1=3.5e-3;
am2=3.45e-3;
%weight of a pendulum
%the moment of inertia of a pendulum
J=rho*bm*cm*(am2*((am2^2)/3+(cm^2)/12)+
+am1*((am1^2)/3+(cm^2)/12))
%number of springs
k=2;
%angular rigidity
Gkr=k*E100*bp*cp^3/(3*32*(1+gamma)*ap)
%Gkr=k*(5*(sqrt(3))*E100*cp^4)/(32*(1+gam
ma)*ap)
h=10e-6;
%axial factor of attenuation
Kd=mu*(am2*bm)^2/h^3;
%angular factor of attenuation
Kdy=Kd*Xc^2;
%factor of transfer of a sensitive element
Kche=m*Xc;
omega=10;
%basic voltage
Uop=5;
eps0=8.85418782e-12;
epsazota=1;
F=(am1+am2)*bm;
%Factor of transfer of a link of a feedback
% width of a pendulum
bm=3.5e-3;
%thickness of a pendulum
cm=1e-3;
m=rho*(am1-am2)*bm*cm;
%length elastic springs
ap=15e-4;
bp=3e-4;
%the maximal and minimal thickness of an elas-
tic spring
cp=0.79e-4;
%length of a shoulder of a pendulum
Xc=am2+(am1-am2)/2;
%viscosity of nitrogen
mu=17.9e-6;
mu=0;
%Not closed transfer function
%R=W/(1-W)
K=dcgain(W)
ksi=a1/(2*sqrt(a2*a0))
% damp(W/K)
Q=N/(Gkr-Gel)
%figure(1)
%bode(R/K),grid
%figure(2)
%step(W/K),grid
%figure(3)
%nyquist(R/K),grid
jmax=Koc*Uop/(m*Xc)
Umax=(Kche/Koc)*jmax
%вычисление CKO
dt=.00001;
t=[0:dt:2];
polosa=sqrt((Gkr-Gel)/J)
Wopt=minreal(W);
u=1-dirac(t+1e-15);
h=lsim(Wopt/K,u,t);
CKO=dt*sum((h-u).^2)

clear
```

```

Koc=2*eps0*epsazota*Uop*F*Xc/(h^2);
Uo=sqrt((Gkr-
omega^2*J)*h^3/(4*eps0*epsazota*F*Xc^2))
Gel=4*eps0*epsazota*Uo^2*F*Xc^2/(h^3)
Kyc=1
%Factor of transfer of the gauge of a corner
Kpp=Uop*Xc/h;
M=Kche*Kpp*Kyc
N=Koc*Kpp*Kyc
T=(J/(Gkr-Gel))^(1/2)
tau=0.00001
x
y
z
b0=x
b1=y
b2=z
a0=N*x
a1=(Gkr-Gel)*y+N*y
a2=Kdy*y+(Gkr-Gel)*tau*y+N*z
a3=J*T+Kdy*tau*y
a4=J*tau*y
%The closed transfer function
W=tf(M*[b2 b1 b0],[a4 a3 a2 a1 a0])

k=1;
rand('seed',0);
xn=0.8; yn=0.1; zn=0.01;
CKOmax=1e15;
while k<200
x0=xn*(1+rand(1,1));
y0=yn*(1+rand(1,1));
z0=zn*(1+rand(1,1));
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x0,y0,z0);
if CKO<CKOmax
CKOmax=CKO;
x=x0;
y=y0;
z=z0;
end
k=k+1;
end
clc
x
y
z
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x,y,z)
step(Wopt/K),grid
    
```

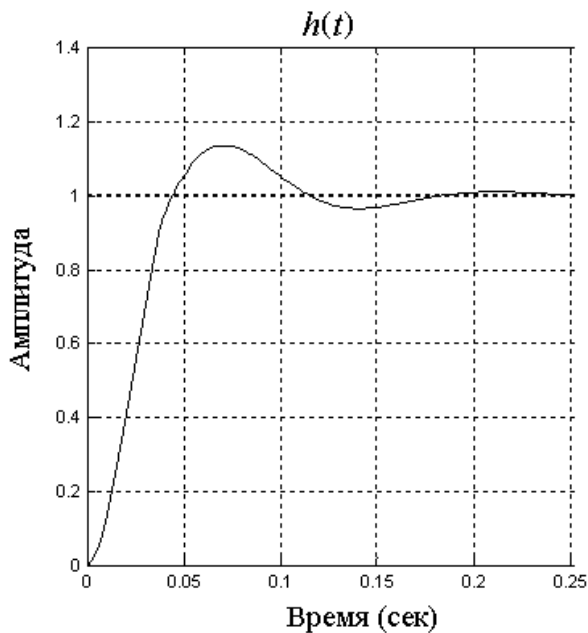


Рис. 12. Газодинамическое демпфирование

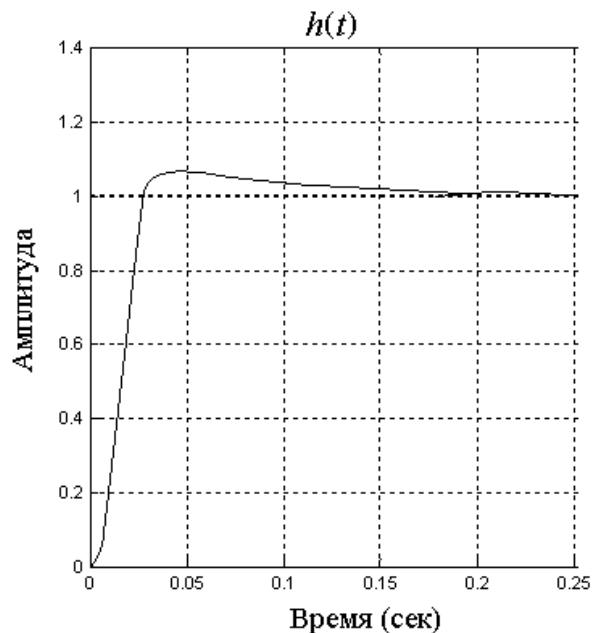


Рис. 13. Демпфирование в электрическом контуре

**Выводы**

1. Применение ПИД-регулятора в прямой цепи контура регулирования обеспечивает оптимальное демпфирование маятнику микроакселерометра.
2. Посредством применения знакопеременного линеаризатора в электростатическом преобразователе момента эффект электромассопереноса между подвижным и неподвижными электродами чувствительного элемента полностью устраняется.

### Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Конструирование интегральных датчиков / В.Д. Вавилов, В.И. Поздяев. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 68 с.
2. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 500 с.
3. Патент России № 2231795, М. кл. G01B15/08, от 10 декабря 2002 г.
4. **Вавилов, В.Д.** Теоретические основы микросистемных акселерометров и гироскопов / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2011. – 204 с.

*Дата поступления  
в редакцию 18.04.2012*

**V.D. Vavilov**

### **OPTIMIZATION FEATURES MIKROAKSELEROMETRS WITH DISPLACED AN AXIS SWING OF THE PENDULUM**

Arzamasskiy polytechnic institute

It Is Designed integral compensation accelerometer with electrostatic negative flesh feedback. Mikromehaniчески detector element is executed from monocrystalline silicon. In sidebar of the regulation accelerometer as correcting device aplying PID-regulator and microcontroller.

Accounting correlations are received for microelectromechanical and electric parts, as well as for factor PID-regulator. Accelerometer is calculated on range 50-100 g. Reaching steady-state accuracy forms  $10^{-3}$  from range of the measurements, but dynamic passband - an order 100 Hz. The broughted program to optimization parameter accelerometer on connecting process.

For comparison on graph are brought results of modeling of the connecting processes gasdynamic sedation and in electric sidebar. Dempfirovanie in electric sidebar the most flexible.

*Key words:* microelectromechanical of the system (MEMS), electrostatic converter moment, negative "electric acerbity hang up", microcontroller, program to optimization of the features accelerometer.

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.А. Гаврилов, А.Н. Шипунов

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ

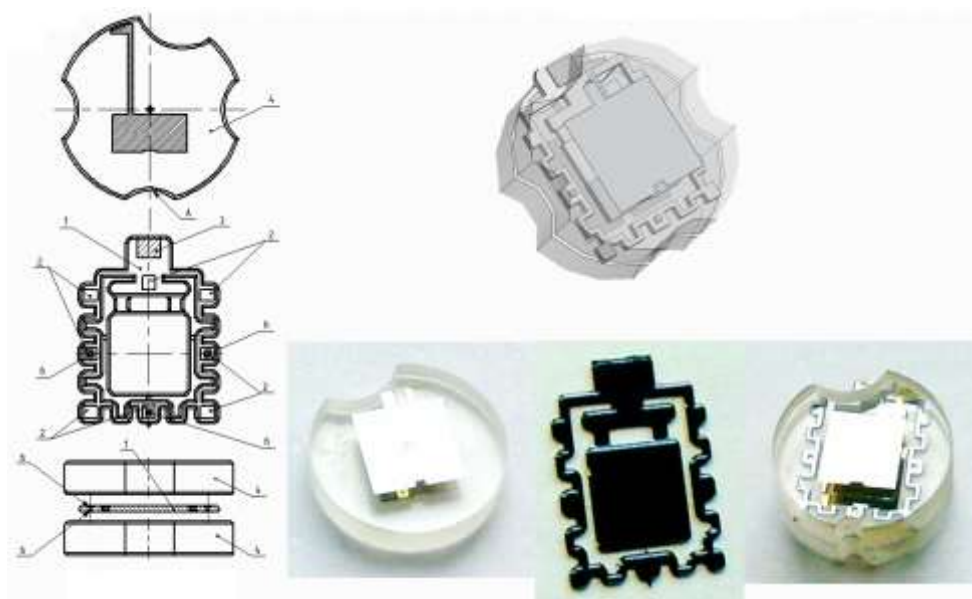
ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА»

Рассмотрен способ повышения точности первичного преобразователя акселерометра, на базе конструкции чувствительного элемента, состоящей из классического кремниевого маятника расположенного между стеклянными обкладками. Способ заключается в модернизации технологического процесса диффузионной сварки. Рассматриваются конструкции приспособлений, с помощью которых осуществляется диффузионная сварка. Описаны проблемы, возникающие при соединении монокристаллического кремния со стеклом, и способы их решения. Приведен расчет прочности сварного соединения. Проведено теоретическое обоснование уменьшения погрешности первичного преобразователя акселерометра. Описан эксперимент подтверждающий теоретическую гипотезу. В результате применения предложенного способа снизились напряжения, возникающие при соединении пакета стекло - монокристаллический кремний – стекло, что привело к увеличению точности статических характеристик акселерометра.

*Ключевые слова:* чувствительный элемент, диффузионная сварка, напряжение, термостатическая выдержка, погрешность.

На современном этапе развития интегральных датчиков актуальной является проблема повышения точности первичных преобразователей за счет модернизации технологических процессов их изготовления.

Первичные преобразователи интегральных акселерометров изготовлены из монокристаллического кремния и боросиликатного стекла. Основным способом соединения деталей первичного преобразователя является диффузионная сварка. Принцип диффузионной сварки монокристаллического кремния и боросиликатного стекла был открыт в 70-е годы XX в., и на сегодняшний момент актуальным является вопрос получения качественного соединения при наименьшем нагреве элементов конструкции первичного преобразователя.



**Рис. 1. Первичный преобразователь:**

1 - элемент кристаллический; 2 - площадки под сварку; 3 – контактные площадки;  
4 - стеклянная обкладка; 5 – технологические выемки



На рис. 1 показан первичный преобразователь акселерометров прямого измерения серии АТ. Первичный преобразователь состоит из двух обкладок, на которых напылены неподвижные электроды датчика перемещения и кремниевого кристаллического элемента. Обкладки выполнены из боросиликатного стекла ЛК 105, элемент кристаллический - из монокристаллического кремния КЭС 0,5. Основные требования, которые предъявляются к свариваемым деталям, это чистота и высокая плоскостность (до  $\pm 5$  мкм) поверхностей.

Чистота поверхностей перед технологическим процессом сварки достигается за счет предварительной механической и ультразвуковой очистки обкладок и очистки элементов кристаллических в перекисно-аммиачном растворе.

Высокая плоскостность поверхности свариваемых площадок на кристаллическом элементе достигается за счет полировки поверхностей. На первоначальной стадии заготовки из стекла имеют неплоскостность  $\pm 4$  мкм, но после механической обработки, сверления отверстий, проточки пазов, разрезки заготовки, возникают пластические деформации, которые приводят к появлению дополнительной неплоскостности.

Детали соединяются в неразъемный чувствительный элемент электродиффузионной сваркой. Для устранения неплоскостности между свариваемыми поверхностями используются нормированный механический прижим.

Приспособление для сварки чувствительных элементов (рис. 2) состоит из двух частей: верхней и нижней. В свою очередь верхняя часть состоит из двух деталей, не считая установочного груза: это прижим (поз. 1) и специальный винт (поз. 3). Прижим устанавливается по внешнему диаметру верхней втулки (поз. 2) таким образом, чтобы установленные чувствительные элементы в основании (поз. 4) не разъезжались и были плотно прижаты к стенкам металлического основания, за счет которого происходит нагрев их до необходимой температуры. Винты, установленные в прижиме по резьбе М3 позволяют регулировать высоту, плоскостность относительно других чувствительных элементов и силу прижатия отдельных элементов. Установочный груз для прижатия помещается в верхнюю часть прижима.

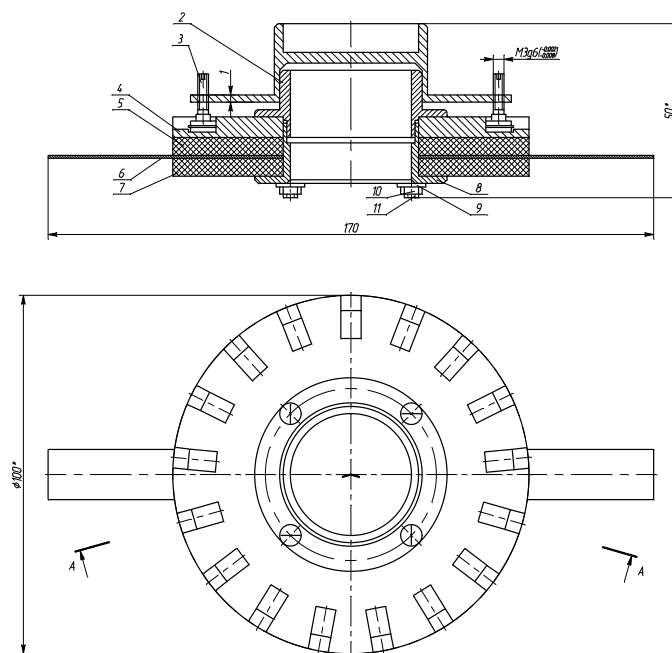


Рис. 2. Приспособление для сварки чувствительных элементов

В нижней части приспособления устанавливаются два керамических кольца (поз. 5, 7), они выполняют роль изоляторов нагревателя, который находится между ними (поз. 6), а также теплораспределителей. Сверху устанавливается металлическое основание (поз. 4), с ячейками для сборки чувствительных элементов и верхняя втулка (поз. 2). Нижняя часть

приспособления собирается при помощи винтов (поз. 11) и гаек (поз. 10), которые скрепляют по имеющимся отверстиям керамические кольца, основание, верхнюю и нижнюю втулку (поз. 8). Данное приспособление помещают в электрическую печь и выдерживают при температуре 470 °С несколько часов. При этом упругие деформации, возникшие в стекле при устранении первоначальной неплоскости механическим прижимом, практически полностью переходят в пластическое. Это происходит за счет резкого падения модуля Юнга первого рода стекла на повышенной температуре. После изотермической выдержки на пакет подается постоянное напряжение 220 В. После окончания технологического процесса сварки пакет остывает до температуры окружающей среды при закрытой печи. При охлаждении пакета с температуры 470 до 25 °С за счет различных коэффициентов линейного расширения стекла и монокремния

$$\Delta l = l_0 [1 + (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T],$$

где  $l_0$  – длина сварной площадки;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициент линейного расширения стекла и монокристаллического кремния;  $\Delta T$  – разность температур.

Боросиликатное стекло, в отличие от монокристаллического кремния, является аморфным материалом и накапливает усталость. Под воздействием на чувствительный элемент термоциклов деформации в стекле носят «блуждающий» характер, т.е. соотношение пластической и упругой деформации постоянно меняется. Такой характер деформации обуславливает нестабильность и неповторяемость нулевого сигнала датчика. Данная погрешность является случайной и не может быть компенсирована алгоритмическим путем.

Для снижения данной погрешности проведем ряд экспериментов, направленных на исследование технологического процесса сварки. Основная задача эксперимента – определение минимальной температуры, при которой происходит диффузионная сварка кремния со стеклом. Для эксперимента использовалась двухместное приспособление со статическим нормированным прижимом (рис. 3)

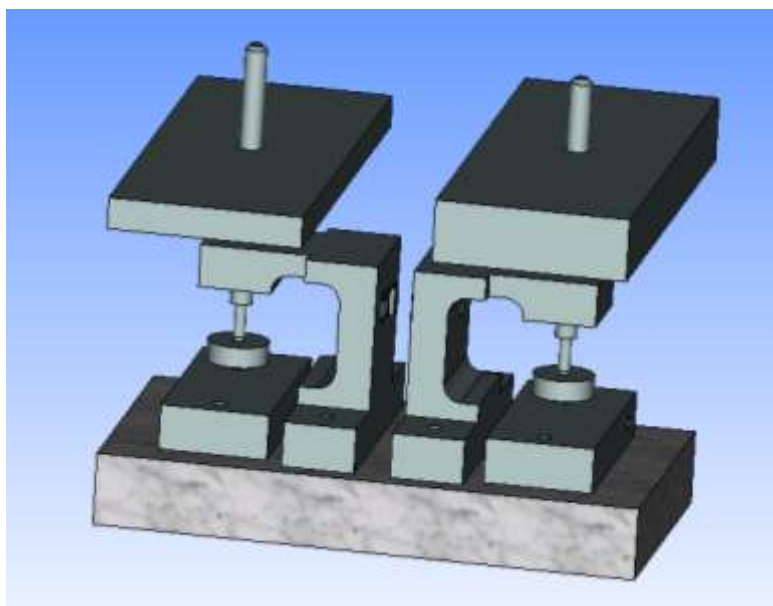


Рис. 3. Приспособление для сварки

Чувствительные элементы устанавливались в приспособление, помещались в печь, на обкладку подавалось постоянное напряжение. Процесс сварки происходит до прекращения тока через свариваемый пакет.

Экспериментально определено, что минимально необходимый ток для сварки –

20-25 мкА. При температуре 470 °С через свариваемый пакет протекает ток 50 мА. Следовательно, температуру сварки можно понижать.

Экспериментально установлено, что при температуре 380 °С и напряжении 250 В ток через пакет составляет 20-23 мкА. Сваренные при данном режиме чувствительные элементы проверены на механический разрыв при помощи специального приспособления (рис. 4).

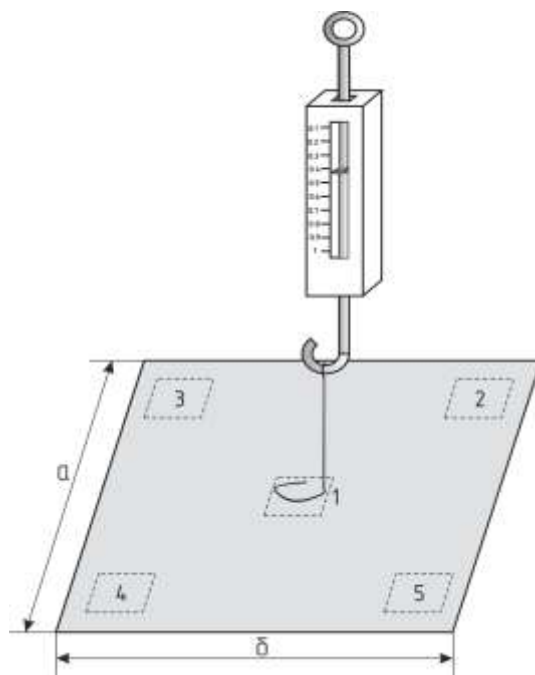


Рис. 4. Приспособление для проверки сварки

Расчет прочности сварного соединения определяется по формуле

$$\sigma_{АП} = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где  $P$  – усилие, фиксируемое по грамометру, г;  $S$  – площадь припайки проволоки, мм<sup>2</sup>.

Контроль качества свариваемых поверхностей производят под микроскопом типа МБС-9 при 16-кратном увеличении, поверхность отрыва на стекле должна по площади совпадать с площадью сварного пятна на кристаллическом элементе. После повтора описанной операции пять раз, производят вычисление по формуле (1). При  $\sigma_{АП} \leq 490$  г/мм<sup>2</sup> следует из партии чувствительных элементов выбрать еще один и повторить эксперимент. Если результат повторно неудовлетворительный, партия чувствительных элементов бракуется.

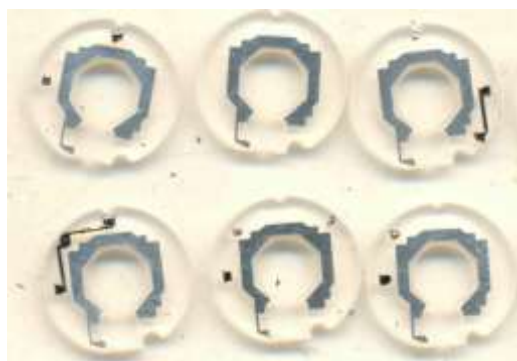


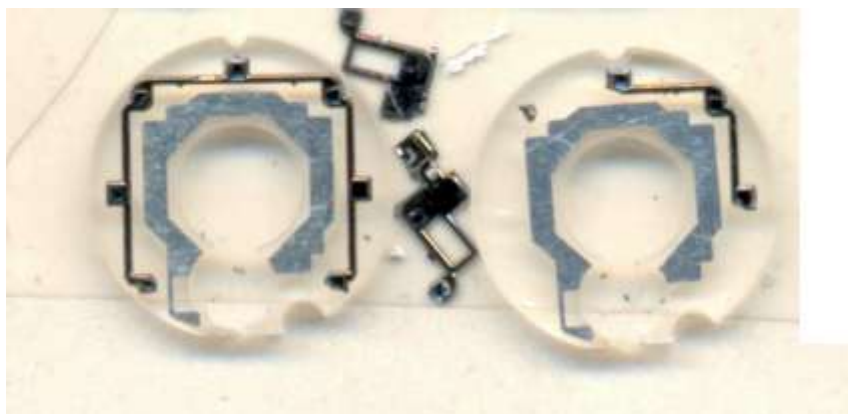
Рис. 5. Обкладки, сваренные при температуре 380 °С

На рис. 5 представлены обкладки чувствительных элементов. Ряд технологических

площадок полностью не сварен, остальные площадки сварены, причем характер сварного соединения не отличается от сварки при температуре 470 °С. Следовательно, несварка площадок обусловлена отсутствием механического контакта. Отсутствие контакта связано с неплоскостью площадок.

Неплоскость можно устранить двумя способами. Первый – это увеличение силы статического прижима. Это приведет к увеличению упругих деформаций в стекле и увеличению «блуждающих» напряжений. Данный способ позволяет избавиться от неплоскости, но не позволит повысить точность первичных преобразователей акселерометра.

Второй способ заключается в предварительном нагреве свариваемого пакета до температуры, ниже температуры плавления алюминия. Выдержки при этой температуре несколько часов, затем охлаждении до температуры 380 °С и проведении сварки. Результаты сварки представлены на рис. 6.



**Рис. 6. Обкладки, сваренные при температуре 380 °С с предварительным нагревом**

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что количество несваренных «пятяков» резко уменьшилось. Это означает, что теоретическое предположение верно.

Задача снижения напряжений при соединении пакета стекло - монокристаллический кремний - стекло решается путем нагрева сжатого с определенным усилием пакета до требуемой температуры и подачи постоянного напряжения определенной полярности. Перед подачей напряжения пакет нагревается до температуры на 35–45% выше требуемой, выдерживается 2–3 ч, затем охлаждается до температуры на 5–15% ниже рабочей, выдерживается 1 ч, после чего на него подается напряжение.

Существенным отличием предложенного способа от известного являются нагрев и выдержка при повышенной температуре пакета кремний-стекло-кремний, в результате чего под действием нормированного усилия при соприкосновении свариваемых поверхностей в стекле возникают в основном пластические деформации, так как модуль Юнга стекла уменьшается с повышением температуры, сварка пакета при температуре на 5–15 % ниже требуемой, в результате чего снижается температурный интервал остывания, что приводит к снижению напряжений, связанных с различными коэффициентами линейного расширения материалов пакета.

Примерами реализации описанного способа являются соединение пакета стекло «пирекс 7059» - монокристаллический кремний - стекло «пирекс 7059» с требуемой температурой сварки 400 °С путем предварительного нагрева пакета до температуры 490 °С, выдержке три часа и охлаждении до температуры 370 °С, с последующей подачей напряжения на пакет, соединение пакета стекло «С37-2» - монокристаллический кремний - стекло «С37-2» с требуемой температурой сварки 450 °С путем предварительного нагрева пакета до температуры

550 °С, выдержке 3 ч и охлаждении до температуры 400 °С, с последующей подачей напряжения на пакет.

В результате применения предложенного способа снизились напряжения, возникающие при соединении пакета стекло - монокристаллический кремний - стекло.

---

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н.Новгород, 2003. – 503 с.

*Дата поступления  
в редакцию 18.04.2012*

**A.A. Gavrilov, A.N. Shipunov**

## **MODERNIZATION OF DIFFUSION BONDING PROCESS**

JSC ARPE «TEMP-AVIA», Arzamas

Today, an improvement of accelerometer accuracy is a challenging problem.

In this paper, method for improvement of accuracy in accelerometer sensor, containing typical silicon pendulum, located between glass substrates, is represented. The method includes modernization of diffusion bonding process. Attachments for diffusion process to be performed are given. The problems, which occur during single-crystalline silicon-to-glass bonding process, and their solutions, are considered. Durability of bonding connection is evaluated. Reduction of accelerometer sensor accuracy is theoretically justified. Theoretical hypothesis is proven by experiment. Finally, application of the proposed method reduced stresses, which occur during bonding process of a glass-single-crystalline silicon-glass stack, and resulted in improvement of accelerometer static performance.

*Key words:* sensor, diffusion bonding, stress, thermostatic soaking, inaccuracy.

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.А. Гаврилов, А.Н. Шипунов

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КРЕМНИЯ**

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА»

С целью повышения точности размерной обработки кремния в статье усовершенствован стандартный технологический процесс изготовления глубокопрофильных кремниевых структур. Описан групповой метод получения элементов кристаллических, являющихся основной частью чувствительного элемента в МЭМС датчиках. В качестве материала элементов кристаллических используется монокристаллический кремний. Приведены способы получения защитных пленок полупроводникового кремния, а также способы получения рельефных кремниевых структур. Описан стандартный процесс фотолитографии и его недостатки, а также процесс с использованием контрастного слоя, с помощью которого на этапе экспонирования повышается точность совмещения рисунка фотошаблона с профилем кремниевой пластины, в результате чего увеличивается не только процент выхода годных чувствительных элементов, а также стабильность точностных характеристик МЭМС датчиков.

*Ключевые слова:* кремний, экспонирование, контрастный слой, защитный слой, чувствительный элемент.

В настоящее время в России и за рубежом создан широкий спектр датчиков физических величин, основанных на различных принципах.

По мере того, как растет применение электроники, все большее значение приобретают датчики, которые играют роль посредников между окружающим аналоговым миром и цифровыми системами обработки информации о признаках этого мира. Поэтому неудивительно, что изготовители датчиков, стараясь расширить возможности своих устройств, обращаются к технологии интегральных схем, т.е. к созданию полупроводниковых (ПП) (микроэлектронных) датчиков, которые со встроенными функциональными элементами становятся все более похожими на интегральные микросхемы.

Датчики являются элементами технических систем, предназначенных для измерения, сигнализации, регулирования, управления устройствами или процессами. Датчики преобразуют контролируемую величину (давление, температура, расход, концентрация, частота, скорость, перемещение, напряжение, электрический ток и т. п.) в сигнал (электрический, оптический, пневматический), удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации информации о состоянии объекта измерений.

Исторически и логически датчики связаны с техникой измерений и измерительными приборами, например, термометры, расходомеры, барометры, прибор «авиагоризонт» и т.д. Обобщающий термин «датчик» укрепился в связи с развитием автоматических систем управления как элемент обобщенной логической концепции датчик - устройство управления - исполнительное устройство - объект управления. Специальный случай представляет использование датчиков в автоматических системах регистрации параметров, например в системах научных исследований.

Чувствительный элемент, преобразующий параметры среды в пригодный для технического использования сигнал, обычно электрический, хотя возможно и иной по природе, например пневматический сигнал; часть измерительного прибора или первичного измерительного преобразователя, с помощью которой воздействующая на элемент физическая величина преобразуется в некоторую другую величину, удобную для последующего использования в измерительных или управляющих устройствах.

В настоящее время при изготовлении чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков первичной информации (ДПИ) с целью увеличения их точности, надежности, уменьшения мас-

согабаритных параметров, снижения трудоёмкости используются технологии глубокого микропрофилирования полупроводниковых пластин. Чувствительные элементы ДПИ изготавливаются по групповой технологии, которая предполагает изготовление на одной полупроводниковой пластине нескольких десятков однотипных кристаллов и одновременную обработку партии таких пластин. После завершения цикла изготовления пластины разделяются на кристаллы (рис. 1), которые далее используются при сборке чувствительных элементов.

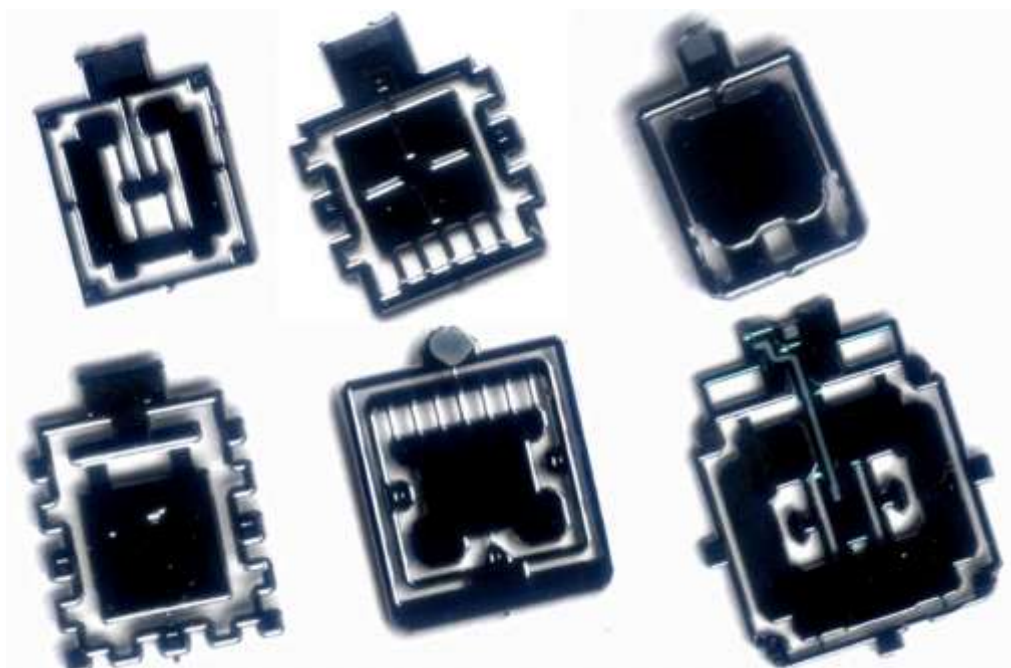


Рис. 1. Чувствительные элементы

В последнее время широкое распространение в качестве материала подложки получил монокристаллический кремний. Кремний обладает хорошими механическими свойствами: высоким значением модуля упругости, значительной жесткости (больше, чем, например, у стали), малой плотностью ( $2,3 \text{ г/см}^3$ ), низким ТКЛР ( $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ), высокой коррозионной стойкостью, высокой теплопроводностью. Приборы, построенные на монокристаллическом кремнии, имеют высокую временную и температурную стабильность, отсутствие гистерезиса выходных характеристик.

Для выполнения размерной обработки на микрообъемах и микроплощадах в технологии применяется травление. Чтобы обеспечить избирательное травление, предварительно получают защитную пленку, а в ней вскрывают окна. Избирательное вскрытие окон в защитной пленке выполняют с помощью литографии.

В естественных условиях поверхность полупроводникового кремния покрыта слоем оксида, толщина которого составляет десятки мономолекулярных слоёв. Защитные свойства таких слоёв невелики, поэтому для их улучшения применяют искусственное окисление поверхности в окисляющих средах.

В качестве защитных покрытий используют слои диоксида  $\text{SiO}_2$  и нитрата  $\text{Si}_3\text{N}_4$  кремния. Эти слои должны соответствовать всем требованиям по качеству поверхности:

- иметь сплошную однородную структуру;
- быть свободными от примесей;
- иметь равномерную толщину по всей поверхности пластины;
- быть устойчивым к травителям кремния.

Существует несколько методов окисления полупроводникового кремния.

Высокотемпературное окисление в сухом кислороде – наиболее распространенный

способ окисления кремния, так как обеспечивает получение плёнок  $SiO_2$  с высокой маскирующей способностью. Температура в процессе окисления при атмосферном давлении обычно составляет 1050 °С. Время получения плёнок толщиной 0,5 мкм составляет примерно 30 ч. Расход кислорода – 40–80 л/ч. Окисление кремния происходит в однозонной диффузионной печи, имеющей три или шесть реакционных камер.

Окисление кремния в водяном паре: в реактор подаётся водяной пар, который под воздействием высокой температуры частично разлагается на кислород или водород. Качество оксидных плёнок ниже, чем при сухом способе окисления. Плёнки получаются более пористыми.

Окисление кремния во влажном кислороде – этот способ обеспечивает высокую скорость роста плёнки оксида.

Окисление в водяном паре при повышенном давлении – этот способ обеспечивает более высокую скорость роста оксида и повышение его прочности. Давление составляет до 2 МПа.

После завершения процесса получения защитных плёнок пластины контролируют пучком осветителя и под микроскопом на наличие проколов, а также качество поверхности (отсутствие матовости, светящихся точек, разводов и т. п.). Толщину плёнки измеряют при помощи цветового, интерференционного и эллипсометрического методов.

Для воспроизведения размеров и форм структур кремниевых приборов используется метод фотолитографии, обеспечивающий высокую точность изготовления.

Это наиболее широко используемый способ получения рельефного покрытия с изображением элементов ИИП. Неотъемлемой частью фотолитографии являются фотошаблоны. Фотошаблоны – стеклянные пластины или полимерные пленки, со сформированным на их поверхности рисунком элементов ИИП из материала не пропускающего активного излучения. Фотолитография состоит из ряда операций, которые выполняются в определённой последовательности.

Нанесение слоя резиста на пластину:

- обработка поверхности пластин с оксидной пленкой;
- нанесение фоторезиста.

Фоторезист – это полимерный материал, который под действием света изменяет прочность связи между молекулами. Для интегральной технологии используют жидкие фоторезисты. Фоторезист наносится методом полива с последующим центрифугированием, которое обеспечивает равномерность, сплошное распределение и минимальную толщину плёнки фоторезиста. Регулировка толщины слоя фоторезиста достигается подбором угловой скорости вращения центрифуги, которая обычно задаётся в пределах 2000–1000 об/мин. Для изменения толщины слоя фоторезиста можно варьировать его вязкость.

Для совмещения изображения широко используется метод визуального контактного и бесконтактного совмещения. В контактном методе, вследствие тесного контакта между шаблоном, резистом и кремниевой пластиной, легко воспроизводятся элементы размером до 1 мкм. К недостатку этого метода следует отнести наличие загрязнений, например пылинок, на поверхности кремниевой пластины. Эти загрязнения приводят к повреждению поверхности шаблона при соприкосновении его с пластиной. Следует отметить, что высокий уровень выхода годных кристаллов обеспечивается при плотности дефектов не более одного на  $1\text{ см}^2$  для каждого литографического процесса.

В методе бесконтактной печати ширина зазора между шаблоном и пластиной находится в пределах 10–25 мкм. Перенос изображения при этом происходит в дифракционной области Френеля. Разрешение в этой области пропорционально  $(\lambda g)^{1/2}$ , где  $\lambda$  – длина падающего света;  $g$  – ширина зазора между шаблоном и пластиной (составляет 2–4 мкм). Необходимо отметить, что указанный зазор между шаблоном и пластиной полностью не исключает возможность повреждения поверхности шаблона.



На основе перечисленных операций существует ряд стандартных технологических процессов изготовления глубокопрофильных кремниевых структур (рис. 2).

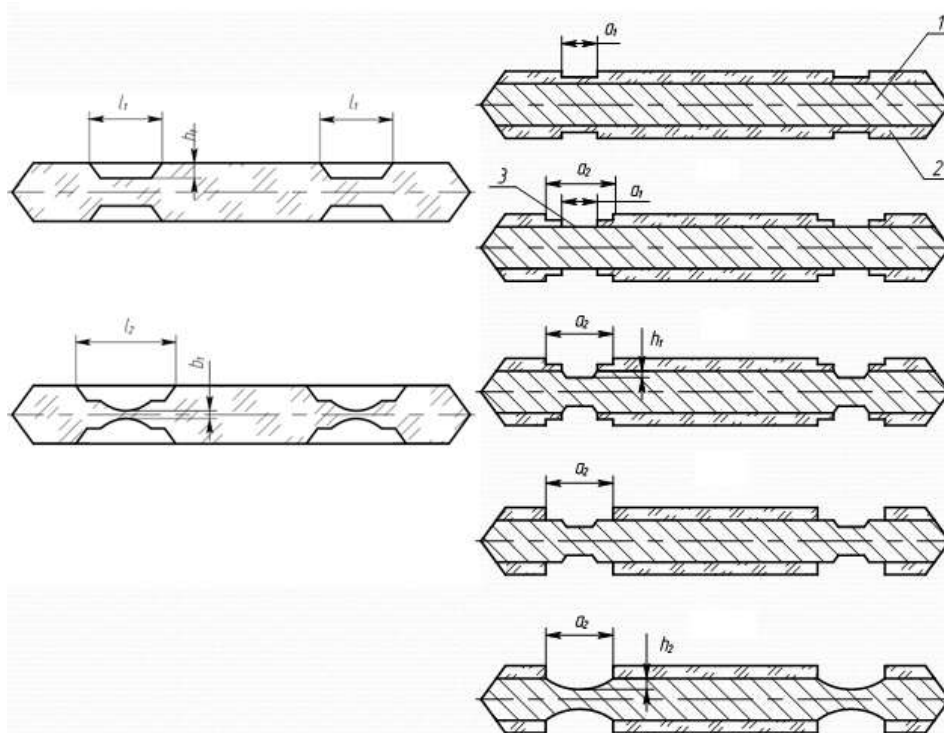


Рис. 2. Глубокопрофильная кремниевая структура

Известен способ изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур, заключающийся в том, что на защитный слой кремниевой пластины наносят фоторезист, при помощи фотолитографии формируют контур в фоторезисте, удаляют защитный слой в контуре фоторезиста до появления кремния, вытравливают кремний до нужной глубины, после чего производят повторные операции до формирования в кремнии заданного профиля.

Недостатками такого способа являются:

- неравномерность нанесения пленки фоторезиста на полученную рельефную поверхность;
- разрывы пленки фоторезиста на острых краях травленной поверхности;
- большая толщина в протравленных канавках.

Это приводит к большой трудоемкости проведения операции фотолитографии и большому количеству брака.

Существует способ изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур, при котором формируют структуру заданного профиля в защитном слое при помощи последовательных операций фотолитографии и травления, создают заданный профиль в кремнии путем чередования операций травления защитного слоя и кремния.

Недостатком такого способа является сложность и неточность совмещения фотошаблонов при второй и последующих операциях фотолитографии относительно контура, сформированного после первой фотолитографии. Трудности совмещения фотошаблонов возникает из-за недостаточной видимости контура через нанесенный фоторезист.

Данная проблема решается за счет того, что в способе изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур, заключающемся в создании на кремниевой пластине защитного слоя, формировании в нем последовательными операциями фотолитографии и травления структуры заданного профиля до появления кремния в области максимальной глубины структуры и последующем чередовании травления кремния и оставшегося защитного слоя до получения в кремнии заданного профиля, после создания защитного слоя и перед первой

операцией фотолитографии на поверхности защитного слоя создают контрастный слой из материала, отличающегося от материала защитного слоя, а после каждой операции фотолитографии перед травлением защитного слоя стравливают контрастный слой.

Существенным отличием предложенного способа является создание контрастного слоя из материала, отличающегося от материала защитного слоя, в результате чего сформировавшийся контур в защитном слое после первой фотолитографии отчетливо виден на фоне контрастного слоя, что повышает точность создания глубокопрофилированных кремниевых структур путем уменьшения погрешности совмещения фотошаблонов.

На рис. 3 показана последовательность операций, применяемых для реализации предложенного способа. На кремниевой пластине 1 создают защитный слой 2, например, из пленки окисла кремния определенной толщиной (например, 2 мкм).

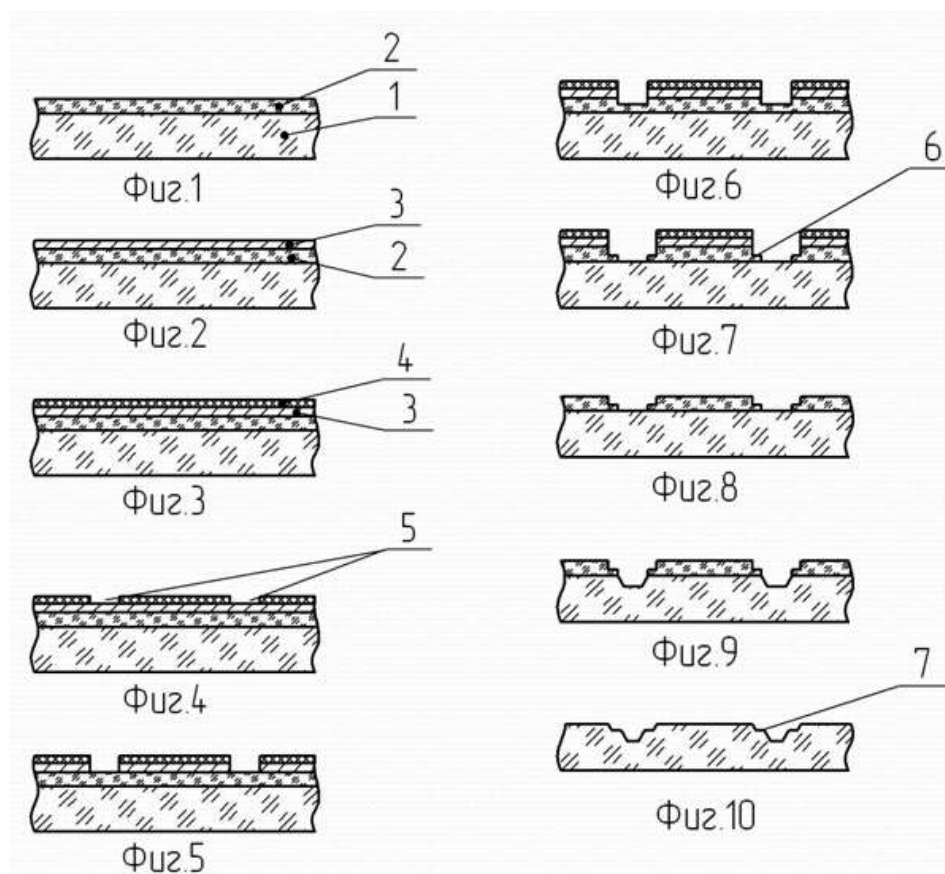


Рис 3. Последовательность операций при фотолитографии

На защитный слой 2 наносят контрастный слой 3, например, из пленки алюминия (см. фигуру 2).

Проводят операцию фотолитографии, заключающуюся в нанесении фоторезиста 4 на контрастный слой 3 (см. фигуру 3), экспонировании через фотошаблон, проявлении и термообработки фоторезиста 4.

На фигуре 4 изображены сформированные окна 5 в фоторезисте 4 после его проявления.

В местах сформированных окон 5 стравливают контрастный слой 3 до появления защитного слоя 2 (см. фигуру 5).

Затем вытравливают защитный слой 2 до нужной глубины (см. фигуру 6) и удаляют оставшуюся пленку фоторезиста 4 со всей пластины 1.

Последовательными операциями фотолитографии и травления формируют структуру 6 заданного профиля в защитном слое 2 кремниевой пластины 1 (см. фигуру 7) до появления

кремния в области максимальной глубины структуры 6 заданного профиля, после чего смывают фоторезист 4 и удаляют контрастный слой 3 (см. фигуру 8).

В травителях, не реагирующих или плохо реагирующих с защитным слоем 2, вытравливают кремний до нужной глубины (см. фигуру 9).

Затем, чередуя травление защитного слоя 2 до вскрытия следующего контура и травление кремния, получают заданный профиль 7 в кремнии, после чего удаляют весь защитный слой 2 с кремниевой пластины 1 (см. фигуру 10).

В результате применения предложенного способа повышается точность изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур.

Микроэлектроника продолжает развиваться быстрыми темпами, как в направлении совершенствования полупроводниковой интегральной технологии, так и в направлении использования новых физических явлений.

---

1. Вавилов, В.Д. Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.

*Дата поступления  
в редакцию 18.04.2012*

**A.A. Gavrilov, A.N. Shipunov**

## **METHOD FOR IMPROVEMENT OF SILICON SHRINKAGE ACCURACY**

JSC ARPE «TEMP-AVIA», Arzamas

In order to improve silicon shrinkage accuracy, in this paper, advanced conventional method for manufacturing silicon structures having deep-etched profile, is represented. A batch method for producing single-crystalline elements, which are components of sensing element in MEMS sensor, is given. As example, components of sensing element are made from single-crystalline silicon. Both method for producing semiconductor film and method for producing relief silicon structures, are represented. Conventional photolithography method and its drawbacks are described. A production process with usage of contrast layer is also represented. Application of contrast layer during exposure increases shrinkage accuracy of photomask with respect to silicon wafer profile. As a result, both sensor yield in percent and accuracy performance stability of MEMS sensors are increased.

*Key words:* silicon, exposure, contrast layer, covering layer, sensing element.

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 515.14+519.6

Е.И. Яковлев, А.А. Ценова

## АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ БАЗИСОВ ГРУПП ДВУМЕРНЫХ ГОМОЛОГИЙ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТРИАНГУЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Разработан новый алгоритм, позволяющий с помощью компьютеров вычислять базисы групп двумерных гомологий по модулю 2 разветвленных триангулированных поверхностей трехмерного евклидова пространства.

*Ключевые слова:* полиэдр, триангулированная поверхность, группа гомологий, базис, алгоритм.

### Введение

Объектами исследования настоящей работы являются компактные однородные двумерные полиэдры трехмерного евклидова пространства  $R^3$ , представляющие собой объединения конечных наборов правильно пересекающихся прямолинейных симплексов размерности 2. Такие полиэдры принято называть триангулированными поверхностями. Они используются в качестве компьютерных моделей реальных объектов.

Предполагается, что у рассматриваемых поверхностей существуют одномерные симплексы – ребра, инцидентные более чем двум двумерным симплексам – треугольникам, при этом условии они считаются разветвленными.

Целью работы является создание нового алгоритма для вычисления базисов групп двумерных гомологий  $H_2(P)$  полиэдров  $P$  указанного вида с коэффициентами из поля  $Z_2$ . Отметим, что группы  $H_2(P)$  также являются конечными векторными пространствами над  $Z_2$ . Для решения такого рода задач применяются два основных метода.

Первый из них является алгебраическим, основан на приведении матриц инциденций симплексов заданного полиэдра к нормальной диагональной форме [1, с. 98-106]. Однако компьютерные модели могут состоять из многих миллионов симплексов. Работа с матрицами таких размеров предъявляет большие требования к ресурсам используемых для вычислений компьютеров и может занимать много времени.

Второй метод можно назвать геометрическим. Он опирается на теорему Александера-Понтрягина [2, с. 159], которая в применении к данному частному случаю утверждает, что для любого полиэдра  $P \subset R^3$  ранг группы гомологий  $H_2(P)$  на единицу меньше числа компонент связности разности  $R^3 \setminus P$ . Это утверждение позволяет свести решаемую задачу к поиску границ областей, на которые поверхность  $P$  делит пространство  $R^3$ . Менее формально можно отметить, что требуется выделить стороны данного полиэдра, поэтому ключевую роль в таком подходе играют ориентации треугольников.

Отметим, что в этом подходе вскрывается и практический смысл базиса группы  $H_2(P)$ . Например, если  $P$  представляет собой компьютерную модель здания, при построе-

нии которой мы пренебрегли толщиной стен, то каждый базисный двумерный цикл, найденный вторым способом, является объединением стен, потолка и пола некоторой комнаты или какого-либо иного закрытого помещения в смоделированном здании. Поскольку базис группы определен неоднозначно, то при его алгебраическом вычислении найденные циклы указанным свойством обладать не обязаны.

Впервые идея такого метода была изложена в [3], где предлагалось выполнить «утолщение» поверхности до трехмерного многообразия с краем (на более строгом топологическом языке это означает построение регулярной окрестности поверхности  $P$  в пространстве  $R^3$ ), найти базисные циклы полученного многообразия и спроектировать их обратно на двумерный полиэдр. При этом в [3] нет ни подробного описания процедур утолщения и проектирования, ни строгого обоснования этой идеи.

На самом деле упомянутые проекции можно вычислить, не выходя за пределы поверхности  $P$ , то есть без построения регулярной окрестности. Первым из авторов настоящей работы совместно с В.Ю. Зинченко разработан алгоритм [4, с. 185-196], в котором сначала строится клеточное разбиение полиэдра  $P$ , содержащее минимально возможное число клеток размерности 2, затем каждая двумерная клетка снабжается двумя различными ориентациями, после чего происходит построение функции склейки. Последнее представляет собой процедуру для нахождения ответа на вопрос: должны ли данные две ориентированные двумерные клетки входить в один двумерный цикл поверхности  $P$  или нет? Однако при этом одна и та же проверка выполняется столько раз, сколько общих ребер имеют рассматриваемые клетки. Таким образом, одно и то же действие может повторяться тысячи раз, причем с одним и тем же результатом.

Для устранения указанного недостатка авторы предлагают новый алгоритм решения сформулированной задачи. Он также основан на геометрическом подходе. Поэтому матрицы в этом алгоритме не используются, все процедуры выполняются только для элементов различных списков. В то же время здесь не применяется и предварительное разбиение на клетки. Вместо этого с самого начала удваивается список треугольников поверхности  $P$  путем добавления треугольников с противоположными ориентациями, затем для каждого ребра выполняется специальная сортировка списка ориентированных треугольников, входящих в его звезду. Это позволяет, начиная с произвольно выбранного ориентированного треугольника, корректно запустить процесс построения содержащего этот треугольник двумерного цикла. На последнем этапе из набора полученных таким способом ненулевых циклов остается удалить один лишний.

### Алгоритм

Пусть  $P$  – разветвленная триангулированная поверхность в  $R^3$ . Обозначим буквами  $V$ ,  $E$  и  $T$  списки вершин, ребер и треугольников полиэдра  $P$ . Обычно в компьютере задаются только список вершин с указанием их пространственных координат и список, состоящий из троек натуральных чисел, обозначающих номера вершин, на которые натянуты треугольники. Из этих данных легко получить список ребер  $E$ , а для каждого ребра  $a \in E$  – список инцидентных  $a$  треугольников [4, с. 97-99].

Предположим, что имеется ребро  $a \in E$ , инцидентное только одному треугольнику  $t$  полиэдра  $P$ . Удалив из  $E$  ребро  $a$ , а из  $T$  – треугольник  $t$ , построим подполиэдр  $P' \subset P$ . При этом считают, что подполиэдр  $P'$  получен из  $P$  элементарным коллапсированием (в размерности 2). Последовательное выполнение конечного числа таких преобразований называется коллапсированием. Если полиэдр  $P$  сколлапсирован на подполиэдр  $P^* \subset P$ , то включение  $i: P^* \rightarrow P$  является гомотопической эквивалентностью. При этом любой базис группы  $H_2(P^*)$  будет базисом и для  $H_2(P)$ . Так как  $P^*$  может содержать намного меньше симплексов, чем исходная поверхность, то прежде чем начинать вычисления базисов групп гомологий, целесообразно сначала выполнить полное коллапсирование полиэдра  $P$ . Для решения

этой задачи имеются подробно описанные алгоритмы (например, [4, с. 122-124]). Поэтому далее мы будем считать этот этап пройденным, а рассматриваемый полиэдр  $P$  уже неколлапсируемым, при этом каждое ребро  $a \in E$  инцидентно не менее чем двум треугольникам.

Также будет предполагаться, что поверхность  $P$  сильно связна. Это значит, что для произвольных двух треугольников из  $T$  найдется соединяющий их двумерный путь, то есть цепь  $X \in C_2(P)$ , в которой симплексы с соседними номерами имеют общую одномерную грань. В противном случае базис группы  $H_2(P)$  представляет собой объединение базисов групп двумерных гомологий компонент сильной связности, поэтому его построение сведется к применению следующего алгоритма к каждой из указанных компонент.

**Алгоритм 1. Вычисление двумерных базисных циклов разветвленной поверхности.**

Вход:

1. Список ребер  $E$  полиэдра  $P$ .
2. Список треугольников  $T$  полиэдра  $P$ .
3. Для каждого ребра  $a \in E$  список  $\partial^{-1}(a)$  инцидентных ему треугольников полиэдра  $P$ .

Выход:

Список  $P_1, \dots, P_r$  двумерных цепей полиэдра  $P$ .

Описание алгоритма:

*Шаг 1.* Создание копии списка треугольников. Положим  $\hat{T} := T$ .

*Шаг 2.* Удвоение списка треугольников полиэдра. Для каждого треугольника  $t \in T$  поменяем местами первые две вершины и добавим полученный треугольник в список  $\hat{T}$ .

*Шаг 3.* Построение для каждого ребра упорядоченного списка ориентированных треугольников, принадлежащих его звезде. Для каждого ребра  $a \in E$  выполним процедуры 3.1 – 3.2.

3.1. Если  $\text{card } \partial^{-1}(a) = n > 2$ , то выполним последовательность операций 3.1.1 – 3.1.4.

3.1.1. Ориентирование инцидентных  $a$  треугольников. Ориентируем треугольники из списка  $\partial^{-1}(a)$  так, чтобы они индуцировали на ребре  $a$  его исходную ориентацию.

3.1.2. Вычисление двугранных углов. Выберем ориентированный треугольник из списка  $\partial^{-1}(a)$  и обозначим его символом  $t_0$ . Затем для каждого треугольника  $t_k \in \partial^{-1}(a)$  вычислим двугранный угол  $\phi_k \in (0, 2\pi)$  от треугольника  $t_0$  до треугольника  $t_k$  в положительном направлении, определенном ориентацией ребра  $a$ .

3.1.3. Упорядочение списка инцидентных  $a$  треугольников. Перенумеруем элементы списка  $\partial^{-1}(a)$  так, чтобы для треугольников  $t_i, t_j \in \partial^{-1}(a)$  с номерами  $i < j$  выполнялось неравенство  $\phi_i < \phi_j$ .

3.1.4. Удвоение списка инцидентных  $a$  треугольников. Построим список  $D^{-1}(a) := \{s_1, \dots, s_{2n}\}$ , полагая  $s_1 := t_0$ ,  $s_{2k} := -t_k$  и  $s_{2k+1} := t_k$  для  $k = 1, \dots, n-1$  и  $s_{2n} := -t_0$ .

3.2. Если  $\text{card } \partial^{-1}(a) = 2$ , то выполним операции 3.2.1 – 3.2.2.

3.2.1. Ориентирование инцидентных  $a$  треугольников. Ориентируем треугольники  $t_0, t_1 \in \partial^{-1}(a)$  так, чтобы они индуцировали на ребре  $a$  его исходную ориентацию.

3.2.2. Удвоение списка инцидентных  $a$  треугольников. Положим  $s_1 := t_0$ ,  $s_2 := -t_1$ ,  $s_3 := t_1$ ,  $s_4 := -t_0$  и  $D^{-1}(a) := \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ .

*Шаг 4.* Инициализация переменных. Положим  $i := 0$ . Заведем пустую очередь  $R := \emptyset$ .

*Шаг 5.* Начальный этап построения 2-цикла.

5.1. Задание номера. Положим  $i := i + 1$ .

5.2. Обработка первого треугольника. Выберем ориентированный треугольник  $t \in \hat{T}$ ,

позначим его и удалим из общего списка ориентированных треугольников  $\hat{T}$ .

5.3. Инициализация 2-цикла. Положим  $P_i = \{t\}$ .

5.4. Первое расширение очереди  $R$ . Для любой стороны  $b$  треугольника  $t$  выполним операции 5.4.1 – 5.4.2.

5.4.1. Найдем номер  $l$  треугольника  $t$  в списке  $D^{-1}(b)$ .

5.4.2. Добавим пару  $(b, l)$  в конец очереди  $R$ .

*Шаг 6.* Основной этап построения 2-цикла. Пока  $R \neq \emptyset$  выполняем последовательность действий 6.1 – 6.6.

6.1. Выбор переменной. Выберем первую пару  $(a, k)$  из очереди  $R$  и удалим  $(a, k)$  из  $R$ .

6.2. Выбор очередного треугольника. Если  $k$  четно, то выберем из списка  $D^{-1}(a)$  ориентированный треугольник  $t$  с номером  $k - 1$ . Если  $k$  нечетно, то выберем ориентированный треугольник  $t \in D^{-1}(a)$  с номером  $k + 1$ .

6.3. Проверка новизны. Если треугольник  $t$  помечен, то вернемся к шагу 6.

6.4. Сокращение списка треугольников. Если треугольник  $t$  ранее не был использован, то помечим его и удалим из общего списка ориентированных треугольников  $\hat{T}$ .

6.5. Расширение цикла. Положим  $P_i := P_i + t$ .

6.6. Очередное расширение очереди  $R$ . Для сторон  $b$  треугольника  $t$ ,  $b \neq a$ , выполним операции 6.6.1 – 6.6.2.

6.6.1. Найдем номер  $l$  треугольника  $t$  в списке  $D^{-1}(b)$ .

6.6.2. Добавим пару  $(b, l)$  в конец очереди  $R$ .

*Шаг 7.* Исключение нулевого 2-цикла. Если  $P_i = 0$ , положим  $i := i - 1$ .

*Шаг 8.* Переход к построению нового 2-цикла. Если  $\hat{T} \neq \emptyset$ , то вернемся к шагу 5.

*Шаг 9.* Удаление лишнего 2-цикла. Если  $i > 0$ , то положим  $r := i - 1$  и из списка  $\{P_1, \dots, P_{r+1}\} = \{P_1, \dots, P_i\}$  удалим один элемент. При  $i = 0$  положим  $r := i = 0$ .

### Обоснование

*Теорема 1.* Если полиэдр  $P$  является сильно связной и неколлапсируемой разветвленной поверхностью, то найденное в результате работы алгоритма 1 число  $r$  равно рангу группы гомологий  $H_2(P)$ . При  $r > 0$  построенные циклы  $P_1, \dots, P_r$  образуют базис группы  $H_2(P)$ .

*Доказательство.* Сначала рассмотрим случай  $r > 0$ . Докажем, что при этом для каждого  $m \in \{1, \dots, r+1\}$  цепь  $P_m$  является циклом по модулю 2. Для этого рассмотрим произвольное ребро  $c \in E$  и обозначим символом  $D^{-1}(c, P_m)$  список инцидентных  $c$  треугольников цепи  $P_m$ . Если список  $D^{-1}(c, P_m)$  пуст, то  $c \notin \partial P_m$ . Поэтому далее будем предполагать, что  $D^{-1}(c, P_m) \neq \emptyset$ .

Напомним, что список  $D^{-1}(c) = D^{-1}(c, P)$ , построенный на шаге 3, состоит из четного числа ориентированных треугольников  $\{s_1, \dots, s_{2n}\}$ . В силу неколлапсируемости полиэдра  $P$  имеет место неравенство  $n \geq 2$ . Разобьем  $D^{-1}(c)$  на пары  $\{s_{2j-1}, s_{2j}\}$ ,  $j = 1, \dots, n$ .

Согласно неравенству  $D^{-1}(c, P_m) \neq \emptyset$ , ребро  $c$  вместе с некоторым номером  $p$  из списка  $\{1, \dots, 2n\}$  хотя бы один раз побывало в очереди  $R$  при  $i = m$ . Пара  $(c, p)$  попадает в конец очереди  $R$  либо на шаге 5.4.2, либо на шаге 6.6.2 в виде  $(c, p) = (b, l)$ . Перед этим либо на шаге 5.3, либо на шаге 6.5 к цепи  $P_m = P_i$  прибавляется ориентированный треугольник  $t$ . Пусть  $\{s_{2j-1}, s_{2j}\}$  – пара из  $D^{-1}(c)$ , содержащая треугольник  $t$ .

Пара  $(c, p)$  удаляется из очереди  $R$  на шаге 6.1 в виде  $(c, p) = (a, k)$ . При этом на

следующем шаге 6.2 из пары  $\{s_{2j-1}, s_{2j}\}$  выбирается треугольник, отличный от рассмотренного в предыдущем абзаце. Согласно шагам 6.3 – 6.5, он прибавляется к цепи  $P_m$ , если это не было сделано ранее.

Таким образом, для каждого  $j = 1, \dots, n$  элементы пары  $\{s_{2j-1}, s_{2j}\}$  принимают участие в построении цепи  $P_m$  или нет одновременно. Следовательно, в этом процессе задействовано четное число ориентированных треугольников из списка  $D^{-1}(c)$ . Если два треугольника, отличающиеся друг от друга только ориентацией, входили в их число, то при суммировании они оба уничтожаются. Поэтому в окончательной сумме  $P_m$  содержится четное число треугольников из  $\partial^{-1}(c)$ . Это значит, что  $c \notin \partial P_m$ . Поскольку  $c$  – произвольное ребро полиэдра  $P$ , то отсюда следует, что  $\partial P_m = 0$  и потому  $P_m \in Z_2(P)$ .

Далее убедимся в том, что циклы  $P_1, \dots, P_r$  линейно независимы. Допустим, что это не так. Тогда сумма некоторых из этих циклов равна нулю. С точностью до нумерации можно считать, что

$$P_1 + \dots + P_q = 0, \tag{1}$$

где  $1 \leq q \leq r$ .

Пусть  $\hat{M}$  – объединение циклов  $P_1, \dots, P_q$ , а  $\hat{N}$  – набор всех остальных треугольников из списка  $\hat{T}$ . Согласно шагам 5.2 и 6.4 алгоритма, произвольный ориентированный треугольник  $t \in \hat{T}$  может входить только в один из построенных циклов. Отсюда и из (1) следует, что множество  $\hat{M}$  содержит четное число треугольников, причем вместе с любым треугольником  $t$  в  $\hat{M}$  имеется тот же треугольник с противоположной ориентацией.

В силу неравенств  $0 < q < r + 1$  ни одно из множеств  $\hat{M}$  и  $\hat{N}$  не может быть пустым. Поэтому найдутся треугольники  $t \in \hat{M}$  и  $t_* \in \hat{N}$ . Так как полиэдр  $P$  сильно связан, то в нем имеется двумерный путь  $X = \{t_0, \dots, t_h\}$ , соединяющий  $t$  и  $t_*$ . Без ограничения общности можно считать, что треугольники из  $X$  ориентированы когерентно, то есть для любого  $j = 1, \dots, h$  треугольники  $t_{j-1}$  и  $t_j$  индуцируют на общей стороне  $a_j = t_{j-1} \cap t_j$  противоположные ориентации, и  $t_0 = t$ . При этом треугольники  $t_h$  и  $t_*$  либо совпадают, либо имеют противоположные ориентации. Если  $X \subset \hat{M}$ , то, согласно результатам предыдущего абзаца, в обоих случаях  $t_* \in \hat{M}$ , что противоречит выбору ориентированного треугольника  $t_*$ .

Следовательно, найдется такое  $j \in \{1, \dots, h\}$ , что  $t_{j-1} \in \hat{M}$ , а  $t_j \in \hat{N}$ .

Согласно шагу 3 алгоритма 1, треугольники  $t_{j-1}$  и  $t_j$  входят в список  $D^{-1}(a_j) = \{s_1, \dots, s_{2n}\}$ . Мы доказали, что  $D^{-1}(a_j)$  не лежит целиком ни в  $\hat{M}$ , ни в  $\hat{N}$ , поэтому найдутся соседние элементы  $s_{k-1}, s_k \in D^{-1}(a_j)$ , один из которых принадлежит  $\hat{M}$ , а другой – множеству  $\hat{N}$ .

Полученный результат немедленно приводит к противоречию. Действительно, если число  $i$  четно, то, согласно шагу 6.2 алгоритма, треугольники  $s_{k-1}$  и  $s_k$  должны были оба попасть в один из построенных циклов и, следовательно, принадлежать одному из множеств  $\hat{M}$  и  $\hat{N}$ . Если же  $i$  нечетно, то согласно пп. 3.1.4 и 3.2.2,  $s_{k-1}$  и  $s_k$  представляют собой один и тот же треугольник, но с противоположными ориентациями. Как доказано ранее, в этой ситуации они также обязаны оба принадлежать либо  $\hat{M}$ , либо  $\hat{N}$ .

Полученное противоречие показывает, что наше допущение неверно и на самом деле циклы  $P_1, \dots, P_r$  линейно независимы.



Так как  $\dim P = 2$ , то  $H_2(P) = Z_2(P)$ . Отсюда и из доказанного ранее утверждения следует, что

$$r \leq \text{rank } H_2(P). \tag{2}$$

Согласно лемме 3.3 из [5], пространство  $R^3$  можно триангулировать так, чтобы поверхность  $P$  стала подполиэдром полиэдра  $R^3$ . Зададим на  $R^3$  правую ориентацию. Она индуцирует ориентации на всех трехмерных симплексах. Зафиксируем их. Если  $t$  – двумерная грань 3-симплекса  $\sigma$ , то на  $t$  индуцируется ориентация, которую мы будем считать согласованной с ориентацией симплекса  $\sigma$ . При этом соответствующий вектор нормали к  $t$  направлен внутрь симплекса  $\sigma$ .

Пусть  $Z = \{P_1, \dots, P_{r+1}\}$  – список 2-циклов полиэдра  $P$ , построенных в ходе работы алгоритма до шага 9, а  $O = \{U_1, \dots, U_\rho\}$  – набор компонент связности множества  $R^3 \setminus P$ . Построение произвольного цикла  $P_i \in Z$  начинается на шаге 5.3 с некоторого начального ориентированного треугольника  $t = t_0$ , выбранного на шаге 5.2. Треугольнику  $t_0$  инцидентны два трехмерных симплекса пространства  $R^3$ . Ориентация одного из них согласована с заданной ориентацией треугольника  $t_0$ . Обозначим этот симплекс буквой  $\sigma_0$ . Тогда найдется компонента  $U_{k_i} \in O$ , содержащая внутренность симплекса  $\sigma_0$ . Полагая  $g(P_i) = U_{k_i}$  для всех  $P_i \in Z$ , определим отображение  $g : Z \rightarrow O$ .

Докажем, что отображение  $g : Z \rightarrow O$  сюръективно. Для этого рассмотрим произвольную область  $U \in O$  и обозначим буквой  $S$  совокупность трехмерных симплексов пространства  $R^3$ , внутренности которых лежат в  $U$ . Тогда  $S$  – трехмерная цепь. Так как  $Z_3(R^3) = 0$ , то  $\partial S \neq \emptyset$ . Пусть  $t_* \in \partial S$ . Тогда существует симплекс  $\sigma_* \in S$ , для которого  $t_*$  является гранью. Симплекс  $\sigma_*$  индуцирует на  $t_*$  ориентацию, которую мы назовем положительной по отношению к области  $U$ .

Согласно шагу 8, в работе алгоритма 1 используется каждый ориентированный треугольник полиэдра  $P$ , поэтому для некоторого значения параметра  $i$  для треугольника  $t = t_*$  выполняются либо действия 5.2 и 5.3, либо операции 6.2 – 6.5.

В первом случае  $t_* = t_0$ , и потому  $\text{Int } \sigma_0 = \text{Int } \sigma_* \subset U$ . Если же  $t_* \neq t_0$ , то из пп. 5.4, 6.6, 6.2 алгоритма следует существование двумерного пути  $\{t_0, t_1, \dots, t_q\}$  в  $P$  с конечным треугольником  $t_q = t_*$ , в котором любые два соседних треугольника  $t_{n-1}$  и  $t_n$  ориентированы когерентно. Поскольку треугольники  $t_{n-1}$  и  $t_n$ ,  $n \in \{1, \dots, q\}$ , образуют пару вида  $\{s_{2j-1}, s_{2j}\}$  из  $D^{-1}(a_n)$  для их общего ребра  $a_n = t_{n-1} \cap t_n$ , то в силу построения списка  $D^{-1}(a_n)$  на шаге 3 найдется трехмерный путь  $Y_n = \{\sigma_{n0}, \dots, \sigma_{np_n}\}$ , в котором соседние симплексы  $\sigma_{nk-1}$  и  $\sigma_{nk}$  также ориентированы когерентно, их общая грань  $\tau_{nk}$  не принадлежит поверхности  $P$ ,  $t_{n-1} \in \partial \sigma_{n0}$ ,  $t_n \in \partial \sigma_{np_n}$ , причем ориентации симплексов  $\partial \sigma_{n0}$  и  $\partial \sigma_{np_n}$  согласованы с ориентациями треугольников  $t_{n-1}$  и  $t_n$  соответственно. Из последнего свойства, в частности, следует, что  $\sigma_{10} = \sigma_0$  и  $\sigma_{qp_q} = \sigma_*$ . Положим

$$V = \bigcup_{n=1}^q ((\bigcup_{k=0}^{p_n} \text{Int } \sigma_{nk}) \cup (\bigcup_{k=1}^{p_n} \text{Int } \tau_{nk})).$$

Множество  $V$  связно и не пересекается с полиэдром  $P$ . Следовательно, оно целиком лежит в одной из компонент связности множества  $R^3 \setminus P$ . Так как  $V$  содержит внутренность симплекса  $\sigma_*$  и  $\text{Int } \sigma_* \subset U$ , то  $V \subset U$ . При этом  $\sigma_0 \subset V \subset U$ .

Предположим, что при том же значении параметра  $i$  операции 6.2 – 6.5 выполнялись с ориентированным треугольником  $t_{**} = -t_*$ . Пусть  $\sigma_{**}$  – трехмерный симплекс полиэдра  $R^3$ , инцидентный треугольнику  $t_{**}$  и отличный от  $\sigma_*$ . Тогда ориентации симплексов  $\sigma_*$  и  $t_{**}$  согласованы. При этом точно так, как это было сделано в предыдущем абзаце, можно построить связное подмножество  $W \subset R^3 \setminus P$ , содержащее внутренности симплексов  $\sigma_0$  и  $\sigma_{**}$ . При этом из включений  $\text{Int } \sigma_0 \subset U$  и  $\text{Int } \sigma_0 \subset W$  следует, что  $W \subset U$ . В результате  $\text{Int } \sigma_{**} \subset U$ , и потому  $\sigma_{**} \in S$ . Последнее противоречит включению  $t_* \in \partial S$ .

Таким образом, допущение неверно и, на самом деле, на этом этапе треугольник  $-t_*$  не используется. Это означает, что для рассматриваемого  $i$  мы приходим к шагу 7 с непустым списком  $P_i$ . Но тогда  $P_i \in Z$ , а из включения  $\text{Int } \sigma_0 \subset U$  следует, что  $g(P_i) = U$ .

Из сюръективности отображения  $g : Z \rightarrow O$  следует, что  $r + 1 \geq \rho$ . По теореме Александера-Понтрягина  $\rho - 1 = \text{rank } H_2(P)$  ([2], с. 159). Поэтому  $r \geq \text{rank } H_2(P)$ . Последнее вместе с (2) влечет за собой равенство  $r = \text{rank } H_2(P)$ . Так как циклы  $P_1, \dots, P_r$  линейно независимы, то они образуют базис группы  $H_2(P) = Z_2(P)$ . Этим в случае  $r > 0$  теорема доказана.

Пусть далее  $r = 0$ . Это значит, что для каждого значения параметра  $i$  на шаге 7 мы имели равенство  $P_i = 0$ . Последнее возможно только тогда, когда вместе с любым ориентированным треугольником  $t$  при том же значении  $i$  обрабатывается и противоположно ориентированный треугольник  $-t$ . При этом, как показано ранее, оба инцидентных треугольнику  $t$  трехмерных симплекса пространства  $R^3$  лежат в одной компоненте связности множества  $R^3 \setminus P$ .

Следовательно, поверхность является односторонней, что равносильно связности множества  $R^3 \setminus P$ . Отсюда, согласно уже упоминавшейся теореме Александера-Понтрягина, следует, что  $\text{rank } H_2(P) = 0 = r$ .

### Оценка сложности

Пусть  $n = \text{card } T$ ,  $n(a) = \text{card } \partial^{-1}(a)$  для всех  $a \in E$  и  $r_*$  – количество повторений шагов 5 – 8 алгоритма 1. Очевидно,  $r + 1 \leq r_* < n$ . Для каждого  $m = 1, \dots, 9$  символом  $N_m$  обозначим число операций, выполняемых на шаге с номером  $m$ .

Наиболее трудоемкими в алгоритме 1 являются шаги 3 и 6. Поэтому их и оценим в первую очередь.

Шаг 3 выполняется для каждого ребра  $a \in E$ . При этом более всего времени требует процедура 3.1.3, которая подразумевает сортировку списка  $\partial^{-1}(a)$ . На это нужно не более, чем  $n(a)^2$  операций [6, с. 228]. В пп. 3.1.1, 3.1.2 и 3.1.4 число действий линейно зависит от  $n(a)$ . Заметим, что шаг 3.1 предназначен только для ребер ветвления, для остальных ребер предусмотрен гораздо менее трудоемкий шаг 3.2. Но в худшем случае все элементы списка  $E$  могут оказаться ребрами ветвления. Из этого будем исходить. Тогда для выполнения всего шага 3 потребуется самое большее  $N_3 = \sum_{a \in E} n(a)^2 + c_3 \sum_{a \in E} n(a)$  операций, где  $c_3$  – некоторая константа. Поскольку любой треугольник имеет три стороны, то в сумме  $\sum_{a \in E} n(a)$  учтен каждый элемент списка  $T$ , причем ровно 3 раза. Поэтому  $\sum_{a \in E} n(a) = 3n$ . Кроме того, в силу положительности чисел  $n(a)$  для всех  $a \in E$  имеет место неравенство  $\sum_{a \in E} n(a)^2 < (\sum_{a \in E} n(a))^2$ .

Следовательно,  $N_3 < 9n^2 + 3c_3n$ .

Для оценки шага 6 заметим, что каждая пара  $(a, k)$ , где  $a \in E$  и  $k \in D^{-1}(a)$ , точно

один раз попадает в очередь  $R$ . Так как  $\text{card } D^{-1}(a) = 2n(a)$ , то через  $R$  пройдут  $2 \sum_{a \in E} n(a) = 6n$  пар указанного вида. Для каждой пары  $(a, k)$  в пп. 6.1 – 6.5 выполняется постоянное число операций. В п. 6.6.1 происходит поиск номера некоторого треугольника  $t$  в списке  $D^{-1}(b)$  для  $b \in \partial t$ ,  $b \neq a$ . Для этого требуется  $2n(b) < 2n$  действий. Поскольку  $b$  принимает 2 значения, а в п. 6.6.2 предусмотрено всего одно действие, то общее число операций в п. 6.6 ограничено сверху числом  $4n + 2$ . Таким образом,  $N_6 < 24n^2 + c_6n$ .

На шаге 5 производятся аналогичные операции, только с гораздо меньшим числом объектов, поэтому заведомо  $N_5 < N_6$ .

Также легко видеть, что  $N_2$  линейно зависит от  $n$ , величины  $N_7$  и  $N_8$  линейно зависят от параметра  $r_* < n$ , а на шагах 1, 4 и 9 суммарно выполняется всего 7 действий. Отсюда и из неравенств, полученных в предыдущих абзацах, вытекает следующая асимптотическая оценка эффективности построенного алгоритма.

*Теорема 2. Время выполнения алгоритма 1 в наихудшем случае имеет порядок  $O(n^2)$ , где  $n$  – число двумерных симплексов (треугольников) полиэдра  $P$ .*

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на оказание услуг в 2012-2014 гг. подведомственными высшими учебными заведениями (шифр заявки 1.1907.2011).*

#### Библиографический список

1. Зейферт, Г. Топология / Г.Зейферт, В. Трельфалль. – М.-Л.: ГОНТИ, 1938; Ижевск: НИЦ РХД, 2001.
2. Фоменко, А.Т. Курс гомотопической топологии / А.Т. Фоменко, Д.Б. Фукс. – М.: Наука, 1989.
3. Dey T.K., Guha S. Computing homology groups of simplicial complexes in  $R^3$ . Journal of the ACM. Vol. 45, №2. March 1998. Pp. 266–287.
4. Яковлев, Е.И. Вычислительная топология / Е.И. Яковлев. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2005.
5. Рурк, К. Введение в кусочно линейную топологию / К. Рурк, Б. Сандерсон. – М.: Мир, 1974.
6. Ахо, А.В. Структуры данных и алгоритмы / А.В. Ахо, Д.Э. Хопкрофт, Д.Д. Ульман. – М.: Вильямс, 2001.

*Дата поступления  
в редакцию 25.04.2012*

**E.I. Yakovlev, A.A. Tsenova**

#### THE ALGORITHM FOR COMPUTING BASISES OF TWO-DIMENSIONAL HOMOLOGY GROUPS OF THE BRANCHED TRIANGULATED SURFACES

Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky

A new algorithm allowing by means of computers to calculate basises of two-dimensional homology groups modulo 2 of the branched triangulated surfaces in the three-dimensional Euclidean space has been developed.

The algorithm is based on Alexander-Pontryagin theorem according to which the solved problem can be reduced to the creation of borders of areas into which the surface divides space. This method has essential advantages before the classical algorithm known still since the 1930th years. First, the two-dimensional cycles that founded with its help have important geometrical sense. Secondly, in it application of incidence matrices isn't provided, all actions are carried out only with lists. Thirdly, the new algorithm faster – time of its work in the worst case has an order of  $O(n^2)$ , where  $n$  – number two-dimensional simplices (triangles) of considered polyhedron.

*Key words:* polyhedron, triangulated surface, homology group, basis, algorithm.

УДК 338.27.015

Е.С. Митяков<sup>1</sup>, В.А. Сазонтов<sup>2</sup>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ООО «Интеком»<sup>2</sup>

Рассмотрена возможность применения алгоритмов адаптивной фильтрации для анализа и прогнозирования экономической динамики. Проведена апробация алгоритмов адаптивной фильтрации для прогнозирования индикаторов экономической безопасности Нижегородской области.

*Ключевые слова:* адаптивная фильтрация, прогнозирование, временные ряды, экономическая динамика.

Рассмотрим механизм прогнозирования, связанный с использованием адаптивной фильтрации. Проблема фильтрации временных рядов и случайных процессов является одной из традиционных и основополагающих для кибернетики и информатики. Она берёт начало с работ А.Н. Колмогорова и Н. Винера [1–3]. Позднее к решению задач фильтрации было привлечено внимание очень многих исследователей. Особенно широкую известность получили работы Р. Калмана [4, 5], предложившего оригинальный подход, базирующийся на описании процессов с помощью стохастических дифференциальных или разностных уравнений. Основной целью сложившейся здесь теории является оптимальный (или приближённо оптимальный) синтез фильтров, требующий определённых априорных сведений о вероятностных характеристиках наблюдений и их составляющих.

Современные методы адаптации и обучения открыли новые, ранее не использованные возможности в теории фильтрации. Они выразились в синтезе процедур обработки наблюдений, требующих существенно меньшего объёма априорных сведений, способных приспосабливаться к конкретным эмпирическим данным и разнообразным практическим ситуациям. Такие свойства алгоритмов достигаются за счёт настройки фильтров как по текущим наблюдениям, так, и, возможно, по так называемым обучающим реализациям, связанным с полезным сигналом (трендом) или шумом. Адаптивные фильтры по своей структуре являются нелинейными и могут приобретать свойства, близкие к оптимальным, лишь по мере накопления данных.

Простейшая адаптивная модель основана на расчёте так называемой экспоненциальной скользящей средней, которая вычисляется с помощью рекуррентной формулы:

$$y_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)y_{t-1}, \quad (1)$$

где  $t$  – дискретное время;  $y_t$  – значение скользящей средней в момент  $t$ ;  $x_t$  – исходный временной ряд;  $\alpha$  – фактор сглаживания ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ). Выражение (1) может быть представлено в следующем виде:

$$y_t = y_{t-1} + \alpha(x_t - y_{t-1}). \quad (2)$$

Последняя разность в правой части (2) представляет собой ошибку предыдущей оценки, а новая оценка получается в результате корректировки с учётом последней ошибки. В этом состоит адаптивность модели.

Данные формулы часто используются для краткосрочного прогнозирования временного ряда, особенно в техническом анализе финансовых рынков. Предположим, что исходный ряд генерируется следующей моделью:

$$x_t = a_t + \xi_t, \quad (3)$$

где  $a_t$  – некоторая неслучайная последовательность, определяющая тренд;  $\xi_t$  – случайные неавтокоррелированные отклонения с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией.

Тогда стандартная прогнозная модель для такого ряда имеет вид

$$\hat{x}_\tau = y_t, \quad (4)$$

где  $\hat{x}_\tau$  – прогноз, сделанный в момент  $t$  на  $\tau$  шагов вперёд. При прогнозировании следует, с одной стороны, как можно быстрее отразить изменение тренда  $a_t$ , а значит, уменьшить фактор сглаживания  $\alpha$ , а с другой стороны, необходимо сгладить случайные колебания  $\xi_t$ , что требует увеличения  $\alpha$ . Эти два требования находятся в противоречии друг с другом, поэтому оптимизация модели состоит в нахождении компромиссного значения  $\alpha$  для конкретной задачи.

В случае, когда временной ряд имеет тенденцию линейного роста, экспоненциальное сглаживание даёт систематическую ошибку, т.е. приводит к смещённой оценке. Чтобы её избежать, используют несколько адаптивных моделей, в основе которых лежит гипотеза о том, что прогноз подчиняется уравнению

$$\hat{x}_\tau = a_{1,\tau} + \tau a_{2,\tau}, \quad (5)$$

где  $\hat{a}_{1,\tau}$ ,  $\hat{a}_{2,\tau}$  – текущие оценки коэффициентов адаптивного полинома первого порядка.

Классической моделью, позволяющей получить данные оценки, является модель Хольта, в которой расчёт производится следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{1,\tau} &= \alpha_1 x_t + (1 - \alpha_1)(\hat{a}_{1,\tau-1} + \hat{a}_{2,\tau-1}); \\ \hat{a}_{2,\tau} &= \alpha_2 (\hat{a}_{1,\tau} - \hat{a}_{1,\tau-1}) + (1 - \alpha_2) \hat{a}_{2,\tau-1}, \end{aligned}$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – параметры сглаживания ( $0 \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq 1$ ).

Оптимальные значения параметров, как правило, рассчитываются путём минимизации среднего квадрата ошибки прогноза. Двухпараметрический предиктор Хольта используется также в качестве основы для построения более сложных фильтров, таких как фильтр Тейла-Вейджа или трёхпараметрическая модель Бокса-Дженкинса. Однако, как показывают многочисленные эмпирические исследования, многопараметрические модели не дают заметного преимущества. На практике широко используется частный случай модели Хольта, называемый моделью Брауна, для которой  $\alpha_1 = \alpha_2$ .

Все эти методы фильтрации обладают существенным недостатком, связанным с тем, что временной ряд рассматривается изолированно от других явлений, оказывающих на него влияние, и даже при наличии дополнительной информации она может быть учтена лишь при оптимизации скорости адаптации фильтра. Помимо этого, точность подобного рода прогноза быстро падает со временем, поэтому для долгосрочного прогнозирования эти методы не работают.

Ещё одно направление, которое пользуется большой популярностью в традиционных эконометрических приложениях, связано с работами Бокса и Дженкинса. Гипотеза, лежащая в основе разработанных ими адаптивных моделей, состоит в том, что исходный временной ряд  $x_t$  может быть аппроксимирован предельно стационарным (в широком смысле) процессом. Обычно рассматриваются три возможных варианта [6]:

1) последовательность скользящего среднего порядка  $q$ :

$$x_t = \sum_{i=0}^q c_i v_{t-i},$$

где  $v_t$  – дискретный белый шум;  $c_i$  – фиксированные числа;

2) модель авторегрессии порядка  $p$ :

$$x_t + a_1 x_{t-1} + \dots + a_p x_{t-p} = v_t,$$

где  $a_i$  – фиксированные числа;

3) смешанная модель авторегрессии и скользящего среднего порядка  $(p, q)$ :

$$x_t + a_1 x_{t-1} + \dots + a_p x_{t-p} = c_0 v_n + \dots + c_q v_{n-q}.$$

В общем случае, когда описание тренда может быть задано с помощью вектора состояний и системы стохастических разностных уравнений, то оптимальные линейные фильтры называются фильтрами Калмана. Для построения данных фильтров достаточно знать первые два момента соответствующего случайного процесса. Поскольку априорные вероятностные характеристики исходного временного ряда зачастую неизвестны, то оценки ковариационных функций по конечной реализации производятся с неопределённой погрешностью и достоверностью. Именно поэтому адаптивный алгоритм настройки, используя текущее расхождение между наблюдениями и оценками, осуществляет постоянную корректировку структурных параметров. При этом фильтр приспособливается к статистическим характеристикам именно тех эмпирических данных, которые поступают в него.

Как показывает опыт, адаптивные модели временных рядов могут давать более надежные результаты, чем сложные эконометрические системы уравнений. Так, при достаточно резком изменении некоторой экономической системы (например, под влиянием научно-технического прогресса, изменений социально-политических условий и т.п.) эконометрическая модель с постоянными параметрами будет экстраполировать существенно устаревшие зависимости. Адаптивная модель в таких же условиях перманентно приспособливается и учитывает эти изменения.

В качестве примера можно привести эксперимент Ч. Нельсона [7], в котором сравнивалась точность прогнозов, полученных на основе эконометрической модели, состоящей из нескольких уравнений, и достаточно простых адаптивных моделей, применявшихся для прогнозирования нескольких временных рядов. Оказалось, что для периода, использованного при оценивании параметров эконометрической модели, последняя показала лучшее приближение к данным наблюдения, чем адаптивные модели. Однако за пределом периода наблюдения с помощью эконометрической модели (с экзогенными реальными данными) полученные результаты оказались хуже, чем с помощью адаптивных моделей.

Таким образом, методы адаптивной фильтрации в настоящее время являются наиболее перспективными при анализе и прогнозировании. Однако до настоящего времени их использование в задачах анализа и прогнозирования индикаторов экономической безопасности не до конца изучено. Вместе с тем, модели адаптивной фильтрации могут эффективно использоваться в задачах мониторинга экономической безопасности страны и региона, что подтверждается их успешной апробацией в Нижегородском регионе.

Апробация алгоритмов адаптивной фильтрации проведена на основе данных, предоставленных Территориальным органом Федеральной службы государственной статистики по Нижегородской области [8]. Количественных сведений оказалось недостаточно для того, чтобы выявить существенное статистическое преимущество какого-либо из адаптивных методов. Вместе с тем, удалось построить достаточно простой и эффективный класс прогнозирующих фильтров. При разработке алгоритма построения этих фильтров использовались следующие соображения. Во-первых, долгосрочная динамика основных показателей экономической безопасности региона удовлетворительно описывалась линейным трендом, который определяется по стандартным формулам линейной регрессии. Во-вторых, временные ряды за вычетом трендовой составляющей имели характерные циклические компоненты. Таким образом, были получены аппроксимирующие функции следующего типа [9]:

$$y = mt + b + a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + a_2 \cos(2\omega t + \varphi_2), \quad (6)$$

где  $m$ ,  $b$  – коэффициенты линейной регрессии;  $\omega$  – частота основной гармоники;  $a_1$ ,  $a_2$  –

амплитуды первой и второй гармоники;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – фазы первой и второй гармоники. Последнее слагаемое представляет собой поправку к первой гармонике на двойной частоте. Неизвестные параметры гармонических составляющих определялись методом наименьших квадратов.

В качестве примера на рис. 1 – рис. 4 приведена динамика некоторых показателей социодинамики Нижегородской области за период 2000–2009 гг.



**Рис. 1. Доходы консолидированного бюджета Нижегородской области, млн руб.**



**Рис. 2. Уровень безработицы Нижегородской области, %**



Рис. 3. Динамика численности населения Нижегородской области, тыс. чел.

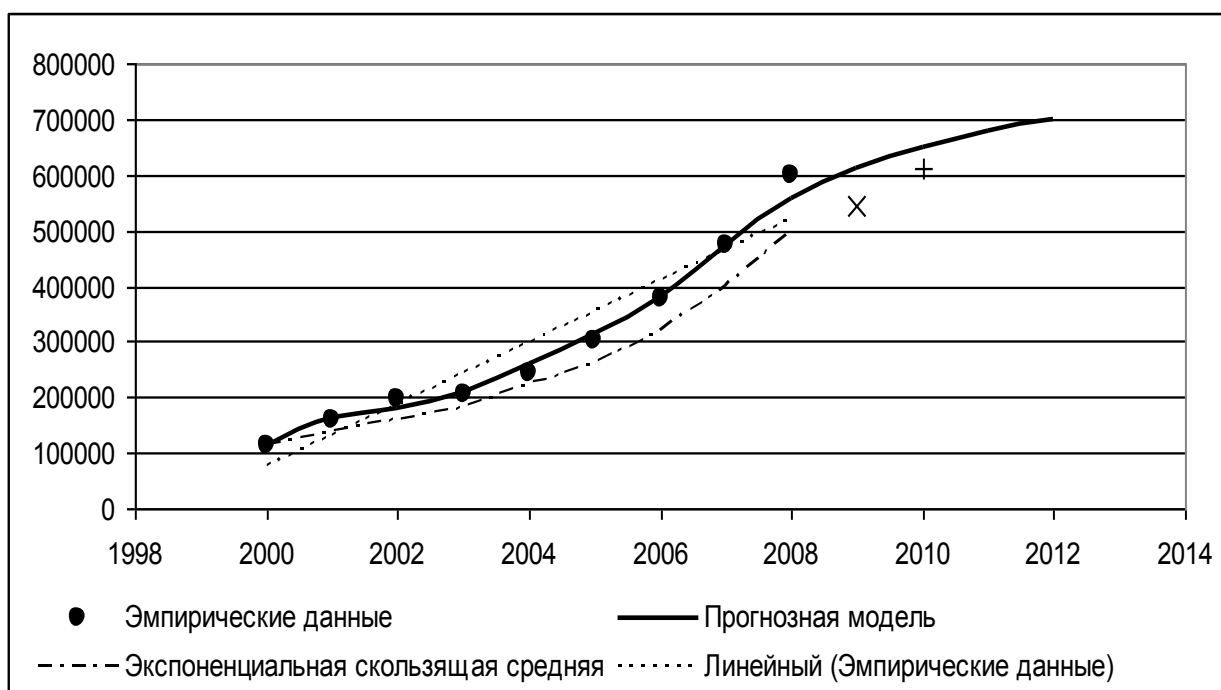


Рис. 4. Валовой региональный продукт Нижегородской области, млн руб.

Реальные данные представлены круглыми маркерами, прогнозная модель – сплошной линией. Для сравнения на тех же рисунках приведен ряд экспоненциальной скользящей средней с коэффициентом сглаживания 0,5 (штрих-пунктирная линия), а также линейный тренд, построенный по эмпирическим данным (пунктир). Модель строилась на основании данных за 2000-2009 гг. (для ВРП – за 2000-2008 гг., для численности населения – за 1990-2009 гг.).

Для верификации модели приведены реальные данные соответствующих индикаторов для



одного года после прогноза (символ «×»): для ВРП – за 2009 г., для остальных показателей – за 2010 г. Кроме того, для ВРП приведены неофициальные данные за 2010 г. (символ «+»).

Рисунки демонстрируют хорошее соответствие модельной зависимости исходным рядам данных. Что касается верификации прогноза, то результаты можно считать вполне удовлетворительными, за исключением показателя «Уровень безработицы». Последний показатель, как видно из рис. 3.13, имеет очень большую дисперсию и его поведение год от года трудно предугадать. По-видимому, время адаптации здесь должно быть существенно меньше года, поэтому следует использовать более оперативную информацию об исходных данных.

В дальнейшем предполагается разработка методик прогнозирования устойчивого развития и экономической безопасности региона с использованием математических и эконометрических моделей и алгоритмов адаптивной фильтрации. В частности, будет использован прямой синтез адаптивных фильтров непосредственно по текущим наблюдениям, когда фильтруемый сигнал является обучающим, а процедуры настройки носят рекуррентный характер.

#### Библиографический список

1. **Колмогоров, А.Н.** Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Сер. математическая. 1941. № 5.
2. **Wiener, N.** The extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series / N. Wiener. – N.Y.: Wiley. 1949.
3. **Хинчин, А.Я.** Теория корреляции стационарных стохастических процессов // Успехи мат. наук. 1938. Вып. 5.
4. **Kalman, R.E.** New methods and results in linear prediction and filtering theory. / R.E. Kalman. – Baltimore: RIAS Tech. Rep. 1961. P. 1-61.
5. **Kalman, R.E.** New results in linear filtering and prediction theory / R.E. Kalman, R. Bucy. // ASME J. Basis Eng. – March 1961. – V. 83.
6. **Копыркин, К.** Динамические скользящие средние // Современный трейдинг. 2001. №5-6. С. 8-12.
7. **Лукашин, Ю.П.** Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю.П. Лукашин. – М.: Финансы и статистика, 2003.
8. URL: <http://www.gks.ru>
9. Инновационные преобразования как императив экономической безопасности региона: мониторинг и прогнозирование / Ю.М. Максимов [и др.] // Инновации. 2011. №7. С. 96-100.
10. Валовой внутренний продукт // <http://www.vvprf.ru/archive/clause316.html>

*Дата поступления  
в редакцию 25.04.2012*

**E.S. Mityakov, V.A. Sazontov**

#### APPLICATION OF ADAPTIVE FILTRATION ALGORITHMS TO FORECAST ECONOMIC DYNAMICS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. Alekseev,  
Company "INTEKOM"

This study covers a possible application of adaptive filtration algorithms to analyze and forecast economic dynamics. Adaptive filtration algorithms have been approved to be used to forecast indicators of the Nizhny Novgorod region economic security.

*Key words:* adaptive filtering, forecasting, time series, economic dynamics.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ  
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
Тел. 8 312 4367372  
E-mail: [rio@nntu.nnov.ru](mailto:rio@nntu.nnov.ru)*

***ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ***

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- Статью необходимо сопроводить актом экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 – 12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

**B. Meijboom, M. Houtepens**

### STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

#### The name of organization

**Purpose:** The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

**Findings:** It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

**Originality/value:** Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

*Key words:* multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

## НАШИ АВТОРЫ

### РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

**Белоусов Евгений Леонидович** - ген. конструктор, 1-й зам. ген. д-ра по НИОКР ОАО "НПП "Поле́т", д.т.н., проф., e-mail: polyot@atnn.ru

**Войткевич Константин Леонидович** – д-р по НИОКР ОАО "НПП "Поле́т", д.т.н., проф., e-mail: polyot@atnn.ru

**Кейстович Александр Владимирович** – гл. науч. сотруд. ОАО "НПП "Поле́т", д.т.н., доц., e-mail: polyot@atnn.ru

**Брянцев Владимир Федорович** – гл. науч. сотруд. ОАО "НПП "Поле́т", д. физ.-мат. н., доц., e-mail: polyot@atnn.ru

**Сайфетдинов Харис Имамович** – консультант д-ра Моск. филиала ОАО "НПП "Поле́т", д. воен. н., проф., e-mail: polyot@atnn.ru

**Седаков Андрей Юлиевич** – к.т.н, д-р ФГУП «ФНПЦ НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», e-mail: niiis@niiis.nnov.ru.

**Букварев Евгений Александрович** – м.н.с., НГТУ им.Р.Е. Алексеева, e-mail: bukvarrev@nntu.nnov.ru

**Рябков Андрей Павлович** – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: ryabkov.andrey@mail.ru

### МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

**Морозов Владимир Павлович** – к. физ.-мат.н., доц., НИУ Высшая школа экономики, e-mail: vmorozov@hse.ru

**Семин Сергей Владимирович** – аспирант, НГТУ им.Р.Е. Алексеева, e-mail: fancer.lancer@gmail.com

**Куркина Оксана Евгеньевна** – к. физ.-мат.н., доц., НИУ Высшая школа экономики, e-mail: okurkina@hse.ru

**Куркин Андрей Александрович** – д. физ.мат.н., проф., НГТУ им.Р.Е. Алексеева, e-mail: aakurkin@gmail.com

**Гиниятуллин Айрат Рафаэлевич** – аспирант, НГТУ им.Р.Е. Алексеева, e-mail: a.giniyatullin@groovytel.ru

**Масленников Дмитрий Александрович** – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: dmitrymaslennikov@rambler.ru

**Катаева Лилия Юрьевна** – д.ф.-м.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: kataeval@rambler.ru

**Белоцерковская Ирина Ефимовна** – ассистент, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: miran\_kaspir@mail.ru

### ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

**Жевнерчук Дмитрий Валерьевич** – к.т.н., доц., Чайковский технолог. ин-т ФГБОУ ВПО ИГТУ, e-mail: drevnigeck@yandex.ru

**Аристов Алексей Владиславович** – студент, Чайковский технолог. ин-т ФГБОУ ВПО ИГТУ, e-mail: mercuryz@list.ru

**Герасимов Юрий Викторович** – студент, Чайковский технолог. ин-т ФГБОУ ВПО ИГТУ, e-mail: strannick0-0@mail.ru

**Полетаев Антон Александрович** – магистрант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИРИТ, e-mail: ofpman@yandex.ru

**Корелин Олег Николаевич** – к.т.н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИРИТ, e-mail: korelin@nntu.nnov.ru

**Никулин Евгений Александрович** – к.т.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИРИТ, e-mail: nea@mail.nnov.ru

### ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

**Безносков Александр Викторович** – д.т.н., проф., e-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

**Дроздов Юрий Николаевич** – д.т.н., проф., зав. отделом Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, e-mail: .

**Бокова Татьяна Александровна** – к.т.н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

**Махов Кирилл Андреевич** – аспирант, инженер каф. «АТСиМИ» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

**Кресов Дмитрий Геннадьевич** – к.т.н., вед. инженер-конструктор подразделения 70 ОАО "ОКБМ им. И.И. Африкантова", e-mail: kdg64@rambler.ru

**Салмин Алексей Игоревич** – вед. инженер, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИЯЭиТФ, e-mail: nimlas@mail.ru

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

**Лаптев Александр Игоревич** – инженер-технолог, ОАО «Гидромаш»,  
e-mail: alxpt@gmail.com

**Букин Павел Эдуардович** – инженер-конструктор, ОАО ПКО «Теплообменник»,  
e-mail: fox\_tracks@mail.ru

**Фролова Ирина Николаевна** – нач. бюро, ОАО ПКО «Теплообменник»,  
e-mail: friririk@mail.ru

**Крайнов Вадим Владимирович** – ассистент, НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

**Пилипосян Сержик Егорович** – к.т.н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436-82-33

**Кошелев Олег Сергеевич** – д.т.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436 03 90

**Калынов Олег Юрьевич** – инженер-конструктор, ООО НПП «Прима»,  
e-mail: mr\_pirate\_86@mail.ru

**Фролов Леонид Сергеевич** – инженер-конструктор, ООО НПП «Прима»,  
e-mail: Frolov-1\_nn@rambler.ru

## НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

**Беляков Владимир Викторович** – д.т.н., проф., нач. УНИИИР, НГТУ им. Р.Е. Алексеева,  
e-mail: belyakov@nttu.nnov.ru

**Зезюлин Денис Владимирович** – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

**Галкин Дмитрий Александрович** – ген. д-р ООО «Военно-промышленная компания», г. Москва, e-mail: zaitals@mail.ru

**Зайцев Алексей Сергеевич** – вед. инженер-конструктор ООО «Военно-инженерный центр», г. Н. Новгород, e-mail: zaitals@mail.ru

**Кудряшов Евгений Михайлович** – Упр-щий д-р ООО "Военно-инженерный центр", г. Н.Новгород, e-mail: zaitals@mail.ru

**Макаров Владимир Сергеевич** – к.т.н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева,  
e-mail: makv112010@gmail.com

**Барахтанов Лев Васильевич** – д.т.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 436 93 79

**Манянин Сергей Евгеньевич** – гендиректор ООО «ТрансМаш», тел. 220 96 51

**Котляренко Владимир Иванович** – д.т.н., проф., МАМИ, (495) 626 91 69

**Соколов Илья Александрович** – инженер-конструктор ООО «ТрансМаш»

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

**Францев Михаил Эрнстович** - к.т.н., АО «Нептун-Судомонтаж», г. Москва,  
e-mail: gerald629@yandex.ru

**Ершов Николай Владимирович** – к.т.н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева,  
e-mail: env.2011@yandex.ru

**Ершов Николай Федорович** – д.т.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева,  
сл. тел. (831) 437-94-44

**Химич Владимир Леонидович** – д.т.н., проф., зав. каф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел.

**Хрипач Николай Анатольевич** – к.т.н., доцент, зав. каф. АиТД, МГТУ «МАМИ»,  
e-mail: khripachna@gmail.com

**Лежнев Лев Юрьевич** – к.т.н., д-р НТЦ "Силовые агрегаты" МГТУ «МАМИ», e-mail: lev.lezhnev@gmail.com

**Папкин Борис Аркадьевич** – к.т.н., зам. д-ра НТЦ "Силовые агрегаты" МГТУ «МАМИ»,  
e-mail: borispapkin@yandex.ru

**Шустров Федор Андреевич** – зам. д-ра НТЦ "Силовые агрегаты" МГТУ «МАМИ»,  
e-mail: shustrov@yandex.ru

**Иванов Денис Алексеевич** – вед. инженер НТЦ "Силовые агрегаты" МГТУ «МАМИ»,  
e-mail: stavelot@yandex.ru

**Папкин Игорь Аркадьевич** – инженер-исследователь 2-й кат. НТЦ "Силовые агрегаты" МГТУ «МАМИ»,  
e-mail: gary6@yandex.ru

**Сонкин Валерий Иосифович** – сотрудник каф. АиТД МГТУ «МАМИ» в ГИЦ РФ ФГУП НАМИ, e-mail: val.sonkin2010@yandex.ru

**Лобастов Валерий Павлович** – к.т.н., Верхне-Волжский филиал Российского Речного Регистра.

**Зеличенко Евгений Валерьевич** – магистрант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева,  
e-mail: ship@nttu.nnov.ru

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

**Дмитриев Сергей Михайлович** - д.т.н., проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева,  
тел.(831)436 23 25

**Плехов Александр Сергеевич** – к.т.н., ООО «Энергосбережение», e-mail: plehov@mail.ru

**Титов Владимир Георгиевич** – д.т.н., проф.,зав.каф. ЭОС, тел. (831)436 17 68

**Титов Дмитрий Юрьевич** – магистр, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: plehov@mail.ru

**Яшин Сергей Николаевич** – д.т.н, проф., зав. каф. УИД, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831)436 73 74  
**Смирнов Александр Юрьевич** – вед. инженер ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова», к.т.н., проф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: a\_yu\_smirnov@mail.ru

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Палаткина Любовь Владимировна** – ст. препод. Волг. ГТУ, e-mail: Palatkins@rambler.ru

**Колокольцев Валерий Михайлович** – д.т.н., проф., ректор Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, e-mail: kum.@magtu.ru

**Иванова Ирина Владимировна** – аспирант, Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, e-mail:ivanova.mgtu@mail.ru

**Долгополов Александр Михайлович** – аспирант, Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, тел. 3(519)29 84 02

**Яровая Елена Игоревна** – к.т.н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: helyar@yandex.ru

**Ульянов Владимир Андреевич** – д.т.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева,

**Спаская Маргарита Михайловна** – к.т.н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева,

**Гусев Александр Юрьевич** – зам. начальника комплексного отдела, НИИ им. Ю.Е. Седакова

## ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

**Храмов Андрей Анатольевич** – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: yeshome@yandex.ru

**Козина Ольга Леонидовна** – к.т.н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436 63 60

**Гунько Юрий Леонидович** – д.т.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436 83 73

**Михаленко Михаил Григорьевич** – д.т.н., проф., зав. каф. ТЭП, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436 83 73

**Комова Елена Павловна** – к.х.н., доц. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: helen2080@mail.ru

**Скоробогатова Евгения Владимировна** – д.х.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436 93 57

**Арбатский Анатолий Петрович** – д.х.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436 63 60

**Карташов Виктор Романович** – д.х.н., проф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436 93 57

## ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

**Борисов Сергей Александрович** – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: ser211188@yandex.ru

**Плеханова Анна Феликсовна** – д.э.н., проф., зав. каф. УФП, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел.

**Ромашова Ирина Борисовна** – д.э.н., проф., зав. каф. ИМ, НГАСУ, e-mail: irinar2002@rambler.ru

**Хохлова Ольга Владимировна** – аспирант, НГАСУ, e-mail: olha1@bk.ru

**Яшин Сергей Николаевич** – д.э.н., проф., зав. каф. УИД, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831)436 73 74

**Солдатова Юлия Сергеевна** – финансовый контролер, ООО «ТисенКрупп Материалс», e-mail:Julia2511@bk.ru

## СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

**Казакова Валерия Игоревна** – к. филос. н., доц., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: trenklen@nntu.nnov.ru

**Малахова Юлия Витальевна** – к. соц. н., вед. специалист, НИУ при президенте РФ РАНХиГС, e-mail: valentine\_49@inbox.ru

**Меркулов Антон Евгеньевич** – аспирант, СПбГУЭиФ, e-mail: antmerk@mail.ru

## МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**Вавилов Владимир Дмитриевич** – д.т.н., проф., зав. каф. АПиУ, e-mail: aru@apingtu.edu.ru

**Гаврилов Александр Александрович** – инженер 2-й кат., АНПП «ТЕМП-АВИА», e-mail: sania092010@mail.ru

**Шипунов Андрей Николаевич** – вед. инженер, АНПП «ТЕМП-АВИА», e-mail: shipunov\_an@mail.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

**Яковлев Евгений Иванович** – д. физ.-мат. наук, проф., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, e-mail: yei@uic.nnov.ru

**Ценова Анастасия Анатольевна** – студент, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, e-mail: cnastik@yandex.ru

**Митяков Евгений Сергеевич** – ассистент, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: emityakov@gmail.com

**Сазонов Владимир Александрович** – к. физ.-мат.н., доц., ООО «Интеком», e-mail: vladimir@gmail.com



ТРУДЫ  
НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

**№ 2 (95)**

Редакторы: **О.В. Пугина, Н.Н. Максимова**  
Технический редактор **Т.П. Новикова**

*Редакция:*

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
тел.: 8-312-436-73-72, [rio@nntu.nnov.ru](mailto:rio@nntu.nnov.ru)

Подписано в печать 06.06.2012. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 43,75. Уч.-изд. л. 40. Тираж 300 экз. Заказ

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.  
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.



**Индекс 44757**  
**«Объединенный каталог Пресса России. Газеты и журналы»**